

L. DE LAUNAY

*RECHERCHE CAPTAGE ET AMÉNAGEMENT
DES
SOURCES THERMO-MINÉRALES*

PARIS & LIÈGE

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE CH. BÉRANGER



Nº 4405

Wm

etc

issd

3 03 04 00-2

628.11

L3761

RECHERCHE, CAPTAGE
ET
AMÉNAGEMENT
DES
SOURCES THERMO-MINÉRALES

DU MÊME AUTEUR

Traité des gites minéraux et métallifères.

Recherche, étude et conditions d'exploitation des minéraux utiles ; description des principales mines ; usages et statistique des métaux. Cours de géologie appliquée de l'École supérieure des mines, par FUCHS et DE LAUNAY. 2 vol. grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte et 2 cartes en couleurs, reliés **60 fr.**

Les Mines d'or du Transvaal.

Étude géographique et historique ; organisation des sociétés minières ; étude géologique ; exploitation des gisements ; traitement des minerais ; résultats économiques. 4 vol. grand in-8°, avec 81 figures dans le texte et 41 planches, relié **15 fr.**

Les Diamants du Cap.

Historique ; organisation financière et commerciale ; géologie ; mode d'exploitation et de traitement ; comparaison avec les gisements du Brésil, de l'Inde, de Bornéo et d'Australie. 4 vol., avec 49 figures dans le texte et 1 planche, relié **10 fr.**

RECHERCHE, CAPTAGE
ET
AMÉNAGEMENT
DES
SOURCES THERMO-MINÉRALES

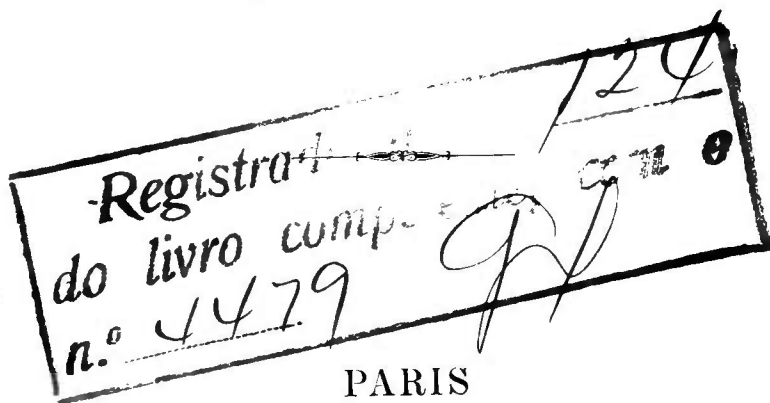
ORIGINE DES EAUX THERMO-MINÉRALES
GÉOLOGIE
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

COURS PROFESSÉ A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE DES MINES

PAR

L. DE LAUNAY

Professeur à l'École nationale supérieure des Mines.
Ingénieur au Corps des Mines.



PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET C^o, ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1899

Tous droits réservés.

PRÉFACE

BUT ET DIVISIONS DE L'OUVRAGE

L'étude des sources thermo-minérales, de leur origine, de leur nature et de leur captage fait, depuis 1889, partie de notre cours de *Géologie Appliquée*, professé à l'École des Mines, au même titre que la description des gîtes minéraux et métallifères¹

C'est, d'abord, ainsi que nous le rappellerons bientôt, parce qu'il y a là une richesse minérale d'un ordre spécial, que l'ap-

Cette partie du cours, dont l'utilité avait été depuis longtemps reconnue par le Conseil de l'École des Mines, n'avait fait, avant nous, que figurer sur les programmes, sans entrer, en réalité, dans l'enseignement.

C'est, pour nous, un devoir de profonde reconnaissance, en même temps qu'un véritable plaisir, d'insérer ici le nom de celui qui a été notre premier guide dans l'étude des eaux thermo-minérales : M. Aguilon, Inspecteur général des Mines, qui nous a fait bien souvent profiter, avec une inépuisable complaisance, de sa science en matière de captage et qui nous a initié, voilà une quinzaine d'années, aux travaux si remarquables et si peu connus de l'ingénieur François.

Nous avons déjà eu l'occasion de publier, sur les eaux souterraines, et spécialement sur les eaux thermales, quelques mémoires de détail, auxquels il nous arrivera de renvoyer sans en donner le titre complet. Ce sont :

1888. *Mém. sur les sources minérales de Bourbon-l'Archambault* (Ann. d. M., 8^e sér., t. XIII, p. 489). — 1890. *Sur quelques questions relatives à la géologie des grottes et des eaux souterraines* (en collaboration avec M. Martel) (B. S. G. F., 1^{er} déc. 1890). — 1894. *Mémoire sur les sources thermales de Pfaefers-Ragaz* (Ann. d. M., t. xv, 1894). — 1894. *Une ville d'eau suisse au moyen âge et au xvii^e siècle : Pfaefers-Ragaz* (Nature, 13 janv. 1894). — 1895. *Les sources thermales de Néris (Allier) et d'Evauz (Creuse)* (Ann. d. M., juin 1895). — 1895. *Sur la relation des sources thermales de Néris et d'Evauz avec les dislocations anciennes du Plateau Central* (C. R. 10 juin, 1895). — 1896. I. *De l'origine de l'acide carbonique dans les eaux minérales*. — II. *Des eaux artésiennes profondes dans leurs relations avec certaines sources minérales* (Congrès d'hydrologie de Clermont, p. 133 et 158). — 1898. *La distribution géographique des sources thermales* (Rev. gén. des Sciences, juillet 1898).

plication pratique des connaissances géologiques doit permettre à un Ingénieur des Mines de rechercher et d'exploiter rationnellement ; mais c'est aussi — et nous tenons à le bien faire comprendre en commençant — parce qu'en réalité les deux sujets sont presque inséparables, les résultats obtenus pour l'un devant servir très souvent pour l'autre.

On sait, en effet, quel rôle capital la circulation des eaux souterraines paraît avoir joué dans la constitution primitive des gîtes minéraux, aussi bien que dans leurs modifications subséquentes et l'isolement, la concentration en des dépôts exploitables d'éléments chimiques ordinairement disséminés dans l'écorce terrestre, nous semblent pouvoir être attribués à des opérations de métallurgie naturelle, dont ces eaux ont été le principal agent.

Mais, dans les filons, nous ne pouvons juger de l'ouvrier que d'après son œuvre ; dans les sources thermales, il semble, au contraire, qu'il travaille devant nous : là nous avons le cadavre, ici nous observons la vie. Et c'est en cela que les deux sciences s'apportent le plus utile complément. D'un côté, par une dissection anatomique opérée librement et à loisir, nous pénétrons jusque dans les profondeurs les plus mystérieuses du corps pour en découvrir les veines et les ressorts cachés ; de l'autre, en voyant l'être vivre et agir sous nos yeux, nous comprenons mieux le sens, le but et la fonction de tous ces organismes, que notre scalpel trouvait ailleurs inertes et désorganisés par la mort

On peut même pousser la comparaison plus loin, jusque dans le domaine de la pratique et c'est comme un véritable gisement minéral qu'il convient, croyons-nous, d'exploiter une source thermale : pour rechercher et capter l'eau bienfaisante, on n'a qu'à se guider sur les principes qui permettraient d'aller extraire un métal précieux, déposé, à une époque géologique antérieure, dans les fissures où elle circule. Un filon d'eau sulfureuse ne se comporte guère autrement qu'un

filon d'étain et la plus grande différence entre les deux problèmes est peut-être la facilité qu'on a, dans notre cas présent, de faire venir à soi, d'attirer sans effort, par le jeu même des forces naturelles, ce minerai particulier, qui est de l'eau.

Les sources thermales — dont nous n'avons pas à envisager ici, cela va de soi, l'emploi thérapeutique — constituent, de par cet emploi même, qui s'est généralisé dans tous les pays du monde, une richesse minérale de premier ordre, et la mise en valeur industrielle de cette richesse, qui doit précéder son utilisation commerciale, rentre évidemment dans le ressort de l'ingénieur. C'est cette mise en valeur, autrement dit le *captage* des sources thermales, dont nous allons bientôt examiner les principes. L'eau thermale une fois captée, et amenée au point où elle doit être employée, dans les conditions physiques et chimiques reconnues les plus favorables à son application médicale, le rôle de l'ingénieur des mines cesse et celui d'autres agents, à la compétence tout à fait différente de la sienne, tels que l'architecte ou le médecin, commence.

Notre travail sera donc strictement limité à l'étude des particularités géologiques, physiques et chimiques, qui permettent de bien connaître une source thermale, avant d'en effectuer le captage et à l'exposé de ce captage même, qui formera la consécration pratique immédiate de ces premières recherches théoriques.

Etant donné l'importance du sujet et la quantité de personnes qui s'intéressent aux sources thermales ou qui en vivent, on aurait pu s'attendre à trouver toute une abondante bibliographie sur ces questions, ainsi qu'il en existe une sur les propriétés médicinales et chimiques des mêmes eaux. En réalité, si on laisse de côté quelques monographies de détail, nous ne connaissons aucun ouvrage d'ensemble sur le captage de ces sources, l'important traité de M. Daubrée sur les Eaux Souterraines, auquel nous recourrons souvent quand il s'agira de la composition des eaux ou de leur émergence, n'étant

aucunement consacré à leur utilisation. Ayant eu autrefois à nous occuper par nous-même de quelques travaux de ce genre, nous avons très vivement ressenti cette lacune, que nous ne pouvons avoir l'espoir trop ambitieux de combler ici. D'une façon générale, l'étude des sources thermales a été un peu abandonnée aux médecins et aux chimistes par les ingénieurs et même par les géologues ; c'est peut-être une des causes, pour lesquelles on continue généralement à les considérer, avec un respect superstitieux, comme une sorte de produit, pour ainsi dire miraculeux, auquel il serait dangereux et presque sacrilège d'oser toucher, tandis que, dans nombre de cas, il est possible d'augmenter le débit de ces sources, leur température, leur minéralisation et même leur efficacité — c'est-à-dire, par contre-coup, la richesse de tout un pays, — au moyen de travaux peu coûteux.

Nous serions heureux si nous pouvions contribuer à généraliser quelques notions plus rationnelles sur une matière où, ce nous semble, des préoccupations commerciales n'ont pas été parfois sans amener un certain charlatanisme.

Il est peu de phénomènes naturels, à l'occasion desquels ce besoin du merveilleux, qui est instinctif chez l'homme, ait trouvé plus d'occasions de se manifester que pour les eaux thermales et nous permettra-t-on d'ajouter que la valeur médicale, attribuée par le public à leur emploi, ne paraît pas en avoir été diminuée. Ainsi l'on s'est plu à leur prêter une origine extraordinaire et anormale, tout au moins si profonde qu'elle échappait à nos moyens d'investigation, et des vertus inconnues dans les autres eaux, telles que des phénomènes électriques, calorifiques ou chimiques absolument particuliers et inexplicables. Peut-être trouvera-t-on, après nous avoir lu, que le cas est plus simple et, si nous réussissions à le montrer, nous croirions alors avoir fait œuvre scientifique : car le but premier de la science est de simplifier.

En raison du plan même que nous venons d'indiquer, notre

ouvrage comprendra deux divisions principales : l'une, surtout théorique, formant le premier livre, où nous étudierons l'origine des sources thermales, leur mode d'émergence, leurs propriétés physiques et chimiques et leur répartition à la surface du globe, en cherchant à serrer d'un peu plus près et, tout au moins, à poser d'une façon nette, bien des questions qu'on a jusqu'ici laissées dans le vague ; l'autre, uniquement technique (livre II), où nous nous occuperons de leur recherche et de leur captage. Tout en précisant le plus possible, par un grand nombre d'exemples, les principes généraux que nous essayerons d'exposer, nous ne ferons donc pas la description suivie et complète des sources, dont nous parlerons ; mais des indications bibliographiques, données en notes, permettront néanmoins à ceux que telle ou telle source intéresserait plus spécialement, de retrouver les monographies antérieures qui peuvent les renseigner sur elles¹.

En résumé, le plan que nous adopterons sera le suivant :

Après avoir indiqué, dans l'ensemble, l'origine artésienne que nous attribuons aux sources thermales et discuté les deux grands problèmes relatifs à cette question préjudicielle, c'est-à-dire les causes de l'infiltration des eaux et de leur remontée à la surface, nous étudierons en détail les faits qui distinguent une source thermale quelconque : mode d'émergence, ou griffon ; propriétés chimiques et physiques, composition, température, débit, etc.

Ayant ainsi montré, chemin faisant, comment le gisement d'une source thermale se rattache à la géologie de la région et peut être, jusqu'à un certain point, prévu d'après elle, en même temps qu'il sert à l'éclaircir, nous tenterons ensuite d'aller plus loin dans la voie de la synthèse, en examinant comment

¹ La plupart des brochures écrites sur les sources thermales sont des ouvrages médicaux ; mais beaucoup d'entre elles contiennent néanmoins un chapitre sur les propriétés et parfois sur le captage de la source étudiée. On ne s'étonnera donc pas de voir citer ici quelques travaux, dont l'objet essentiel est absolument distinct du nôtre.

les groupes de sources se répartissent à la surface de la terre et sont en rapport avec les chaînes de montagnes récentes : ce qui nous sera une occasion pour décrire, avec un peu plus de détails, quelques-unes des grandes stations thermales du monde et compléter ainsi ce qui aura été dit dans les chapitres précédents.

Passant alors à la seconde division, tout à fait pratique, de notre ouvrage, nous envisagerons les méthodes à adopter, suivant les cas, pour rechercher une source thermale, la capter, la transporter au point de consommation et l'aménager, en lui conservant la température la plus élevée, la minéralisation la plus forte, la plus grande abondance de gaz et, en même temps, en développant son débit dans la mesure où les besoins de la station thermale le rendent nécessaire ou utile.

LES SOURCES THERMO-MINÉRALES

LIVRE PREMIER ÉTUDE GÉOLOGIQUE, CHIMIQUE ET PHYSIQUE

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

DÉFINITION DES SOURCES THERMO-MINÉRALES. — LEURS RELATIONS AVEC LES SOURCES ORDINAIRES. — PROBLÈMES GÉNÉRAUX DE L'HYDROLOGIE SOUTERRAINE. — HISTORIQUE SOMMAIRE DU SUJET.

Quand on aborde l'examen d'un phénomène naturel, tel que les sources thermo-minérales, il est assez logique de commencer par le bien définir, afin de préciser à la fois et de limiter son champ d'études. Mais, dans notre cas, ce n'est pas chose aussi aisée qu'on le pourrait croire. Nous ne connaissons point, en effet, de définition géologique, physique ou chimique, qui convienne à toutes les sources dites thermales ou thermo-minérales et ne convienne qu'à elles; ces catégories de sources spéciales se rattachent aux sources habituelles, dont elles ne sont, au fond, qu'une dépendance, par toute une série de transitions insensibles, chacune de leurs propriétés extérieures les plus remarquables : brusque émergence, haute température, forte minéralisation, abondance des gaz, etc., pouvant disparaître tour à tour, sans que, dans l'usage courant, on cesse de les considérer comme des sources thermales ou minérales.

En dernière analyse, on est donc amené à constater que leur

spécification précise est fondée uniquement sur l'usage qu'on en fait, ou pourrait faire en médecine, c'est-à-dire sur les vertus thérapeutiques qu'on leur attribue¹, vertus semblant résulter souvent de la température et de la minéralisation, mais parfois aussi indépendantes, du moins en apparence, de ces propriétés²

Leur thermalité élevée est assurément leur caractère le plus original et celui dont dérivent la plupart des autres ; néanmoins, nous avons adopté le titre plus général de sources thermo-minérales, pour tenir compte des très nombreuses sources froides et minéralisées, dont nous aurons à parler.

Cette remarque faite, on peut néanmoins, dans les cas habituels, distinguer une source thermo-minérale d'une source ordinaire par quelques particularités très caractéristiques :

La première, qui doit attirer l'attention d'un géologue et qui, pour l'étude que nous aurons à faire plus tard du captage, a le plus d'importance, est son mode d'émergence.

Une source habituelle résulte, en principe, du suintement de filets d'eau souterrains, emmagasinés dans les parties meubles superficielles du sol, drainés par une strate perméable, ou recueillis dans un système de fissures ouvertes et venant apparaître au jour, soit à la rencontre de la nappe générale d'infiltration, dont nous venons d'indiquer l'origine, avec la surface topographique, soit, au-dessus de cette nappe, sur l'affleurement de quelque couche étanche, qui aura interrompu la descente des eaux. Elle présente donc, le plus souvent, une émergence en rapport avec la nature et la stratification des terrains et sort de terre, par le jeu de la gravité, sans force ascensionnelle extraordinaire.

Au contraire, une source thermale naturelle (c'est-à-dire qui n'a pas été obtenue par puits ou par sondage) apparaît, presque toujours, brusquement et avec un débit souvent considérable, en un point que la nature des strates encaissantes ne désignait point, d'abord, pour donner naissance à des suintements d'eau, mais où une observation géologique plus attentive fait reconnaître la présence d'une faille, d'un filon, d'un pli très accentué, en un mot d'une fracture verticale profonde et relativement large, par laquelle

Quelques auteurs ont proposé de les nommer simplement sources médicinales.

D'après LEFORT (article *Eaux minérales*), « on doit entendre par eaux minérales toutes celles qui, en raison, soit de leur température bien supérieure à celle de l'air ambiant, soit de la quantité ou de la nature spéciale de leurs principes salins et gazeux, sont ou peuvent être employées comme agents médicamenteux ».

l'eau, emmagasinée souterrainement sous pression, remonte au jour rapidement, à l'improviste. Son émergence est donc ordinairement indépendante de la stratification et ascendante.

La source ordinaire étant comparée grossièrement à une couche sédimentaire, la source thermale pourrait être assimilée à un filon.

Toutefois cette distinction, qui paraît si nette, n'est pas sans présenter d'assez nombreuses exceptions.

En premier lieu, parmi les sources incontestablement ordinaires, il en est un groupe entier, qui offre, à son émergence, la plus grande analogie avec les sources thermales : ce sont les sources, dites vauclusiennes, des terrains calcaires, dont l'étude est aujourd'hui très complète grâce aux travaux de notre ami M. Martel¹, sources arrivant au jour d'en bas, par siphon, et avec un fort débit. La cause de leur jaillissement brusque est la même que pour les sources thermales : existence dans le sol d'une large fracture béante, par laquelle les eaux, accumulées sous pression dans quelque réservoir souterrain, peuvent remonter rapidement à la surface ; mais ici la fracture, qui n'a pas une origine géologique profonde, est limitée à quelques strates calcaires, au lieu de traverser les terrains les plus divers : en sorte que l'eau, ainsi ramenée au jour, n'a pas eu, dans un très court trajet souterrain, la possibilité de s'échauffer ni de se minéraliser et, par suite, de devenir une source thermale.

D'autre part, il est des sources médicalement utilisées, qui suintent, à la façon des sources les plus ordinaires, au contact d'une couche poreuse et d'une couche étanche, sans avoir, d'ailleurs, rien de remarquable dans leur température ; ce sont notamment celles, qui, ayant rencontré dans le sol des sels solubles (chlorure de sodium, sulfate de chaux, etc...), ou parfois des gaz emprisonnés dans les terrains (acide carbonique, etc...), s'en sont imprégnées.

Après le mode d'émergence, le caractère le plus généralement remarquable des sources thermales est leur haute température ; c'est même de beaucoup celui qui a le plus contribué à attirer l'attention sur elles et à les faire employer pour le traitement des maladies les plus diverses, à une époque ancienne où l'on ne pouvait soupçonner leur mode d'action réel.

En principe, une source est dite thermale, quand sa température

¹ *Les Abîmes*, 1894, passim. Voir également, sur ces sources abondantes froides : DUBRÉE. *Eaux souterraines*, I, 110 à 120.

dépasse celle de la zone de température constante, située elle-même environ à 20 ou 30 m. de profondeur dans le sol.

Etant donné l'origine artésienne que nous attribuerons bientôt aux sources thermales et, par suite, leur communauté complète d'origine avec les sources ordinaires, il n'y a pas lieu, croyons-nous, de préciser davantage cette indication : ce qui serait, d'ailleurs, difficile, rien n'étant moins bien défini que cette zone dite de température constante, dont la position dépend, en réalité, d'une foule de circonstances locales.

Ce qu'il est important de rappeler, c'est que, d'un point à l'autre du globe, la température normale et constante du sol peut varier de plus de 30°, en sorte que, pour classer une source dans les sources thermales ou dans les sources ordinaires, il sera indispensable de connaître, au moins, la position géographique et l'altitude de son émergence.

Cette température élevée de certaines sources, qui, dans quelques cas particuliers (notamment autour des volcans récents ou anciens), peut tenir à la chaleur même des parties les plus superficielles du sol, nous paraît être généralement attribuable à la profondeur que les eaux ont atteinte en s'enfonçant dans l'écorce terrestre et dépend, par suite, directement de la présence des accidents géologiques, qui ont permis cette descente, ou déterminé cette brusque remontée au jour des eaux profondes : elle est donc la conséquence directe de l'allure filonienne spéciale, examinée en premier lieu.

Ici encore pourtant, on doit noter l'existence de toute une série de sources, employées comme sources minérales malgré leur température très basse : ce sont généralement celles qui se trouvent fortement minéralisées par une circonstance accidentelle, tenant à l'existence de sels solubles ou de gaz dans les terrains.

Enfin, sauf l'exception précédente, la minéralisation, presque toujours élevée¹, des sources thermales semble, comme nous le verrons, en relation avec leur température et, par suite, avec la profondeur jusqu'à laquelle les eaux ont pénétré.

Mais, là également, il faut signaler la présence de toute une caté-

¹ Il n'est point d'eau quelconque à la surface du globe, qui ne soit, à proprement parler, minérale, c'est-à-dire où l'analyse ne décèle l'existence de quelques substances chimiques. Les sels solubles, comme le chlorure de sodium, le sulfate et le bicarbonate de chaux, le nitrate de potasse, etc., sont presque constants dans les eaux.

gorie de sources, dites faibles, indifférentes, indéterminées ou alpestres (wildbäder, etc...), dont la composition chimique, en dépit d'une haute température, paraît, avec les moyens d'analyse actuels, tout à fait normale et semblable à celle d'une eau quelconque et que l'on considère, néanmoins, comme exerçant une action thérapeutique efficace.

En résumé, l'on voit, d'après ces quelques observations très brèves, sur lesquelles nous aurons à revenir plus tard, comment le problème des sources thermales se rattache à celui, plus général, de la circulation de toutes les eaux souterraines actuelles, dont il constitue seulement un cas un peu particulier. Nous avons, d'autre part, déjà rappelé en passant l'importance prépondérante que ces circulations d'eaux, plus ou moins chaudes et plus ou moins minéralisées, à travers l'écorce terrestre ont dû avoir, à des époques anciennes, dans les modifications subies par cette écorce, notamment dans la constitution des gîtes métallifères. Comme l'a montré M. Daubrée dans son important *Traité des Eaux souterraines*, qui nous servira souvent de modèle, il y a là tout un ensemble très continu de phénomènes connexes, dont chacun peut éclairer les autres, en même temps qu'il tire d'eux de la lumière.

L'eau est partout à la surface de la terre ; elle est dans les océans, qui occupent à peu près les sept dixièmes de sa superficie et dont le volume est quinze fois plus grand que celui des continents émergés ; elle flotte à l'état de vapeur d'eau dans l'air ; elle retombe de là en pluie et finalement imbibe, comme une éponge, tous les vides de l'écorce, au-dessous d'un certain niveau, variable avec le relief du sol, que l'on appelle le niveau hydrostatique. Au-dessus de ce niveau d'imprégnation permanente, les mouvements capricieux de ce fluide sont soumis au conflit des diverses forces physiques, gravité, pression, capillarité, chaleur, puissance expansive des gaz, etc., qui, suivant les circonstances, l'entraînent ici ou là, la font disparaître ou la ramènent au jour, en accomplissant une série de cycles sans fin, sous l'action de la double influence dominante de l'attraction moléculaire et de la chaleur, tant solaire que terrestre.

Nous n'avons pas besoin de faire remarquer l'intérêt pratique de tous les instants, que présente l'étude des lois géologiques, auxquelles obéissent les mouvements de cet agent si précieux, si indispensable même à tant de titres et grâce à la connaissance desquelles on peut espérer le rencontrer ou le capter en cas de besoin. Le captage des sources thermales n'en est, nous le répétons, qu'un cas

particulier d'un intérêt spécial et, sans doute, en un sens, d'une difficulté plus grande, mais peut-être aussi, par l'intensité même du phénomène, susceptible d'une solution plus rigoureuse et de prévisions plus assurées.

Le besoin de recueillir, d'emmagasiner et parfois de transporter à de grandes distances l'eau des sources, que la nature fournit, ici en surabondance, ailleurs avec parcimonie, est, d'ailleurs, un des premiers qui aient forcé l'homme à faire œuvre d'ingénieur, avant même qu'il ait pris la peine de tracer péniblement des voies de communication, de jeter des ponts ou de construire des ports. Le choix des premiers points d'habitation humaine a été déterminé par l'avantage de posséder une source à proximité, toutes les fois qu'une cause étrangère — et notamment la nécessité de se défendre contre des ennemis divers — ne forçait pas à adopter un endroit moins favorable, où l'on se hâtait alors d'assurer l'approvisionnement d'eau par des citernes ou des puits. Dans notre état de civilisation, nous avons oublié souvent, par la facilité même que nous trouvons à le satisfaire, ce besoin de l'eau pure et saine, presque aussi immédiat que celui du feu et du pain ; mais, sans parler même de ces pays du soleil, où l'homme a, de tout temps, divinisé les eaux jaillissantes, il suffit d'avoir passé quelques jours dans les Alpes pour savoir combien les montagnards connaissent, dégustent et apprécient les eaux, que fait apparaître pour eux spontanément la terre.

Plus tard, quand des agglomérations humaines se sont constituées, il a fallu y amener l'eau de distances parfois énormes ; les Assyriens, les Phéniciens ont donné bientôt des modèles remarquables de ce genre de travaux et, dans des âges plus récents, nous n'avons pas besoin de rappeler les multitudes d'aqueducs colossaux, dont les ruines perpétuent, mieux que tout autre monument, le nom et le génie romains.

Entre ces sources, si soigneusement observées et si bien appréciées par tous les villageois, il n'est pas surprenant qu'on ait remarqué très vite celles qui formaient de véritables fontaines d'eau chaude et que la réputation s'en soit propagée à de grandes distances. Les Romains, qui témoignaient pour les bains chauds d'un goût presque aussi prononcé que les Anglais, leurs émules modernes, pour les ablutions d'eau froide et dont le premier soin, partout où ils ont passé, a toujours été de bâtir un cirque et des thermes, se sont montrés particulièrement friands de sources ther-

males et l'on peut dire qu'il n'en est pas une seule vraiment importante, dans les pays où ils ont séjourné, dont ils n'aient commencé le captage.

En même temps qu'ils trouvaient là des facilités pour ce que nous appellerions un traitement hydrothérapique, ils reconnurent vite l'action médicale de ces eaux sur certaines maladies ¹.

Cette idée ne fit que s'accroître, quand, après la nuit des invasions barbares, les débris, un moment submergés, des traditions et de l'esprit antiques revinrent flotter à la surface, avec toutes les déformations que leur avait fait subir le passage à travers ces cervelles demi-barbares d'hommes du Nord, enclins à toutes les rêveries et cherchant partout le miraculeux. En même temps qu'Aristote devint une sorte de magicien omniscient, les sources thermales passèrent pour la panacée universelle : le pendant de cette pierre philosophale tant cherchée, pour transmuter un corps malade en un corps sain.

Il y aurait une curieuse histoire à retracer, dont nous avons esquissé ailleurs quelques chapitres à propos des eaux de Ragaz, en Suisse, ou de Bourbon-l'Archambault et Néris dans l'Allier ², sur l'emploi, souvent singulier, qui fut fait, depuis le XI^e ou XII^e siècle presque jusqu'à notre temps, des principales eaux thermales, l'une après l'autre retrouvées et généralement reconnues à leurs restes d'édifices romains. La médecine, qui est probablement la plus vieille de toutes les sciences, est peut-être, pour cela même, la plus récemment dégagée des liens de l'empirisme et les eaux thermales ont, au même titre que les antimonieux ou autres remèdes de M. Diafoirus, joui, à travers les siècles, d'une faveur irraisonnée, qui commence seulement, en se précisant et se particularisant, à se mieux justifier.

Mais, à côté de l'emploi en bains et sur place, qui fut le premier imaginé, les eaux thermales ont trouvé, tout dernièrement, par l'importance croissante que les habitants des villes apportent à se garantir des affections microbiennes, une application d'une importance commerciale plus grande encore et chaque jour croissante. Ce goût pour l'eau de source pure et saine, que, nous le rappelions tout à l'heure, l'homme des villes commençait un peu à oublier,

VITRUE, livre VIII, ch. III.

Annales des Mines, mai 1888, février 1894, juin 1895 ; *Nature*, 13 janvier 1894.

Voir JACQUOT et WILLM. *Eaux minérales de la France*, ch. IV, p. 61 à 72, historique ; *Dictionnaire DURAND-FARDEL* et FRANÇOIS, article *Appropriation*.

la bactériologie l'a ressuscité en lui récemment et, pour être assuré de boire une eau exempte de germes pernicioeux, il a eu l'idée toute naturelle de s'adresser aux eaux thermales, qui, par suite de leur origine profonde, présentent, lorsque leur captage et surtout leur embouteillage ne les contaminent pas, des garanties toutes spéciales de pureté.

DEUXIÈME PARTIE

ORIGINE DES EAUX THERMALES

Exposé des théories diverses. Origine artésienne. — L'origine des eaux thermales a longtemps passé pour mystérieuse ; leur température anormale, leur forte minéralisation habituelle, leurs propriétés spéciales, vraies ou supposées, conduisaient facilement à établir, entre elles et les sources simples, une démarcation absolue, qui n'a pas, à notre avis, de raison d'être et les philosophes (au sens ancien du mot), ou les géologues ne faisaient qu'obéir à cette tendance générale, en cherchant des explications très compliquées de ce phénomène, considéré comme surnaturel¹.

C'est ainsi que, jusqu'à une époque des plus récentes, on a vu attribuer la chaleur de ces eaux à la combustion de couches de houille invisibles, à l'oxydation de masses de pyrite, à de colossales batteries galvaniques, produites par la disposition relative des roches en profondeur (Fodéré, Socquet, Anglada), ou enfin, par une hypothèse encore en faveur auprès de bien des esprits, à une action volcanique directe, toutes les eaux chaudes étant alors considérées comme une émanation, une fumerolle des magmas ignés profonds, le résultat d'une sorte de rochage des éléments aqueux et salins, emprisonnés sous l'écorce terrestre avant sa consolidation.

On a, dans cet ordre d'idées, cherché, avec un soin que les faits ne justifiaient guère, des rapprochements plus ou moins loin-

¹ Voir, sur les théories anciennes relatives aux eaux thermales : DURAND-FARDEL, *Dictionnaire des Eaux minérales*, 1860, et DAUBRÉE, *Eaux souterraines*, II, 139 et 153 à 155. Nous permettra-t-on de rappeler, à ce propos, un passage de Rabelais sur les eaux thermales (liv. II, ch. xxxiii) : « Et je m'ébahis grandement d'un tas de fols philosophes et médecins, qui perdent temps à disputer d'où vient la chaleur de ces dites eaux, ou si c'est à cause du borax, ou du soufre, ou de l'alun, ou du salpêtre, qui est dedans la minière.

tains et forcés entre toutes les sources thermales et quelques pointements de roches éruptives, basaltes, etc.

La même tendance, appliquée aux phénomènes géologiques anciens, avait, d'ailleurs, on le sait, conduit toute une école à expliquer inversement, par ces sources thermales, par ces geysers volcaniques, une foule de réactions susceptibles d'une interprétation plus simple, telles que la silicification de bancs sédimentaires, la formation de cristaux de fluorine, de strontianite ou de pyrite, le dépôt d'amas de gypse, de sel, de soufre ou de substances diverses dans les terrains stratifiés, etc.

Cependant, l'hypothèse que tout au moins quelques sources thermales, dites géothermales, devaient résulter de la circulation artésienne d'infiltrations superficielles, échauffées et minéralisées dans leur parcours souterrain, était trop simple et trop séduisante pour ne pas trouver de bonne heure des partisans.

Albert le Grand, dès le xiii^e siècle, en avait déjà dit un mot en passant.

Plus tard, Descartes ¹ admettait que les eaux descendues des montagnes vont prendre la forme de vapeurs en profondeur et remontent alors par l'effet de la pression.

Laplace ² supposait également que les eaux, en descendant, s'échauffaient dans la terre, et, redevenues par là plus légères, se relevaient à la surface.

Puis Elie de Beaumont, dans son mémoire capital sur les émanations volcaniques et métallifères ³, distingua deux catégories de sources : les unes, — représentant, suivant lui, le cas le plus habituel, — en relation avec le volcanisme ; les autres, — plus exceptionnelles, — provenant de simples infiltrations semblables, et c'est à peu près l'opinion qu'a soutenue également M. de Lapparent dans son traité classique de géologie ⁴.

M. Daubrée, en écrivant son *Traité des Eaux souterraines* paru en 1887, a fait, dans la même voie, un pas beaucoup plus décisif et a admis une solution plus radicale, en renversant, pour ainsi dire, les termes de ce rapport anciennement supposé entre le volcanisme

1644. *Principes de la philosophie*, 4^e partie, § 64 et § 66.

Ann. de chimie et de physique, 1820, t. XIII, p. 412.

Bull. Soc. Géol., 2^e, t. IV, p. 1272.

3^e édition, 1893, p. 471 à 476, sur la relation des sources thermales et du volcanisme ; p. 499, sur les sources thermales ; p. 513, sur l'origine des gaz dégagés par les volcans, etc.

et les sources thermales. Pour lui, en effet, l'un et l'autre phénomènes ne sont que des conséquences diverses d'infiltrations superficielles, parvenues à des parties de plus en plus chaudes de l'écorce ¹ et prenant des formes de plus en plus violentes.

Comme nous n'aurons pas l'occasion de revenir sur cette question du volcanisme, qui, ainsi interprété, se rattacherait pourtant à notre sujet, nous tenons à dire ici en passant dans quelle mesure cette théorie nous paraît vraisemblable et combien la plupart des objections qu'on lui a faites nous semblent injustifiées ².

Il n'est, en effet, nullement nécessaire de supposer, comme on l'a dit, entre les volcans et le rivage de la mer, un rapprochement, qui est pourtant très fréquent ; les infiltrations des eaux provenant d'un grand lac d'eau douce, ou même d'accumulations neigeuses sur de hauts plateaux comme ceux du Thibet, peuvent avoir exactement le même effet. La nature des fumerolles ne devrait pas, il est vrai, être tout à fait semblable dans ce dernier cas ; mais nous ne croyons pas que l'on ait fait, jusqu'ici, sur des volcans très éloignés de la mer, les mêmes observations chimiques attentives que sur ceux de l'Etna, du Vésuve, de Santorin ou de quelques autres régions maritimes et il serait possible qu'on y trouvât, ce qui serait fort intéressant à vérifier, une proportion moins grande de chlorures.

Seule, une semblable théorie explique bien un écoulement volcanique aussi persistant que celui du Stromboli, poursuivi, pendant vingt siècles, sans changements notables : ce qui, en admettant que l'eau exhalée par le volcan avait été d'abord emmagasinée dans la roche en fusion, forcerait à en supposer des provisions souterraines tout à fait extraordinaires.

M. Fouqué a, de plus, fait remarquer — mais là nous aurions peut-être quelques restrictions à faire ³ — que tous les produits

Eaux souterraines, 1887, II, p. 212. — L'influence des infiltrations marines sur le volcanisme avait été déjà soutenue par GAY-LUSSAC (*Ann. phys. et chimie*, 1823), et par FOUQUÉ (*Rapport sur l'éruption de l'Etna*, 1866.)

² Nous n'entendons nullement, par là, attribuer la fusion même des roches volcaniques à l'intervention hydrothermale. M. de Lapparent (*loc. cit.*, p. 519) a fait justice de cette théorie au moins étrange. Nous ne voulons même pas affirmer que l'infiltration aqueuse soit la cause déterminante du volcanisme. Ainsi que l'a fait remarquer Suess, l'ascension d'un magma éruptif vers la surface doit résulter d'un phénomène plus général, tel que la compression produite en profondeur par la chute de quelque vousoir voisin ; mais, pour nous, cette ascension amène le contact des roches ignées avec les eaux superficielles et, par là, les explosions de vapeur d'eau, projections, etc., qui caractérisent *extérieurement* le volcanisme.

Nous verrons, plus loin, qu'il est, dans les produits éruptifs et dans les gîtes mé-

rencontrés dans les fumerolles volcaniques se trouvent également dans la mer.

Quant aux difficultés résultant de la contre-pression interne, empêchant, croyait-on, l'accès des eaux superficielles jusqu'au voisinage des roches en ignition, on sait comment M. Daubrée les a résolues par des expériences directes ¹.

Si donc nous parlerons bientôt de certaines sources thermales en relation plus ou moins directe avec des volcans ou avec des terrains échauffés par des actions éruptives, on voit dans quel sens nous l'entendons et que, là encore, nous considérons l'origine des eaux comme très probablement superficielle, ainsi que celle même des dégagements aqueux, qui constituent le phénomène le plus caractéristique du volcanisme ².

La démonstration de cette hypothèse va nous occuper longuement et nous essayerons de préciser, autant que la nature du sujet le comporte, les divers problèmes qui se posent à ce propos ; mais on peut, dès maintenant, indiquer les raisons principales pour lesquelles nous attribuons l'origine des eaux thermales à de simples infiltrations.

En premier lieu, toutes les fois qu'on se trouve dans une région fortement disloquée et plissée, à cassures nettes, à circulation d'eaux souterraines très rapide et surtout très localisée comme distance horizontale parcourue, ainsi que cela se passe dans les Alpes, on peut, en quelque sorte, saisir la chose sur le vif et c'est, en effet, pour cette catégorie de sources que l'école d'Elie de Beaumont a créé le cas, exceptionnel à son avis, des sources dites géothermales.

Nous avons décrit ailleurs en détail ³, et nous rappellerons bientôt ici l'exemple des sources thermales de Pfäfers-Ragatz, dans les Grisons, où l'on a, depuis bien des années, suivi les variations de débit et de température de la source, soit de saison en saison, soit même d'une année à l'autre. Ces variations correspondent là à celles du régime des neiges sur les montagnes voisines et leur succèdent, à environ un mois d'intervalle, de même que les varia-

tallifères connexes, toute une série de substances, dont l'origine paraît être réellement profonde et non simplement empruntée à un circuit superficiel.

Géologie expérimentale, p. 233 à 246.

M. Fouqué a calculé que, pendant l'éruption de l'Etna en 1865, il se dégageait, chaque jour, 22 000 mètres cubes d'eau.

Ann. des Mines, février 1894.

tions hydrotimétriques des puits artésiens de Paris reproduisent, au bout de plusieurs mois, d'après Belgrand, celles des eaux infiltrées dans l'Aisne à 200 km. de distance.

On retrouve des faits comparables dans la plupart de ces sources alpestres à haute température et faible minéralisation, qu'on appelle *wildbäder* : ainsi à Gastein et à Bormio, en Tyrol, etc...¹

Dans les régions moins accidentées, on doit admettre qu'il s'établit un régime interne plus stable, que l'eau s'emmagasine dans des réservoirs de capacité plus considérable, pour des périodes plus longues et qu'elle revient, par suite, au jour avec une certaine régularité, comparable à celle de toutes les sources permanentes.

Mais, d'une façon générale, il est inexact de considérer, ainsi qu'on l'a souvent affirmé, comme un signe distinctif entre les sources thermales et les sources simples, la constance absolue du débit des premières. Le débit des sources thermales n'est relativement constant que dans la mesure où l'est celui de toutes les nappes artésiennes un peu importantes, et on pourrait en dire autant de leur température².

En second lieu, les deux propriétés caractéristiques des eaux thermales, à savoir leur température et leur minéralisation, s'expliquent, nous le verrons, très aisément, par une circulation souterraine, en somme peu profonde, comme suffirait, d'ailleurs, à le faire prévoir le cas de ces véritables sources thermales artificielles, réalisées par le forage des puits artésiens³.

Il n'est jamais nécessaire de supposer, dans le trajet profond des eaux, une différence de niveau verticale de plus de 3 km. : ce qui, comparé, soit aux hauteurs des montagnes, soit aux déplacements horizontaux bien reconnus de nombre d'eaux de sources ordinaires, est fort peu de chose. La seule petite difficulté que nous aurons à lever se présente, dans des conditions particulièrement frappantes, pour les sources thermales, dont l'émergence est à un niveau très bas au-dessus de la mer : on se demande alors, au premier instant, comment et pourquoi des eaux superficielles auraient pénétré à 3 000 mètres au-dessous de la mer, dans une zone de l'écorce

¹ GUMBEL (*Bayer. Akad. der Wissenschaften*, 1891).

Voir plus loin, p. 189, le chapitre relatif au débit. Cf. BEAUGEY, *Mémoire sur Cauterets* (*Ann. des Mines*, 1892, p. 25).

³ L'eau du puits de Grenelle, provenant de 548 mètres de profondeur, est à 28° et contient environ 0^{sr},441 de matières dissoutes par litre, dont 41 p. 1100 de carbonate de chaux, 14 p. 100 de carbonate de potasse, 11,5 p. 100 de carbonate de magnésie, 6,4 p. 100 de chlorure de sodium.

à coup sûr absolument saturée d'eau d'une façon constante et ce qui les aurait amenées à remonter ensuite ; mais nous dirons bientôt que l'étude des sources thermales force à admettre, malgré une première répugnance instinctive, une circulation souterraine des eaux dans de larges vides béants, comparables par leurs dimensions à ceux qui, remplis par des eaux métallisantes, ont constitué autrefois les filons : en sorte que les eaux, parcourant ces vides, conservent, même au milieu d'une zone entièrement imbibée, une complète individualité et peuvent être presque considérées comme se déplaçant dans l'intérieur d'un tuyau courbe, partant de la surface pour y revenir.

De même, les substances minérales apportées au jour par les sources thermales se retrouvent généralement dans les terrains que l'eau a dû traverser en remontant de la profondeur après s'y être échauffée et, malgré l'ignorance où nous restons forcément du parcours réellement accompli dans l'écorce terrestre, on n'a aucun mal le plus souvent à retrouver l'origine première des alcalis, de la chaux, de la magnésie ou du fer, non plus que du chlore, du soufre et du nitre, qui entrent dans leur composition ordinaire.

Des variations progressives, généralement très lentes, dans la minéralisation peuvent être, comme nous le verrons, la conséquence de ce lessivage, exercé constamment sur le même circuit.

En ce qui concerne pourtant la minéralisation, nous croyons qu'il y a lieu de faire intervenir, dans certains cas très particuliers, une action volcanique plus ou moins ancienne, entendue au reste comme nous le disions plus haut. De même que le volcanisme facilite, dans une région, la multiplicité des sources thermales, en produisant des terrains plus chauds, où l'eau a besoin de descendre moins profondément pour atteindre la même température, il semble également fournir certains produits spéciaux, tels que l'acide carbonique, évidemment d'une abondance anormale à la périphérie des anciens volcans d'Auvergne ou de Bohême et, par suite, remarquablement fréquent dans toutes les eaux qui viennent y sourdre par des fissures tant soit peu profondes du sol.

Une explication du même genre doit probablement être invoquée aussi pour les hydrocarbures dégagés par certaines salses et M. Fouqué a même remarqué qu'il y avait série continue, depuis l'hydrogène pur, constaté par lui dans des coulées de laves sous-

marines de Santorin, jusqu'aux hydrocarbures saturés en carbone de nombre de gites pétrolifères ¹.

Peut-être aussi, l'acide borique abondant, les sulfures d'arsenic et divers corps plus rares rencontrés dans quelques sources thermales de districts éruptifs, et presque exclusivement dans ces sources, ont-ils une origine du même genre.

Enfin, quoique la question soit beaucoup plus douteuse dans ce cas, on peut se demander si, dans les districts volcaniques, où les eaux amènent parfois au jour une telle abondance de soufre et de chlore ², ces deux métalloïdes ne viennent pas, en partie, d'une réserve profonde, à laquelle pourraient être empruntés également les métaux proprement dits, le carbone, le bore, l'arsenic, etc.

Le fait que tous ces éléments, chlore, soufre, bore, etc., existent aujourd'hui en quantités considérables dans l'eau de mer et même dans beaucoup d'eaux douces, le fait également que des évaporations de lagunes anciennes en ont amoncelé, dans certaines parties du sol, des amas énormes, que les eaux peuvent lessiver souterrainement et apporter dans des sources sans rapport aucun avec le volcanisme, ne prouve nullement que les fumerolles éruptives puisent exclusivement ces sels dans la mer, les lacs ou des dépôts préexistants et que ces sels concentrés dans la mer ne soient pas, au contraire, le produit accumulé d'anciennes fumerolles. Nous nous contentons d'indiquer ici le problème, dont la solution ne nous paraît pas abordable dans l'état actuel de nos connaissances; mais c'est peut-être un point, sur lequel il serait dangereux d'exagérer le rôle des actions purement superficielles, auxquelles nous attribuons une influence presque exclusive dans toute la suite de cet ouvrage.

En tout cas, nous croyons qu'il convient de restreindre cette hypothèse d'une origine profonde aux métaux et métalloïdes réducteurs énumérés plus haut, qui, d'après toutes les observations, semblent former le noyau de notre planète, en excluant, au contraire, l'oxygène et tous les oxydes, très probablement localisés à la surface du globe, depuis la première séparation qui a dû se faire, au début des temps, sur sa masse encore fluide. De la sorte, l'eau

¹ Le carbone des mofettes carboniques et des hydrocarbures dégagés par les volcans pourrait alors venir originairement des bains de fonte métallique, qu'on a supposés en profondeur dans la terre, sous l'écorce silicatée superficielle.

² BOUSSINGAULT a calculé qu'une source thermale des Andes, le Rio Vinagre, produisait, par an, 15 000 tonnes d'acide sulfurique et autant d'acide chlorhydrique.

des éruptions volcaniques peut résulter d'infiltrations superficielles, tout en contribuant à ramener au jour des éléments volatils, peut-être émanés de la profondeur.

C'est dans cette mesure qu'il y a lieu, à notre avis, de rattacher certaines sources thermales au volcanisme.

L'observation montre que les hydrocarbures et les chlorures, par exemple, se présentent abondamment, avec la vapeur d'eau, dans les émanations volcaniques ; il est tout naturel, quand on rencontre les mêmes principes dans une source chaude au voisinage immédiat du volcan, d'établir une connexion entre les deux faits et nous croyons même, ainsi que nous l'avons dit dans un travail précédent¹, que les métaux lourds et à sels peu solubles, caractéristiques des filons métallifères, n'ont pu arriver dans les filons qu'à la faveur d'une intervention éruptive semblable, la roche fondue les ayant d'abord fournis aux eaux thermales sous forme de fumerolles chlorurées ou sulfurées, susceptibles d'entrer aisément en dissolution. Mais, comme nous venons de le dire, si l'origine première de ces métaux apportés par la roche éruptive nous semble profonde, l'eau, qui détermine l'explosion volcanique et l'ascension des magmas ignés avec les métaux inclus, nous paraît venir de la surface : ce qui nous dispense d'exposer, pour les sources des zones volcaniques, une théorie réellement distincte.

En résumé, si nous cherchons à concevoir l'origine des sources thermales, nous avons à résoudre successivement les deux problèmes suivants, qui dominent toute cette étude et que nous allons examiner tour à tour :

1° D'où vient l'eau et comment pénètre-t-elle en profondeur. (*Origine des eaux thermales*, examinée dans la deuxième partie, ch. I et II.)

2° Pourquoi, d'une façon absolue, remonte-t-elle à la surface ? et quels motifs déterminent son émergence, c'est-à-dire la position de son griffon ? (*Émergence des eaux thermales*, étudiée dans la troisième partie, ch. I à IV.)

La solution adoptée pour ces deux questions nous permettra alors, dans une série de chapitres ultérieurs, d'étudier les diverses propriétés des sources thermales, en en cherchant aussitôt l'explication :

1° *Minéralisation des sources thermales* (principes salins et gaz) ;

origine de cette minéralisation ; produits déposés par les sources ; phénomènes de métamorphisme exercés par la circulation des sources, variations progressives dans la composition, etc. (quatrième partie, ch. i) ;

2° *Température des sources thermales* et causes de cette température (quatrième partie, ch. ii) ;

3° *Débit des sources thermales* : ses variations et leurs causes, sources intermittentes, geysers. influence des tremblements de terre et de la pression barométrique, etc. (quatrième partie, ch. iii) ;

4° *Propriétés accessoires des sources thermales* limpidité, opacité, électricité ; plantes, animaux, microbes, etc. (quatrième partie, ch. iv).

CHAPITRE PREMIER

PROVENANCE ORIGINELLE DE L'EAU THERMALE. — CAUSES DE SA PÉNÉTRATION EN PROFONDEUR. — ALLURE PRÉSUMÉE DES FISSURES SERVANT A CETTE PÉNÉTRATION ET A LA REMONTÉE. — PROFONDEUR MAXIMA PROBABLE DES PÉNÉTRATIONS HYDROTHERMALES ET DES FILONS D'INCRUSTATION ANCIENS.

Il convient, avant tout, de se représenter, d'une façon un peu précise, comment et sous quelles forces s'opère, en général, la circulation et spécialement la pénétration des eaux dans la terre. Les conclusions, auxquelles nous allons arriver, par une suite de raisonnements peut-être un peu compliqués et ardu, nous serviront, à diverses reprises, dans la suite.

L'eau provenant, soit de la chute des pluies ou de la condensation des brouillards, soit de la fusion des neiges, soit même du passage de cours d'eau déjà formés sur un sol perméable, a, par suite de la gravité, une tendance constante à descendre, à s'infiltrer dans le sol, en profitant de tous les vides, interstices, fissures ou joints de schistosité qu'elle rencontre.

A cette première force, la *gravité*, qu'il serait superflu de définir et qui résulte directement de l'attraction de la masse terrestre, peut, dans certains cas, et indépendamment même de toutes fissures, s'en ajouter une autre, sur laquelle nous allons, au contraire, donner quelques détails, car on est souvent porté à en méconnaître l'importance, c'est la *capillarité*.

Quand nous nous occuperons de la remontée des eaux souterraines, nous pourrons également retrouver la capillarité à l'œuvre, de concert avec la *pression hydrostatique* et avec la *force expansive des gaz ou de la vapeur d'eau*.

La capillarité résulte de l'attraction intra-moléculaire exercée sur l'eau par les molécules matérielles du corps, attraction qui a pour effet de les faire pénétrer dans les vides compris entre ces molécules.

Diverses expériences connues montrent son intensité dans les corps poreux. C'est ainsi que l'on peut, dans une matière poreuse bien desséchée, creuser un trou cylindrique et sceller sur ce trou un tube manométrique droit, fermé en haut, rempli d'air et contenant, à sa base, un index de mercure. Si l'on plonge la matière poreuse dans l'eau, cette eau, attirée par la capillarité, vient exercer, sur l'index de mercure, une pression, qui la fait remonter dans le tube et comprime l'air au-dessus jusqu'à trois et quatre atmosphères.

Inversement, si l'on met la substance poreuse au-dessus d'un réservoir fermé rempli d'eau, en faisant communiquer avec ce réservoir un trou creusé dans le corps poreux, l'eau est attirée peu à peu du réservoir, où le vide finit par être complet.

Dans un cylindre poreux, vertical, indéfini, l'eau s'élève à plus de 10^m,33, plus haut qu'elle ne le ferait par la pression atmosphérique et, si on la laisse s'évaporer en haut, elle se renouvelle constamment ¹

Une fois l'eau pénétrée dans le corps poreux, la même force capillaire, qui l'y avait attirée, a pour effet connexe de l'y retenir et cela avec une intensité qui croît, d'une façon remarquablement rapide, à mesure que la roche devient plus compacte.

Dans un simple vase poreux de pile, on a constaté que la capillarité pouvait atteindre trois ou quatre atmosphères. D'une façon générale, elle paraît s'élever proportionnellement à $\frac{1}{D^5}$. D représentant le diamètre des vides, qui diminue lui-même très vite quand on passe, par exemple, d'un calcaire à un silex ²

La conséquence est la présence, dans toutes les roches, en profondeur, d'une certaine quantité d'eau, dite eau de carrière, dont la proportion peut varier de la manière suivante, d'après Delesse ³ :

Argile des meulières de Meudon	24,48 p. 100.
Calcaire grossier à milliolites.	23,35 —

JAMIN et BOUTY. *Physique*, t. I, 2^e fascicule, p. 65, 1881.

² Pour les calculs de capillarité, on assimile une surface liquide à une membrane tendue, en se fondant sur ce que, si l'on comprime un ménisque capillaire de mercure ou une goutte du même métal posée sur un plan de verre, les surfaces résistent à la déformation comme un ballon gonflé d'air. C'est ce que l'on appelle la tension superficielle, tension indépendante de l'épaisseur des parois des tubes et dépendant seulement de la nature des surfaces en contact, au point précis où s'arrête le liquide et du diamètre du tube dans la région infiniment voisine. Elle est due à l'attraction entre les molécules liquides d'une part, et, de l'autre, entre celles-ci et la paroi.

³ Cf. sur l'eau de carrière : DAUBRÉE : *Eaux souterraines*, I, 4.

Silex meulière	1,12 p. 100
Granite à gros grains de Semur.	0,37 —
Quartz en filons.	0,08 —

Partout où cette eau de carrière se trouve immobilisée en permanence dans les terrains, comme c'est le fait habituel au-dessous de ce que nous appellerons le niveau hydrostatique, on n'a pas à en tenir compte ; mais la capillarité intervient, au contraire, dès qu'il y a circulation d'eau dans une strate perméable, entre les grains d'une roche, ou par de très minces fissures, comme cela peut se produire, même au-dessous du niveau hydrostatique, dans des cas, il est vrai exceptionnels, mais qui sont précisément d'un intérêt spécial pour les sources thermales.

La capillarité exerce alors son action, dans un sens qui se trouve déterminé par la différence des sections extrêmes des filets capillaires (expérience bien connue du mouvement des liquides dans un tube conique). Elle joue, en outre, un rôle notable aux deux points extrêmes dont soit susceptible un circuit souterrain, aux points d'infiltration superficiels et au contact de magmas ignés :

1° A la surface, où l'assèchement des roches par le soleil a pour effet : d'une part, une pénétration capillaire des eaux de pluie tombant sur ces roches asséchées et, inversement, quand le soleil chauffe, une aspiration des eaux profondes, venant, à travers ces roches, remplacer celles qui s'évaporent peu à peu ;

2° En profondeur, au voisinage de magmas ignés, qui peuvent exercer une action de dessiccation, en fixant une partie de l'oxygène des eaux sur leurs éléments réducteurs. M. Daubrée, par une expérience classique ¹, a fait voir comment l'action capillaire pouvait, dans ce cas, amener un renouvellement d'eau au contact de ce magma igné, malgré une contre-pression de plusieurs atmosphères et en a tiré des conclusions au point de vue du volcanisme, en levant une objection de Gay-Lussac, qui avait signalé la difficulté, pour l'eau, de pénétrer jusqu'à un magma igné par des fissures ouvertes, en raison de la contre-pression, qui ne manquerait pas de se produire par la vaporisation des premières eaux infiltrées.

Par suite des forces combinées de la gravité et de la capillarité,

DAUBRÉE, *Géol. expérim.*, p. 235 à 246. *Eaux souterr.*, II, 214. On pourrait également invoquer le cas de l'injecteur Giffard, permettant d'alimenter d'eau une chaudière en pression.

l'eau pénètre dans le sol et s'y enfonce; elle le fait, en principe (et sauf des exceptions dont nous parlerons), tant qu'elle rencontre des vides au-dessous d'elle; mais, en dehors même de l'observation courante, qui nous montre, de tous côtés, l'eau ressortant à la superficie, il est bien évident à priori qu'elle ne peut descendre indéfiniment dans la terre.

Cela résulte, en particulier, de ce fait d'expérience que, dans tous les travaux profonds, mines, tunnels, tranchées, etc., on trouve, au-dessous d'un certain niveau, appelé le *niveau hydrostatique*¹, une imprégnation d'eau fixe, permanente, sans écoulement naturel dans aucun sens et n'ayant, tant qu'on ne vient pas la troubler par ces travaux, aucune tendance à descendre ni à remonter: imprégnation qui ne laisse, par suite, à l'eau en mouvement nul vide où elle puisse pénétrer.

Ce niveau, ou surface hydrostatique, offre, dans son ensemble, une image en raccourci de la surface topographique extérieure, image d'autant plus compliquée que les précipitations aqueuses superficielles ne donnent pas à l'équilibre théorique le temps de s'établir et que la présence de couches étanches ou de vides dans le sol a, sur le régime des eaux, une influence immédiate²: il se relève sous les montagnes et va se raccorder par une pente con-

Il ne faut pas, bien entendu, envisager cette surface hydrostatique comme celle d'une sorte de rivière, ou de nappe d'eau continue, que l'on devrait trouver dans la terre: les masses de rochers compacts, situées au-dessous de ce niveau, sont simplement imbibées de leur eau de carrière habituelle. Mais cela veut dire qu'il ne peut y exister de vides sans qu'ils soient remplis d'eau, par l'effet même de la pression hydrostatique (principe des vases communicants), tandis qu'au-dessus de ce niveau de semblables vides béants peuvent parfaitement exister. Par exemple, quand on abandonne une mine et qu'on y cesse l'épuisement, elle se remplit entièrement d'eau (puits et galeries) jusqu'à ce niveau hydrostatique, qui prend alors la forme d'une nappe d'eau réelle plus ou moins continue.

Le niveau hydrostatique est le lieu des points, où la charge hydrostatique est nulle. Cette charge hydrostatique, en un point quelconque d'une masse d'eau souterraine, peut se constater pratiquement en descendant, jusqu'à ce point, un tuyau vertical, qui débouche librement à la surface (ainsi qu'on se trouve le faire en forant un puits artésien). Le niveau d'équilibre, que prendra l'eau dans ce tube, sera le niveau hydrostatique et la colonne d'eau, comprise entre ce niveau et le point considéré, mesurera la charge en ce point.

Une source thermale remonte à la surface et parfois y jaillit, en vertu d'une certaine charge hydrostatique, qui dépend, tant de la pression de la colonne d'eau descendante depuis la région d'infiltration (vases communicants), que des gaz, tels que l'acide carbonique, emprisonnés. On peut, par la même méthode, mesurer au griffon cette charge hydrostatique, dont il est souvent très intéressant d'examiner les variations sous des influences diverses.

²Cette forme compliquée tient surtout à ce que le renouvellement, constamment variable, des infiltrations superficielles ne laisse pas l'équilibre général s'établir en se réglant sur le niveau de la mer; mais l'attraction capillaire joue également un rôle dans les masses continentales.

tinue avec les thalwegs des vallées, qui forment des lignes de drainage naturelles, ainsi qu'avec le niveau de la mer, plan d'équilibre et de drainage général, au-dessous duquel il ne peut exister, en principe, de vides non saturés d'eau, sans qu'il s'y produise immédiatement un afflux de toutes les eaux avoisinantes.

Il sépare, en résumé, comme son nom l'indique, les eaux permanentes et immobiles, soumises aux simples lois de l'hydrostatique, des eaux en mouvement constant, régies par les formules plus compliquées de l'hydrodynamique, où interviennent les frottements et les pertes de charge dues à la vitesse.

Un filet d'eau quelconque, pénétrant dans le sol, rencontre donc, à une profondeur le plus souvent assez faible, cette zone hydro-

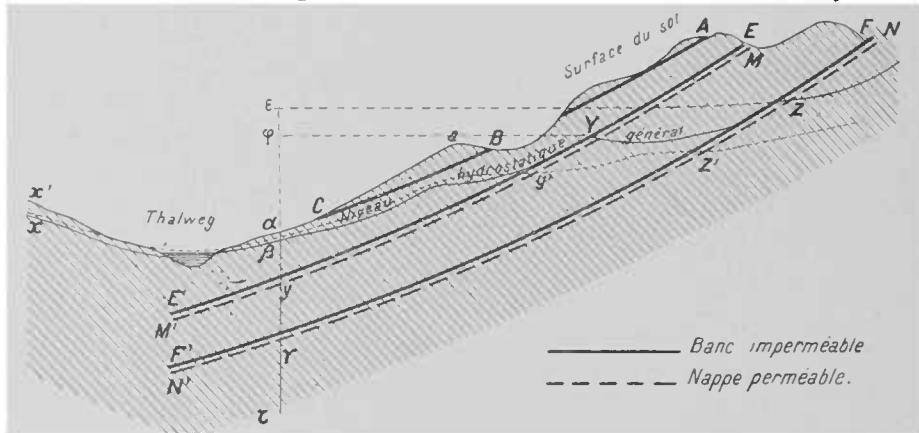


Fig. 1. — Coupe théorique, montrant l'influence de l'orographie superficielle et de l'allure géologique des bancs perméables et imperméables sur la disposition du niveau hydrostatique.

tatique, où tous les vides et interstices sont déjà remplis d'eau et, sauf dans un cas exceptionnel, qui est précisément celui des sources artésiennes, vaclusiennes et thermales, cas assimilable à celui d'un tuyau courbe traversant cette zone et en restant indépendant, il est manifeste que la surface hydrostatique représentera le maximum de pénétration ordinairement possible pour les venues d'eau superficielles, qui ne pourront que s'accumuler en profondeur, ou ressortir au jour au-dessus de ce niveau XYZ (fig. 1).

Ce niveau hydrostatique n'est même pas nécessairement atteint ; l'eau peut, en effet, trouver auparavant, dans sa descente, une couche étanche et impénétrable ABC¹, telle qu'un lit d'argile, de

Théoriquement, il n'existe pas à proprement parler de *roche imperméable* à

schiste ou de quartz et alors elle suit cette couche suivant sa pente pour venir sortir en source à son affleurement le plus bas, c'est-à-dire en C, si elle s'est infiltrée en a.

Il peut également arriver par un fait plus exceptionnel, qui se présente au voisinage des volcans, que l'eau, à peine entrée dans le sol, s'y vaporise par la chaleur des roches et remonte aussitôt¹.

L'eau ; car, si on suppose la plus résistante de toutes, silex ou basalte, préalablement asséchée, elle absorbera, comme nous l'avons vu, par capillarité une certaine proportion de l'eau, avec laquelle on la mettra en contact et, malgré cette capillarité, on pourra, par une pression suffisante, forcer cette eau à ne faire que traverser la roche, comme elle ferait pour un filtre en gravier et comme on le réalise tous les jours dans l'application bien connue des filtres Pasteur.

Mais, pratiquement, quand un banc d'argile ou de silex a absorbé ce qu'il peut contenir d'eau, cette eau n'en sort plus et aucune circulation ne se produit à travers lui. Nous avons vu, en effet, qu'il faudrait, dans ce cas, des pressions énormes pour triompher de la capillarité.

On peut se demander dans quelle mesure et dans quelles conditions la vaporisation de l'eau, pénétrant en profondeur dans la terre pour remonter ensuite sous forme de source thermale, se produira, par l'effet de la chaleur interne, malgré la pression de la colonne d'eau qui la suit et qui lui est superposée ; c'est un problème intéressant, dont nous allons essayer de donner sommairement la solution.

Nous ne sommes pas ici, comme on le croirait tout d'abord, dans le cas d'un filet d'eau, tombant dans un récipient ouvert et porté à une température croissant de haut en bas jusqu'à plusieurs centaines de degrés et nous ne pouvons admettre, en raison de l'étroitesse ordinaire des fissures terrestres, par lesquelles se font ces infiltrations, que les gouttes d'eau se séparent les unes des autres et perdent leur solidarité, ainsi qu'elles le feraient en tombant d'une certaine hauteur dans l'air. Ici, nous devons supposer un filet d'eau continu, descendant dans un tube vertical, pratiquement illimité en profondeur et chauffé par un foyer situé à sa base, de telle sorte que la température s'accroisse en raison de cette profondeur.

On peut, d'autre part, admettre que, malgré l'étroitesse de ce tube, les pressions se propagent d'un bout à l'autre de la colonne, puisqu'en réalité la pression à la base a pour effet la remontée de l'eau jusqu'au griffon de la source thermale. Voici comment se présente le calcul :

Il résulte, on le sait, d'un très grand nombre d'observations que, dans les régions où les phénomènes volcaniques ne jouent aucun rôle, la température s'accroît en profondeur dans le sol, au moins jusqu'à quelques kilomètres de la surface, d'environ un degré par 30 ou 35 mètres de dénivellation. La profondeur dont il faut s'enfoncer pour observer une élévation de température de un degré étant appelée le *degré géothermique*, on a seulement constaté que ce degré géothermique avait une légère tendance à s'accroître en profondeur.

En supposant donc que la température moyenne à la surface soit de 10° et appelant x la profondeur d'un point considéré, évaluée en mètres, la température y est approximativement $10 + \frac{x}{33}$. Si l'eau n'avait pas, en s'enfonçant, à supporter la pression de plus en plus forte de la colonne d'eau qui la surmonte jusqu'à la surface, il suffirait d'égaliser à 100° cette expression pour obtenir la profondeur à laquelle elle se vaporiserait. Mais, en réalité, comme nous allons le voir, la tension de vaporisation ne s'élève pas assez vite avec la profondeur, qui accroît d'autre part la pression, pour que, jusqu'à la température critique, cette vaporisation puisse avoir lieu.

Si, en effet, on cherche la tension de la vapeur d'eau dans notre tube vertical à une profondeur quelconque, cette tension, F, évaluée en millimètres de mercure,

Enfin, l'eau descendante peut encore se heurter à la pression inverse d'un filet d'eau remontant, ou d'un jet de vapeur provenant d'autres infiltrations; et l'on observe souvent, par un phénomène de ce genre, qu'au voisinage de leur émergence les sources thermales se trouvent drainer, surtout si l'on y adapte des pompes d'épuisement, une certaine proportion d'eau douce, à peine descendue dans le sol, qu'elles entraînent immédiatement dans leur remontée.

De toute manière, l'eau qui circule dans le sol, au-dessus ou, exceptionnellement, au-dessous du niveau hydrostatique, obéit, en quelque sorte, à l'appel des vides existant à sa portée, dans le sens

sera, d'après les formules de Regnault et en tenant compte de la relation précédente qui rattache la température t à la profondeur x :

$$F = a\alpha \frac{t + 20}{1 + m(t + 20)} \quad t = 10 + \frac{x}{35} \quad F = a\alpha \frac{1050 + x}{35 + m(1050 + x)}$$

$$m = 0,00478; \log a = 1,9500 : \log \alpha = 0,0383$$

Or, à cette profondeur x , la pression en millimètres de mercure sera, en supposant, dans une première approximation, la densité de l'eau constante du haut en bas malgré l'échauffement progressif : $\frac{1000 x}{13,56}$

Pour que l'eau se vaporise, il faudrait que la tension de vapeur fût égale à la pression :

$$a\alpha \frac{1050 + x}{35 + m(1050 + x)} = \frac{1000 x}{13,56}$$

Sans résoudre cette équation, on obtient, pour des valeurs croissantes de t et de x , les valeurs correspondantes de la pression et de la tension de vapeur, indiquées dans le tableau suivant

PROFONDEUR EN MÈTRES. ou pression en mètres d'eau. x	TENSION MAXIMA en mètres d'eau. $\frac{F \times 13,56}{1000}$	TEMPÉRATURE t
3 150	40,33	100°
4 900	48,55	150°
7 700	283,75	230°
12 600	2 019	370°

} D'après Regnault.
} D'après O. Strauss.
(*Journal de la Société de physique russe, 1882*).

Dans ce tableau, il est vrai, les colonnes d'eau, qui évaluent pression et tension, ne sont pas exactement comparables, puisque la première comprend de l'eau à des températures croissantes de 0 à 370°, tandis que, dans la seconde, l'eau est supposée uniformément à 4° : ce qui diminue relativement le poids de la première; mais il est facile de se rendre compte que, même en introduisant cette correction, la conclusion n'en peut être modifiée. En effet, de 4° à 100°, la densité de l'eau passe seulement de 1 à 0,959; ses variations, dans la suite, continuent à être très faibles, tandis qu'il faudrait supposer la densité tombant à 0,160 pour obtenir la vaporisation à 370°, en admettant même que le degré géothermique reste de 35 mètres jusqu'à

où la force qui la régit — soit la pesanteur, soit la pression hydrostatique — la pousse à se précipiter et, comme elle le fait dans la direction du minimum d'effort, en choisissant nécessairement la voie la plus facile et la moins retardée par les frottements (suivant laquelle les molécules d'eau peuvent se succéder à intervalles plus rapprochés et en plus grand nombre, puisqu'elles s'écoulent plus vite), un vide d'une certaine dimension, — tel, par exemple, qu'une vallée, un tunnel ou une simple conduite à proximité, — produit ce que l'on appelle un *drainage*, en amenant toutes les eaux des terrains avoisinants à s'y précipiter.

C'est pourquoi la surface hydrostatique XYZ va, comme nous

12 000 mètres de profondeur, bien qu'en réalité il paraisse devenir de plus en plus élevé.

La conclusion est donc que, pratiquement, la vaporisation ne peut avoir lieu jusqu'à cette température de 370°, qui est, pour l'eau, la température critique : ceci en laissant de côté, bien entendu, les régions volcaniques, où la surface même peut se trouver portée à 100° et en négligeant les phénomènes geysériens, où une tranche d'eau, brusquement soulevée par un jet de gaz internes et de vapeurs, subit, de ce fait, sans abaissement de température, une diminution de pression, qui l'amène à se vaporiser. On sait, en effet, que, dans le grand geyser d'Islande, à 8^m,40 de profondeur, la température est déjà de 110°, la température nécessaire à l'ébullition sous cette pression étant seulement de 116°.

Au delà de 370°, les conditions se modifient : l'eau atteint son point critique, où la vaporisation n'est plus accompagnée d'un changement du volume, c'est-à-dire qu'il n'y a plus à parler d'une tension de vapeur indépendante du volume, mais que l'eau se comporte comme un gaz ou une vapeur surchauffée, soumise à une fonction continue $f(p, v, t) = 0$, dont la formule

$$\frac{pv}{1 + \alpha t} = \text{Const.}$$

est une forme simplifiée.

Cette forme spéciale de vapeur ne fait plus que se comprimer de plus en plus, à mesure que la profondeur s'accroît, puisqu'il en résulte à la fois une augmentation de la pression et de la température.

Il y a cependant un cas, où la vaporisation pourrait se produire, c'est celui où l'eau se trouverait arriver au contact d'une paroi poreuse, derrière laquelle il existerait un vide chauffé par une roche incandescente. L'eau, pénétrant alors par capillarité dans ce vide, y parviendrait en gouttelettes isolées, qui pourraient se vaporiser et la pression de vapeur interne, qui en résulterait, n'empêcherait pas la pénétration de continuer par capillarité, puisque l'eau située au-dessus de la paroi est soumise, nous l'avons vu, à la pression d'une colonne d'eau considérable.

Mais ce n'est là qu'un phénomène accessoire ; au contraire, supposons maintenant une fissure latérale, ouverte en un point quelconque de cette colonne verticale descendante, au-dessous des 3450 mètres qui correspondent environ à 100° : l'eau, par l'effet de la pression hydrostatique, tendra à y remonter et là, si elle ne rencontre pas des infiltrations d'eau froide descendues par la fissure même, ou si elle-même n'a pas déjà rempli en s'élevant cette colonne ascendante, elle n'aura plus de pression à supporter ; en tout cas, cette pression pourra être beaucoup plus faible, si la fissure aboutit en un point de la surface topographiquement moins élevé, comme on doit toujours l'admettre pour les sources thermales. Il pourra donc, dans la remontée, mais non dans la descente, se produire une vaporisation partielle de l'eau, qui contribuera, plus ou moins, à faciliter son ascension.

Etant donné le relief de la terre, à la profondeur que nous devons supposer pour cette vaporisation, on est toujours au-dessous du niveau hydrostatique.

venons de le dire, se raccorder, par une courbe continue, avec le niveau des océans, ou avec le thalweg des fleuves; au voisinage des uns comme des autres, le sol est généralement imprégné d'eau, qui, même auprès de la mer, est de l'eau douce. En effet, cette eau ne vient pas, comme on le croit parfois, d'une infiltration de la nappe liquide voisine; elle y descend, au contraire, pour la maintenir à son niveau en l'alimentant et c'est seulement grâce à sa présence que la rivière peut continuer à couler à niveau plein. Si, pour une cause quelconque, celle-ci se trouvait arriver sur un sol asséché (calcaire crevassé ou sable meuble), au lieu de couler à la surface, elle pénétrerait dans ce sol et s'y perdrait.

Et il en résulte que, suivant que la quantité d'eau apportée au thalweg, est inférieure ou supérieure à celle écoulee par lui, le niveau hydrostatique des eaux permanentes peut s'élever ou s'abaisser.

C'est pourquoi aussi, nous le rappelions à l'instant, tout travail souterrain est exposé à des venues d'eau, qui peuvent être seulement temporaires et vite asséchées au-dessus du niveau hydrostatique, mais qui, au-dessous, deviennent incessantes, tant que la quantité d'eau enlevée par des moyens d'épuisement artificiels n'est pas égale ou supérieure à celle que les fissures du terrain peuvent débiter, dans le même temps, vers ce canal de drainage.

Au-dessus de la zone hydrostatique, l'eau est à l'état de mouvement perpétuel et se renouvelle sans fin; elle n'est plus que le simple *passage* d'infiltrations superficielles, qui se dirigent, par la voie la plus courte, vers la ligne de drainage la plus rapidement accessible, et l'existence continue de ces infiltrations superficielles est naturellement nécessaire pour que ce passage lui-même ait lieu: si elles cessent ou diminuent pendant une période de sécheresse, au bout d'un temps plus ou moins long, le mouvement de ces eaux superficielles, qui alimentent les puits, sources, etc., finit par se tarir¹.

Nous avons insisté ailleurs² longuement sur l'importance capitale que présente l'observation de ces deux zones si distinctes, l'une au-dessus, l'autre au-dessous du niveau hydrostatique, pour les

On a souvent appelé ces filets d'eau en mouvement des *nappes d'infiltration*; nous nous abstenons d'employer, dans ce cas, le mot *nappe*, qui généralise beaucoup trop, à notre avis, un fait exceptionnel et semble attribuer à la disposition des veines aquifères souterraines une régularité et une continuité qu'elles sont loin de présenter.

Loc. cit. (*Ann. des Mines*, août 1897).

gîtes métallifères et sur les modifications notables qui se produisent dans la composition de ces gîtes, lorsque l'on passe de l'une à l'autre.

Revenons maintenant sur le cas, essentiel pour notre sujet, où l'eau en mouvement parvient, grâce à des circonstances spéciales que nous allons examiner, à pénétrer dans la zone hydrostatique permanente et se trouve donc descendre à une profondeur beaucoup plus grande que dans l'hypothèse ordinaire. La température du sol s'accroissant avec la profondeur, on voit, immédiatement et sans autre explication, que cette eau pourra s'échauffer et produire, en revenant au jour, des sources thermales. Ce fait se présente, en particulier, comme le montre la figure 1, lorsqu'un banc imperméable EE' ou FF' (nappe d'argile, banc de silex, filon de quartz, etc.), se trouve maintenir, au-dessous de lui, sous pression, les eaux qui ont pu s'infiltrer aux affleurements d'une strate poreuse, telle que MM' ou NN' et les *individualise*, en quelque sorte, en les empêchant de prendre, dans le sol, la position qu'exigerait l'équilibre général.

Un pareil banc imperméable a pour effet d'établir une différence de pression sensible entre les eaux situées au-dessus et au-dessous. Si nous prenons, en effet, le point y , la pression en y , sous la nappe d'argile EE' , résulte de la colonne d'eau allant, au minimum, depuis y jusqu'au point Y , où la strate MM' rencontre la surface hydrostatique et cesse, par conséquent, d'être imprégnée d'eau à l'état constant; elle est donc, au minimum, $y\varphi$. Au-dessus, au contraire, elle est simplement $y\beta$, pression de la colonne verticale montant jusqu'au niveau hydrostatique β , ou $y\alpha$, quand la portion $\beta\alpha$ est momentanément remplie d'eau. Entre les deux parois de la couche argileuse, il existe donc une différence de pression $\beta\varphi$.

La présence de ces strates argileuses aura, en outre, pour résultat de relever, au-dessous d'elles, le niveau hydrostatique dans les strates poreuses avec les inflexions XYZ , au lieu de la forme plus continue $x'y'Z'$, qu'il prendrait dans un terrain tout à fait homogène.

Que se passera-t-il alors, si les choses sont laissées à elles-mêmes et si aucune fissure partant du jour ne vient recouper la nappe d'eau MM' ? Deux cas peuvent se présenter :

Ou bien, 1° la nappe MM' , ainsi individualisée par son enveloppe d'argile, a d'autres affleurements que M ; alors il peut s'établir un mouvement continu de l'affleurement le plus élevé vers le plus

bas, produisant, après un trajet souterrain en siphon, sur cet affleurement, des sources pérennes à alimentation profonde.

Il y a alors *circulation* le long de cette nappe, bien qu'elle soit au milieu d'une zone d'eau *permanente* et l'eau, qui ne fait qu'y passer, obéit aux lois de l'hydrodynamique, comme celle qui alimente une source superficielle quelconque ;

Ou bien, 2° la strate poreuse plonge, au contraire, d'une façon constante vers la profondeur, sans rencontrer la superficie; elle passe alors aussitôt sous la surface hydrostatique et se comporte à la façon d'un vase plein, à l'orifice duquel on ne peut verser d'eau, sans que celle-ci déborde immédiatement : il n'y a plus circulation, mais seulement relèvement notable de la surface hydrostatique, le long de cette nappe, qui représente une imprégnation permanente.

Néanmoins, dans ce cas, comme dans le précédent, l'eau, qui se trouve dans la profondeur du vase, y est sous pression et, quand une fissure quelconque, artificielle ou naturelle, partant d'un point de la surface moins élevé que l'affleurement et jouant le rôle d'un tube piézométrique, vient crever la paroi de ce vase, cette eau y jaillit aussitôt, en apportant à la superficie la température correspondant à la profondeur qu'elle a atteinte.

Tel est le cas bien connu des sources artésiennes ; tel nous paraît être également celui des sources thermales.

Mais, pour ces dernières tout au moins, on peut encore faire une autre hypothèse, c'est celle d'un système de fissures largement ouvertes, produisant la rapide pénétration des eaux en profondeur et jouant le même rôle d'individualisation au milieu de la zone hydrostatique, que nous comparions d'abord théoriquement à celui d'un tuyau courbe plongé dans une nappe d'eau et que nous avons attribué tout à l'heure, plus pratiquement, à une couche d'argile imperméable.

Notamment, dans les pays de montagne très disloqués, une pareille influence semble trouver à s'exercer jusqu'à des profondeurs considérables ; quant à la remontée, elle se fait toujours, de même que dans la première hypothèse, par une large fente verticale.

Dans les régions calcaires, un circuit continu de larges fissures analogues, produisant la descente d'une partie des eaux superficielles au-dessous de la zone hydrostatique, détermine la catégorie des sources dites vaclusiennes.

Dans tout ce que nous venons de dire, on remarquera qu'il ne s'agit pas ici de phénomènes se produisant librement au milieu

d'un espace illimité et dans un temps indéfini, où, par suite, les formes d'équilibre théoriques ont toujours la possibilité de s'établir et peuvent se calculer d'avance par l'algèbre. Ici, au contraire, le facteur *Temps* joue un rôle tout à fait prédominant : une eau, qui s'écoule, est assimilable à une foule cherchant à sortir d'un édifice public, ou d'un théâtre ; sa sortie logique n'est point forcément l'issue la plus proche du point où elle se trouve ; il faut, avant tout, qu'un chemin libre y conduise ; mais, tandis que la foule s'accumulera parfois stupidement devant une porte fermée, le fluide gagne toujours, par la loi naturelle de son écoulement même, l'orifice qu'il pourra atteindre sans obstacle à l'instant considéré, quand bien même cet orifice serait géométriquement plus éloigné qu'un autre, vers lequel il aurait seulement accès par des fissures étroites, ou déjà remplies d'eau.

D'où l'influence essentielle, pour la circulation des eaux souterraines, des grands vides naturels ou artificiels, qui peuvent se présenter, soit à la surface, ou dans son voisinage immédiat, soit plus rarement dans la profondeur de l'écorce et qui créent aussitôt une attraction infiniment supérieure à celle des minces interstices, par lesquels ces eaux sont, en général, réduites à passer.

A la surface, nous n'avons pas besoin de remarquer, en précisant une observation précédente, qu'une grande partie de l'eau tombée en pluie s'écoule directement par les ravins ou vallées, sans avoir le temps de pénétrer dans le sol, quand bien même celui-ci serait très loin d'être saturé.

En profondeur, la formation d'un vide de grande dimension change aussitôt le régime de toute la partie avoisinante et, surtout s'il est assez vaste pour ne pouvoir jamais être comblé par l'eau qui s'écoule au fur et à mesure, ainsi que cela se présente pour un tunnel de chemin de fer ou pour une mine, il joue alors le même rôle que la surface topographique extérieure en abaissant le niveau hydrostatique au-dessous de lui. On peut dire que l'existence d'une mine, avec les moyens d'épuisement dont elle dispose, a pour effet de déprimer la surface hydrostatique au-dessous du point le plus profond que viennent assécher les pompes.

Ce rôle des grands vides souterrains, qui ne nous intéresse qu'accessoirement lorsqu'il s'agit d'une mine ou d'un tunnel, devient, au contraire, essentiel, quand il a pour conséquence, cherchée ou involontaire, de créer une source d'eau abondante et utilisable, telle que les sources artésiennes et les sources thermales, et nous

croyons qu'il convient, pour notre sujet, d'insister sur ce côté spécial du problème des sources artésiennes, en assimilant le sondage, qui produit la source, à un vide béant déterminant, lorsqu'on le fore, au-dessous de lui, une dépression locale et partielle de la surface hydrostatique.

Les résultats, auxquels nous arriverons pour les sources artésiennes, peuvent, en effet, s'étendre sans grand changement aux sources thermales.

Nous avons rappelé, plus haut, la théorie ordinaire des sources artésiennes¹. On y attribue, nous l'avons vu, avec raison, un rôle capital à la nappe argileuse, qui individualise, en quelque sorte, la strate poreuse située au-dessous (par exemple à Paris, l'argile du gault au-dessus des sables verts), en empêchant l'eau de remonter plus haut et déterminant, par suite, entre les deux parois de la strate imperméable, une différence de pression, égale (sauf de légères corrections hydrodynamiques, examinées plus loin) à βz . C'est cette pression βz , qui permet, en forant le puits αy , d'obtenir une source artésienne, tandis que, dans le cas des pressions uniformément réparties, ce puits se présenterait simplement comme un tuyau enfoncé à niveau plein dans un vase plein d'eau, tuyau par lequel ne se produit aucun jaillissement.

La pression $y z$, qui existe en y , y détermine un point de la surface dite piézométrique, correspondant à la nappe MM' , dont l'intersection avec la surface topographique limite une zone artésienne.

Si l'on pousse un autre sondage plus bas, jusqu'en γ , dans la nappe NN' , on aura en ε un point d'une seconde surface piézométrique, déterminant une zone artésienne différente de la première.

Inversement, au-dessous de la surface hydrostatique générale β , les sondages produiront, pour chacune de ces deux nappes, une dépression locale — et, si l'on peut s'exprimer ainsi, personnelle, — du niveau hydrostatique, descendant : pour la première, au-dessous de y ; pour la seconde, au-dessous de γ .

Et, surtout si l'on complète le captage en tubant les trous de sonde du haut en bas, l'individualisation de chacune des deux nappes deviendra absolument complète et tout à fait comparable au cas du tuyau étanche et courbé supposé en premier lieu, la

¹ Voir page 27, et fig. 4, page 22.

circulation dans l'intérieur de ce tuyau $M\gamma z$ ou $N\gamma z$ étant soumise aux lois de l'hydrodynamique, tandis que tout le milieu environnant reste dans un état hydrostatique.

Tout ce que nous venons de dire pour les sources artésiennes s'applique, selon nous, également aux sources thermales, la seule différence (qui n'influe en rien sur le régime) tenant à ce que, dans un des cas, la fissure de remontée est artificielle et, dans l'autre, naturelle.

Il faut donc, en résumé, pour qu'il y ait source thermale :

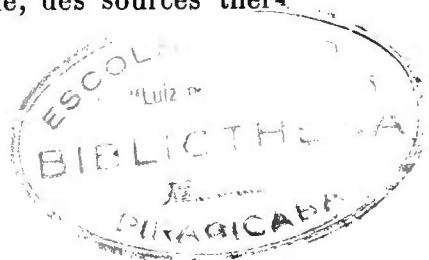
1^o Qu'il existe, pour une cause quelconque, en profondeur et sous une pression supérieure à celle de la colonne hydrostatique remontant de ce point au jour, veine d'eau individualisée, indépendante du régime hydrostatique général : soit parce qu'elle est emprisonnée sous une nappe impénétrable, qui l'empêche de remonter au-dessus; soit parce qu'elle se trouve dans un vide béant, assimilable à un tuyau qu'on enfoncerait dans le sol; soit encore parce qu'un accident géologique la charge de gaz, tels que l'acide carbonique, doués d'une force expansive spéciale;

2^o Qu'une large fissure verticale vienne percer cette sorte de conduite d'eau profonde et permettre à l'eau qui en jaillit une ascension rapide vers la surface.

Si la première condition n'était pas remplie, l'eau, à une profondeur quelconque au-dessous du griffon de la source thermale, aurait seulement la pression hydrostatique correspondante à cette profondeur même et, par suite, ne jaillirait pas en source, mais resterait emmagasinée hydrostatiquement et ne parviendrait pas jusqu'à la surface, ou ne s'en approcherait qu'en se mélangeant avec toutes les eaux douces du voisinage, que la source thermale, douée d'une force ascensionnelle, sait, au contraire, refouler.

Si la seconde n'avait pas lieu (ce qui se produit pour les nappes thermales de certains bassins comme celui de Vichy, où l'on crée alors des sources artificielles), l'eau aurait beau exister à une grande profondeur sous une pression capable de la faire jaillir, elle n'aurait aucun moyen d'arriver au jour, puisque l'issue lui manquerait et tout ce que pourrait produire cette pression serait un écoulement naturel vers d'autres affleurements plus ou moins lointains de la même couche, où l'eau n'arriverait qu'après avoir perdu la majeure partie de sa chaleur et de sa minéralisation dans le trajet.

Le débit même, souvent très considérable, des sources ther-



males force à admettre, nous l'avons déjà dit, que ces fissures, par lesquelles les eaux remontent, ont de larges dimensions sur de grandes hauteurs : ce qui semble, d'abord, un peu extraordinaire, mais ce que l'on s'explique très bien quand on considère un filon métallifère, dont l'épaisseur peut atteindre une centaine de mètres et qu'on le suppose, par la pensée, tel qu'il était au moment de sa formation, débarrassé des matières incrustantes qui le remplissent aujourd'hui et que la circulation d'eaux thermales anciennes a eu précisément pour effet d'y déposer.

Mais en est-il de même pour les fissures qui servent à la pénétration, nous ne le croyons nullement et une simple strate poreuse ou un réseau de minces fissures peuvent parfaitement suffire, ce nous semble, à la condition toutefois que la continuité des filets d'eau soit suffisante pour permettre aux pressions de se propager (sans quoi, la remontée au jour n'aurait pas lieu) et que l'on soit dans les conditions d'une nappe artésienne, c'est-à-dire qu'il y ait superposition d'une paroi étanche : paroi dont l'étanchéité peut n'être, d'ailleurs, que relative, puisqu'il suffit que sa résistance à la pénétration soit supérieure à la surpression de l'eau circulant au-dessous et qui pourra être réalisée, en pratique, par des bancs schisteux, par un noyau cristallin, par un filon incliné de quartz ou d'une roche éruptive, etc.

Une dernière question se pose à nous en finissant : jusqu'à quelle profondeur doit-on imaginer que cette circulation hydrothermale se produise ?

On remarquera, d'abord, que cette profondeur n'a pas besoin d'être forte pour donner aux eaux la thermalité constatée dans la pratique, puisqu'en dehors même de toute action volcanique 3 000 mètres environ suffisent à donner une température de 100°.

Mais nous avons d'autres raisons plus générales pour penser que les larges fractures, nécessaires à la remontée des eaux, ne peuvent guère exister au-dessous d'une zone restreinte, que nous évaluerons (simplement pour fixer les idées) à une vingtaine de kilomètres au maximum et l'on remarquera que, si cette idée était juste, il en résulterait une pareille limitation en profondeur pour les anciens filons métallifères, limitation d'autant plus sensible pour ces derniers que, la surface ayant été fortement érodée depuis la formation de ces filons, leur extension actuelle serait forcément beaucoup moindre.

En effet, l'on remarquera, d'abord, que la plupart des vides cons-

tatés à la surface dans l'écorce sont d'origine purement superficielle.

Cela est particulièrement net pour les grottes, qui n'ont pu être formées que par la circulation des eaux et ne se maintiennent vides que par le déblaiement résultant de celles-ci et compensant toutes les autres causes de comblement (éboulis, cristallisation des stalactites, etc.) : elles descendent donc peu au-dessous de la surface hydrostatique.

Il en est de même aussi des crevasses dues au glissement d'une portion de montagne, ou encore des fissures propres aux terrains sédimentaires, qui doivent s'arrêter au substratum cristallin, existant, selon toutes vraisemblances, partout, à une profondeur maxima en rapport avec le relief de l'écorce aux anciennes époques géologiques du globe : profondeur dont on peut concevoir une idée tout à fait approximative, en considérant les dénivellations du relief actuel.

Mais ce qui est bien plus important, c'est que la forme même de la terre et la réduction progressive de volume, subie par elle dans le cours des périodes géologiques, impliquent nécessairement une compression profonde, qui, lorsqu'on descend au-dessous des dépressions du relief actuel, doit difficilement permettre l'existence de grands vides persistants¹

En admettant même qu'il y eût de pareils vides à de très grandes profondeurs, il faudrait, pour que la circulation hydrothermale vint à en profiter, que les eaux eussent été amenées jusqu'à eux sous la pression continue d'un obstacle impénétrable, sans trouver auparavant aucune fissure pour s'échapper et que ces vides ne fussent pas remplis, d'autre part, hydrostatiquement, comme cela devient de plus en plus normal quand on s'enfonce sous les océans.

Il serait également nécessaire que ces eaux ne fussent arrivées à

¹ Nous ne considérons pas comme une objection le fait d'une diminution de densité sous les montagnes, que sembleraient indiquer certaines observations pendulaires. En admettant que ces mesures prouvent réellement la présence de vides sous ces montagnes, elles ne s'appliquent pas à la zone réellement profonde que nous imaginons ici et qui, commençant au-dessous des dépressions océaniques, se trouve donc à 17 kilomètres au plus, suivant la verticale, des sommets les plus élevés (8 840 mètres, sommet le plus élevé ; 8 500, profondeur maxima de l'Océan).

Nous ne parlons pas non plus des vides momentanés, dont on a parfois supposé la présence sous un vousoir terrestre, pour expliquer les mouvements de l'écorce superficielle, qui se sont produits à diverses époques géologiques. Si de semblables vides ont bien existé, il est très possible que leur profondeur réelle ait été beaucoup moins forte qu'on ne l'imagine et donne lieu à une observation semblable à celle que nous venons de faire pour les montagnes actuelles.

proximité d'aucun magma igné : ce qui, précisément dans les régions crevassées et disloquées par de grands mouvements internes, où ces vides auraient pu se produire, se présenterait bien probablement.

Nous croyons donc que la circulation souterraine des eaux n'intéresse et n'a toujours intéressé qu'une portion très restreinte de l'écorce terrestre : ce qui implique la limitation forcée de tous les filons métallifères en profondeur, malgré l'origine première éruptive attribuée par nous aux métaux qu'on y recherche. Dans une zone de la superficie terrestre, où l'érosion des saillies tectoniques serait suffisamment avancée, les filons métallifères devraient faire défaut, comme disparaissent également, en pareil cas, les plissements complexes des sédiments, puis, à un stade postérieur de ce nivellement, la racine même de ces plis.

CHAPITRE II

CAUSES DE LA REMONTÉE DE L'EAU THERMALE A LA SURFACE : PRESSION HYDROSTATIQUE, FORCE EXPANSIVE DES GAZ, ETC. — ÉTUDE MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME.

Nous nous sommes déjà trouvé amené, dans le paragraphe précédent, à traiter incidemment une partie de ce nouveau problème et nous avons déjà indiqué la cause principale, pour laquelle l'eau, une fois descendue à une grande profondeur dans le sol, remonte à la surface : c'est la pression hydrostatique, exercée sur elle par la colonne d'eau descendante, qui lui succède depuis son point d'infiltration et qui, étant formée d'eau froide, aurait, même pour une hauteur identique, un poids supérieur à la colonne montante composée d'eau chaude (bien que sa faiblesse de minéralisation relative influe en sens inverse pour diminuer la densité). Il est néanmoins utile d'envisager la question d'un peu plus près ; car, en dehors de la pression hydrostatique, des actions de divers genres doivent intervenir, dont la principale est évidemment la force expansive des gaz, tels que l'acide carbonique, mais parmi lesquelles il faut peut-être aussi compter l'influence profonde de roches encore ignées, les dégagements ou les condensations de vapeur d'eau, les frottements, etc.

Nous allons examiner d'abord brièvement ces influences accessoires, dont il n'a pas encore été question jusqu'ici, pour revenir ensuite au rôle de la pression hydrostatique et essayer de traiter mathématiquement l'ensemble du problème.

a. — Tout d'abord, la *pression des gaz* agit très fréquemment pour faciliter la remontée au jour d'eaux thermales, et accroître leur débit. Dans nos calculs, nous en tiendrons compte, en englobant cette pression dans la charge hydrostatique, dont l'origine n'aura plus besoin d'être connue, pourvu qu'on en sache la valeur.

De ces gaz expansifs, le plus important est l'acide carbonique, si abondant dans les régions volcaniques anciennes (Auvergne, Bohême, etc.). Les carbures d'hydrogène, qui se rencontrent dans les sources pétrolifères ou salées, n'ont auprès du sien qu'un rôle de second ordre.

Dans toutes les sources très chargées de gaz, l'influence de ces gaz se traduit par diverses conséquences : d'abord, par l'irrégularité du débit, pouvant amener de véritables intermittences ; puis, par la diminution progressive de ce débit, avec la multiplication des sondages portant sur une même nappe artésienne, phénomène très connu dans toutes les nappes pétrolifères, qui sont assimilables à des nappes artésiennes très gazeuses.

Cette diminution de débit, qui a pour effet d'obliger bientôt à pomper des sources d'abord jaillissantes, n'est pas seulement celle que fait prévoir l'hydrodynamique, lorsqu'on augmente les orifices communiquant avec une même nappe artésienne ¹ ; elle tient surtout à ce que, par ces orifices trop nombreux, on laisse échapper les gaz emprisonnés, dont la pression diminue et il peut en résulter, par contre-coup, un changement dans la minéralisation.

On remarque également que nombre de ces sources, ramenées au jour et émulsionnées par l'acide carbonique, sont particulièrement soumises aux fluctuations de la pression barométrique.

Ainsi, dans les eaux carbonatées de *Pougues* (Nièvre) ², où l'on a fait, de 1891 à 1897, de très nombreuses observations, on a constaté régulièrement que le niveau de la source s'élevait de 13 à 14 centimètres, quand la pression barométrique baissait de 1 centimètre de mercure.

Parmi les principales sources à pression d'acide carbonique, nous aurons à décrire, plus tard, *Hauterive* près Vichy, *Montrond*, *Nauheim*, etc., qui ont donné lieu à de véritables jets d'eau à la surface.

M. François cite le cas d'un puits à *Vergongheon* (Haute-Loire), sur la limite ouest du bassin houiller de Brassac et près d'une faille, qui fait buter le granite contre le tertiaire, superposé au carbonifère. A une profondeur de 200 m., il s'y produisit une véritable explosion, qui souleva l'eau de 22 m.

Voir plus loin, p. 185.

Voir plus loin, p. 269.

C'est également ce qui s'est passé à *Montrond* (Loire), où, à 475 m., on a eu un jaillissement de 35 m. au-dessus du sol.

A *Nauheim* (Hesse) ¹ en 1846, un sondage a donné, à 159 m. de profondeur, un jet d'eau gazeuse montant à 12 ou 14 m.

A *Neuenahr*, dans la Prusse Rhénane, à *Kissingen*, en Bavière, M. Daubrée a décrit des phénomènes semblables ²

Quant aux jaillissements produits par les hydrocarbures, ou exceptionnellement l'azote, ils sont le trait caractéristique des volcans de boue, fontaines ardentes, salses etc., communs dans un certain nombre de régions, où souvent l'on trouve, en même temps, du pétrole : le Caucase, les Apennins, la Sicile, la Birmanie, plus rarement la Pensylvanie, etc. ³ Nous reviendrons sur la description de quelques-uns des phénomènes produits en pareil cas dans la cinquième partie de cet ouvrage.

b. — En second lieu, il convient d'examiner le cas où, l'eau se trouvant pénétrer par capillarité au *contact de roches éruptives*, l'action de celles-ci se fait sentir, soit pour dissocier une partie de l'eau et fixer son oxygène, soit pour la vaporiser (cette dernière réaction rentrant dans un cas à examiner ultérieurement).

Le phénomène de dissociation, qui doit intervenir dans le volcanisme, paraît avoir joué un rôle dans la constitution des diverses roches silicatées et, plus généralement, de la croûte terrestre. Il est bien probable, étant donné le caractère réducteur constant des magmas de profondeur, que l'oxygène, dont le poids entre environ pour moitié dans l'écorce ⁴, y a été apporté de l'extérieur, soit dans l'air, soit aussi par l'eau et que l'hydrogène, produit par cette dissociation, a servi à saturer du carbone ou d'autres métalloïdes.

Par suite, une notable proportion de l'eau introduite dans la terre a dû, pendant la série des temps géologiques, se fixer en profondeur et cette réaction peut ne pas être sans avoir, aujourd'hui encore, quelque influence. Mais nous considérons le fait comme très accessoire pour notre étude ; car, dans le volcanisme même, bien qu'il y ait dégagement d'hydrogène et de carbures

LUDWIG. *Section Friedberg, geologisch bearbeitet*. 1855 (in DAUBRÉE, *Eaux souterr.*, I, 375).

² *Eaux souterr.*, I, 375 à 378, d'après NÖGGERATH (*Jahrb. f. Min.*, 1862) et SANDBERGER (*Jahrb. f. Min.*, 1870).

M. DAUBRÉE (*Eaux souterr.*, I, 386) cite également les volcans de boue de Turbaco, près Carthagène, où Humboldt avait signalé de l'azote, tandis que M. Vauvert de Méan, en 1855, y trouva de l'hydrogène carboné (*C. R.*, XXXVIII, p. 765).

⁴ Voir *Étude des gîtes métallifères* (Ann. d. M., août 1897, p. 17).

d'hydrogène, faciles à constater dans les éruptions sous-marines, c'est encore à l'état de vapeur que sort la majeure partie de l'eau emprisonnée en profondeur dans les roches, par suite sans dissociation et sans possibilité de fixation.

c. — La *force expansive de la vapeur d'eau* joue un rôle capital, au voisinage de la superficie, dans cette catégorie spéciale de sources thermales, qu'on nomme les geysers.

On sait comment on explique les jaillissements, qui se produisent pour quelques-uns d'entre eux, par la présence en profondeur d'une tranche d'eau, maintenue à l'état liquide au-dessus de 100° en raison de sa pression et qui, légèrement soulevée par un phénomène quelconque, se vaporise instantanément avec explosion en se décomprimant.

Nous avons à peine besoin de rappeler ici les phénomènes si connus des geysers d'Islande, du Yellowstone Park, de Nouvelle-Zélande, etc. ¹

Indépendamment des geysers proprement dits, il existe nombre de sources chaudes, dont la température dépasse celle de l'ébullition et qui produisent, par suite, à la surface, de véritables jets de vapeur.

Tels sont les Soffioni de Toscane ², les Steamboat Springs de Californie ³, les Caldeiras de l'île San Miguel aux Açores ⁴, les sources jaillissantes découvertes en 1871 par le colonel Montgomerie sur le plateau du Thibet, à plus de 4 700 m. d'altitude, etc. ⁵ Mais, dans tous ces cas, il ne s'agit que de phénomènes superficiels. Il peut être, au contraire, intéressant d'envisager la possibilité d'une vaporisation en profondeur, exerçant alors une influence notable sur la remontée de la colonne d'eau.

D'après ce que nous avons vu plus haut ⁶, cette vaporisation ne peut se produire dans la colonne d'eau descendante et sous pression ; mais on peut imaginer, à la base de cette colonne, de l'eau arrivant goutte à goutte, à travers les pores d'une roche ou ses fissures capillaires, dans une cavité surchauffée, ayant d'autre part une

¹ Voir plus loin, p. 394, 400, 411. Cf. DAUBRÉE. I, p. 390 à 398, et II, p. 13.

DAUBRÉE. *Ibid.* I, p. 398.

² 1883. PEALE. *Thermal springs of Yellowstone Park*, p. 321.

³ FOUQUÉ (*C. R.*, t. LXXVI, p. 1361).

Journ. of the geol. Soc. of London, t. XLV, p. 317. Il est à remarquer qu'à cette altitude la température de l'ébullition n'est que de 84°.

issue plus large vers le jour. Cette eau se vaporisera alors dans la cavité et remontera, par la fracture béante, en un jet de vapeur, qui, suivant les cas et la longueur du parcours, se condensera plus ou moins en eau avant d'arriver au griffon.

Sans même concevoir ce concours de circonstances relativement compliquées, si, dans le circuit capillaire descendant, s'ouvre une fente aboutissant à un point de la surface beaucoup plus bas que celui où s'est faite l'infiltration, il peut y avoir, à ce coude inférieur du trajet, décompression suffisamment brusque pour que, la température restant la même, une partie de l'eau remontante se vaporise.

Cette influence ne paraît toutefois, comme la précédente, être qu'assez minime et nous la négligerons dans le calcul.

d. Au contraire, les *frottements* interviennent d'une façon très sensible et qu'on ne peut laisser de côté, sinon pour empêcher le retour de l'eau à la surface, du moins pour le retarder : ce qui a pour effet de diminuer la quantité d'eau totale circulant, dans un temps donné, suivant un circuit souterrain déterminé et, par suite, de réduire le débit des sources thermales ¹.

Abordons maintenant l'étude mathématique de la circulation hydrothermale, qui doit nous servir, plus tard, à envisager scientifiquement le débit des sources.

On sait que le théorème fondamental de l'hydraulique, celui de Bernoulli, s'exprime par l'équation suivante, pour une tranche quelconque d'un filet liquide compris dans une enveloppe cylindrique de section indéterminée ² :

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\pi} + z + \frac{1}{\pi} \int_0^s \frac{\rho}{\omega} ds = \text{Constante},$$

v étant la vitesse de déplacement de la tranche liquide considérée, *P* la pression élémentaire exercée sur elle, *g* égal à 9,81, π le poids spécifique du liquide, égal à 1000 dans le cas d'une eau à 4°, non allégée par les gaz inclus ni alourdie par les sels dissous, mais diminuant quand la température augmente, *z* la *hauteur du centre de gravité* de la tranche au-dessus d'un plan de comparaison, ρ la force retardatrice tangentielle, ou résistance par unité de longueur, ω la section, *ds* l'élément de longueur du filet : c'est-à-dire que l'on obtient une somme constante en ajoutant

¹ Voir plus loin, p. 177 et suiv.

HATON DE LA GOUPILLIÈRE. *Cours de Machines*, t. I, p. 29.

la hauteur due à la vitesse $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$, la hauteur piézométrique $\left(\frac{P}{\pi}\right)$, l'altitude (z) et la perte de charge due aux influences retardatrices tangentielles $\left(\frac{1}{\pi} \int \frac{\rho}{\omega} ds\right)$ les trois premiers termes $\left(\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\pi} + z\right)$ représentant la charge ; autrement dit, entre deux points quelconques, toute la charge se trouve perdue : condition implicitement contenue dans l'hypothèse que la vitesse est constante, ou le mouvement permanent.

La résistance due au frottement φ est une certaine fonction de la vitesse $\pi\gamma\varphi(v)$, proportionnelle au périmètre γ de la section et, fait d'observation remarquable, indépendante de la pression ; quant à la vitesse v , elle est, par définition, égale à $\frac{Q}{\omega}$, Q étant le débit et ω la section, puisque l'on a :

$$Q = \omega v.$$

La perte de charge J par unité de longueur s'évalue comme suit :

$$J = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \frac{\rho}{\omega} ds = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \frac{\pi\gamma\varphi(v)}{\omega} ds = \int_0^1 \frac{\gamma\varphi(v)}{\omega} ds$$

l'intégrale étant prise de 0 à 1, puisqu'on opère sur l'unité de longueur.

Dans le mouvement permanent, la vitesse est constante ; tous les éléments dont dépend l'intégrale le sont aussi, en sorte que cette intégrale se réduit à $\frac{\gamma\varphi(v)}{\omega}$; d'où :

$$J = \frac{\gamma\varphi(v)}{\omega}$$

La fonction $\varphi(v)$ est de la forme : $av + bv^2$. En supposant le tuyau circulaire, on peut, d'après Darcy, pour un tuyau recouvert de dépôts, admettre, R étant le rayon :

$$a = \frac{32}{10^6} + \frac{376}{10^{11}R^2} \quad b = \frac{443}{10^6} + \frac{62}{10^7R}$$

La perte de charge par unité de longueur peut alors s'exprimer en fonction du rayon et du débit :

$$J = \frac{2}{R} \left[a \frac{Q}{\pi R^2} + b \frac{Q^2}{\pi^2 R^4} \right] = \frac{2Q}{\pi R^3} \left[\frac{32}{10^6} + \left(\frac{376}{10^{11}} + \frac{443Q}{10^6\pi} \right) \frac{1}{R^2} + \frac{62Q}{10^7\pi R^3} \right]$$

On voit, par cette formule, avec quelle rapidité la perte de

charge augmente, ou la charge s'use, quand on passe, avec un même débit Q , d'un tuyau large à un tuyau étroit, et cela d'autant plus vite que le débit est plus fort. Si le tuyau devient capillaire, c'est-à-dire d'un rayon infiniment petit, la charge tombe à zéro.

Dans le cas d'un rayon compris entre $0^m,02$ et $0^m,10$, b ne peut varier qu'entre $\frac{753}{10^6}$ et $\frac{505}{10^6}$ et s'écarte, par conséquent, peu d'une valeur moyenne $\frac{625}{10^6}$; α peut être égalé à 0 pour un tuyau qui a quelque temps d'usage, et la formule se réduit à

$$J = \frac{2 \times 625 \times Q^2}{10^6 \pi^2 R^5} = \frac{126 Q^2}{10^6 R^5} = 0,000126 \frac{Q^2}{R^5} = 0,00125 \frac{v^2}{R}$$

On voit alors que, si le rayon diminue du tiers, la charge est multipliée par 243.

De semblables réductions de diamètre se produisent, notamment, d'une façon progressive, dans les conduits souterrains de toutes les sources thermales, par les incrustations que ces sources déposent sur leur passage; ces incrustations étant très irrégulières, dans la formule $J = \frac{\gamma}{\omega} \varphi(v)$, la section ω peut diminuer notablement, sans même que l'on trouve une compensation relative dans la diminution du périmètre γ .

En désignant par H la hauteur $\frac{P}{\pi} + z$, à laquelle l'eau s'élèverait au point considéré, si elle trouvait au-dessus d'elle un tube vertical, c'est-à-dire la hauteur du niveau piézométrique au-dessus du plan de comparaison, ou charge, on peut exprimer H en fonction des seules données géométriques du canal :

$$\frac{Q^2}{2g\omega^2} + H + \int_0^s \frac{\gamma}{\omega} \varphi\left(\frac{Q}{\omega}\right) ds = C$$

$$H = C - \frac{Q^2}{2g\omega^2} - \int_0^s \frac{\gamma}{\omega} \varphi\left(\frac{Q}{\omega}\right) ds$$

Il en résulte évidemment que, si la section ne change pas complètement de forme, c'est-à-dire si $\frac{\gamma}{\omega}$ varie dans le même sens que $\frac{1}{\omega}$, H variera dans le même sens que ω .

Dans le cas d'un filet souterrain très étroit et à faible débit, on doit remarquer que le terme $\frac{v^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g\pi^2 R^4}$ pourra devenir négligeable, sans que la perte de charge $\left(J = b \frac{Q^2}{R^5}\right)$ le soit pour cela.

On aura alors

$$\frac{P}{\pi} + z + b \frac{Q^2}{R^5} = \text{constante.}$$

Quant à P, il dépendra, si l'on considère la section du filon thermal située au point le plus bas du circuit : 1° de la différence du poids de la colonne froide à l'amont et de la colonne chaude à l'aval ; 2° de la force expansive des gaz ; 3° de la résultante des actions capillaires qui s'exercent sur toutes les parties étroites du tube¹.

Au sujet du premier point, on remarquera que l'eau, descendant du point d'infiltration, supposé à 10°, jusqu'au point le plus bas, où elle a sa température maxima t , est formée en majeure partie d'eau froide, tandis que la température t' à l'émergence sera peu différente de la température t au point le plus profond, c'est-à-dire que toute la colonne remontante est formée d'eau chaude à peu près à la température t . Nous renvoyons l'examen de ce point au moment où nous nous occuperons de la température des eaux ; on conçoit immédiatement que cette influence peut, dans certains cas, contrebalancer les pertes de charge internes dues aux frottements, en sorte que des infiltrations d'eau de mer, par exemple, viennent former des sources chaudes, au niveau même de la mer, sur le rivage.

Nous aurons également à reprendre cette formule quand nous étudierons le débit². On voit que la vitesse et, par suite, le débit croissent quand on abaisse le plan d'émergence : ce qui a pour effet de réduire le travail de la pesanteur à la remontée z et la résistance due aux frottements, tout en laissant nécessairement constante la charge hydrostatique P à l'émergence.

¹ Voir plus haut, p. 19.

² Voir plus loin, p. 178.

TROISIÈME PARTIE

DE L'ÉMERGENCE DES SOURCES THERMALES CAUSES DÉTERMINANTES DE LA POSITION DE LEUR GRIFFON

Généralités. — Nous venons, dans les chapitres précédents, d'expliquer l'origine des sources thermales par un circuit souterrain, qu'alimentent à distance des infiltrations superficielles et nous avons vu : 1° comment ces infiltrations devaient pénétrer en profondeur, et 2° pourquoi se produisait la remontée des eaux. Tout ce circuit, on peut le dire, échappe à nos moyens d'investigation directs, bien que, dans nombre de circonstances, d'abord dans les travaux de captage mêmes, puis surtout dans les travaux de mines, on ait pénétré assez profondément dans les chenaux d'ascension des sources thermales.

Au contraire, quand nous commençons l'examen du point d'émergence, ou griffon des sources, nous sortons de l'hypothèse pour rentrer dans le domaine des faits d'observation positifs. Le griffon est, en effet, le point où l'on aborde, en réalité, le circuit hydrothermal et celui dont l'étude complète présente, par suite, le plus d'intérêt pratique.

Le problème que nous allons avoir à nous poser, sera le suivant : étant donné l'origine admise par nous pour les sources thermales, pourquoi celles-ci arrivent-elles au jour en un point plutôt qu'en un autre ? On en voit immédiatement les conséquences, quand il s'agira de captage ; car, si nous savons bien exactement *pourquoi* le griffon de la source thermale se trouve en tel endroit déterminé, nous pourrons, le jour où nous en éprouverons le besoin, amener ce griffon, par des travaux de captage, en tel ou tel autre point mieux approprié pour notre usage ; en même temps, si la source a des émergences multiples, dont quelques-unes vont se

perdre, il nous sera possible de les réunir et concentrer dans un même bassin, etc.

Quand on envisage les griffons de diverses sources thermales, on remarque aussitôt qu'ils peuvent se diviser en deux grandes catégories, assimilables, en fait de gisements métallifères : d'une part, aux filons ; de l'autre, aux couches interstratifiées :

1° Il existe de véritables filons d'eau thermale, qui, selon nous, sont, dans la majorité des cas, les véritables origines des eaux thermales, répandues ultérieurement, sous toute autre forme, dans un bassin hydrologique ;

2° On rencontre des nappes thermales interstratifiées, pouvant : soit donner des sources sur leur affleurement naturel ; soit, de préférence, fournir, par des sondages des sources artésiennes artificielles.

Ces nappes thermales elles-mêmes nous paraissent, le plus souvent, et particulièrement quand leur température est élevée, être alimentées par des filons d'eau, qui, traversant des couches poreuses ou fissurées avant d'arriver au jour, s'y épanchent latéralement (Vichy, Vals, Géleznovodsk, Pougues, etc.).

Il peut cependant arriver, parfois, que cette nappe artésienne doive simplement sa température à la profondeur qu'elle-même atteint dans le sol, et sa minéralisation aux sels solubles ou aux gaz qu'elle a rencontrés sur son passage.

Nous citerons bientôt quelques cas de sources thermales de ce genre, en rapport avec un simple plissement des terrains (Baden et Yverdon en Suisse, etc.) ; mais c'est surtout des filons hydrothermaux que nous allons avoir à nous occuper. Ils représentent, en effet, le véritable accident caractéristique et intéressant pour la structure géologique du pays, en même temps que le terme naturel et logique du circuit souterrain, à l'étude duquel nous nous sommes attachés jusqu'ici.

D'une façon générale, le griffon d'une source thermale filonienne ainsi définie se trouve à l'intersection d'une fracture géologique profonde (faille ou filon), par laquelle remonte l'eau et d'une ligne de dépression topographique, qui détermine, sur ce plan de fracture, une colonne de moindre pression hydrostatique, de moindre charge, où l'eau, s'élevant par la fracture, se dirige naturellement de préférence à toute autre émergence plus élevée.

Nous étudierons donc, à l'occasion des sources filoniennes : I la nature des fissures, qui peuvent servir à la circulation ascen-

dante des eaux thermales et II — ce qui nous arrêtera bien moins longtemps — le rôle de la surface topographique du sol dans la détermination des points de moindre pression.

Il va, d'ailleurs, de soi qu'en pratique le griffon sera rarement aussi précisément déterminé que nous venons de le supposer et qu'il s'y présentera, très fréquemment, au voisinage de la surface, des bifurcations multiples, dont l'importance peut être médiocre en théorie pour qui envisage seulement la structure tectonique du pays, mais dont le rôle pratique, et notamment l'intervention dans le captage, seront très considérables.

C'est, en effet, cette disposition superficielle des filets d'eau thermale qu'il faudra le plus soigneusement étudier avant de capter la source, soit pour ramener les sources divergentes et multipliées à un griffon unique, lorsque la chose ne présentera pas d'inconvénient, soit pour individualiser, au contraire, et capter séparément les venues hydrothermales, auxquelles une influence superficielle quelconque (particulièrement marquée pour les sources sulfurées) se sera trouvée donner des propriétés thérapeutiques différentes, qu'il faudrait bien se garder d'altérer en procédant à de soit-disant améliorations théoriques.

Ces bifurcations superficielles peuvent, en premier lieu, se produire dans la « roche en place » elle-même, où se trouve la fracture filonienne, quand cette roche présente des cassures internes, des *diaclasses*, le long desquelles les eaux s'éparpillent. C'est ce qui arrive souvent dans certaines roches cristallines, comme les granites de Karlsbad, les microgranulites de Géleznovodsk, ou même dans certaines couches sédimentaires compactes et fracturées, telles que les quartzites d'Ems, les calcaires jurassiques de Pougues, etc.

Telle est la raison principale, pour laquelle une station hydrothermale ne présente pas, en général, un griffon unique, ou même une série de griffons alignés suivant une même fracture principale, mais un nombre plus ou moins grand de sources disséminées sur des fissures transversales, sources qui déterminent le groupe hydrothermal.

Cela n'empêche pas ces diverses eaux d'avoir la même origine première, à laquelle on pourrait, au moins en théorie, parvenir par un captage suffisamment profond ; mais, ainsi que nous le faisons remarquer à l'instant, toutes ces eaux, dont la température et la minéralisation ont commencé par être les mêmes, ont

subi, vers la surface, des modifications intimes, par le mélange d'eaux douces en proportions variables, la réduction possible exercée en présence de matières organiques, ou, au contraire, la peroxydation de protoxydes à l'air, le dégagement d'acide carbonique, le refroidissement plus ou moins prononcé et plus ou moins lent, etc., etc. Il en résulte des sources distinctes, dont on a pu empiriquement constater, parfois pendant de longues années, les vertus différentes, sans saisir le plus souvent la cause réelle de leur action physiologique et qu'on est, par conséquent, forcé d'utiliser et de capturer comme des sources indépendantes.

En second lieu, ce genre de bifurcations sera encore bien plus fréquent dans les terrains d'alluvions, d'éboulis ou de détritiques, qui recouvrent, presque toujours, le griffon en place de la source thermale et dont l'épaisseur peut être très considérable.

Cette cause de dispersion des sources, qui s'applique aussi bien aux sources artésiennes qu'aux sources filoniennes, se superpose, comme on le conçoit aussitôt, à la précédente et son influence, dans les questions de captage, est de premier ordre.

Elle intervient d'autant plus fréquemment que les sources thermales se trouvent, comme nous l'avons déjà fait prévoir et comme nous l'expliquerons tout à l'heure plus en détail, dans les points bas de la surface topographique, dans le fond des vallées ou des ravins, au pied d'escarpements et de montagnes, sur le rivage de la mer, etc., et tous ces points sont on ne peut mieux choisis pour présenter des accumulations de débris meubles : soit simplement éboulés, dans le cas des sources situées à la base d'une falaise ou sur la lèvre affaissée d'une faille ; soit roulés et grossièrement stratifiés dans les lits de rivières et sur les plages.

Quand les eaux thermales, toujours plus ou moins incrustantes, circulent dans ces terrains meubles, elles ont une tendance à en obstruer les fissures et à en recouvrir la surface d'un dépôt imperméable : ce qui a pour effet de déplacer progressivement les griffons et quelquefois, à la fin, d'empêcher complètement la sortie de l'eau thermale.

En outre, le mélange des eaux froides superficielles s'y fait avec une facilité toute particulière.

C'est donc une double raison pour que le captage doive être exécuté alors avec un soin spécial, en dépit des grandes difficultés qu'il peut présenter dans ce cas.

Nous commencerons par étudier, dans un premier chapitre, les

divers modes de fracture pouvant produire l'émergence, soit des sources artésiennes naturelles (plissements des terrains), soit des sources filoniennes (diaclasses, failles, filons, etc.) ; après quoi, nous examinerons, dans le chapitre II, le rôle de la surface topographique dans la localisation des griffons. Les chapitres III et IV seront consacrés : l'un aux variations avec le temps dans le niveau des griffons ; l'autre à la multiplicité des sources dans une même station thermale.

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE DE LA FISSURE THERMALE

Dans le cas le plus habituel, nous l'avons fait remarquer précédemment, une source d'eau douce sort de terre en descendant, au contact de deux couches : l'une imperméable, à laquelle elle est superposée ; l'autre perméable, qui la surmonte. Cependant, même dans la circulation des eaux superficielles et froides, les cassures, joints et interstices de la roche jouent déjà un rôle considérable : notamment les diaclases élargies des calcaires, les plans de fissilité des schistes, les mille petits vides des arènes granitiques, des scories volcaniques, ou des terrains de transport, constituant les nappes phréatiques, etc... Il existe même des cas de sources ordinaires en relation avec des failles¹.

Pour les sources thermales, inversement, le fait le plus fréquent sera celui d'une fracture profonde ramenant au jour des eaux ascendantes ; mais, naturellement, comme dans tout ce qui touche à la circulation des eaux, le caractère physique de perméabilité plus ou moins grande des terrains rencontrés jouera un rôle essentiel : c'est ainsi que des sources filoniennes suivront souvent une faille, qui met en contact, avec la roche fissurée d'où les eaux s'échappent, un mur d'argile impénétrable, ou longeront un filon de quartz, granulite, porphyre, etc., qui, en s'opposant à la traversée des eaux, amènera leur accumulation, leur drainage sur sa paroi. Et l'on pourra même avoir, pour les eaux thermales comme pour les eaux ordinaires, une circulation dans une strate poreuse au-dessous d'une strate compacte, soit que les eaux, déjà thermales, en remontant par une fracture, aient rencontré cette couche perméable et y aient créé une nappe minérale ; soit qu'ayant suivi, depuis l'origine, cette couche à la façon

¹ Voir DAUBRÉE, *Eaux souterr.*, I, 110 ; exemples de Loudun (Vienne), de Gorze près Metz, de Sassenage près Grenoble, de Rohrbach près Vienne, etc.

des eaux artésiennes, elles soient ramenées soudain au jour par un pli brusque des sédiments.

Le fait seul que les sources thermales ont dû, pour acquérir leur température, descendre à une profondeur assez grande, ou se trouver en contact avec des terrains déjà échauffés par les phénomènes volcaniques, montre que ces sources doivent¹ se trouver localisées dans des régions, où des accidents mécaniques violents du sol ont, soit disloqué et redressé les terrains, de manière à amener cette introduction profonde et surtout cette remontée rapide, soit déterminé l'ascension des roches éruptives vers la surface² Et l'on peut ajouter de suite qu'il faut que ces mouvements aient été récents pour que les vides produits par eux n'aient pas été comblés, les saillies du sol nivelées et les roches refroidies : d'où la relation, sur laquelle nous insisterons plus tard, entre les principaux groupes de sources thermales et les chaînes de plissement récentes³.

Cependant ces mouvements récents ont souvent affecté, de préférence, les régions déjà disloquées antérieurement et probablement prédisposées, par leur situation ou leur structure, à supporter le contre-coup plus ou moins direct des plissements ou des effondrements de l'écorce. C'est un fait depuis longtemps remarqué que la répétition des phénomènes géodynamiques, à des époques géologiques successives, dans certaines zones particulièrement propices. D'où cette conclusion logique que l'on trouvera fréquemment des sources thermales dans les parties des massifs anciens, dès longtemps fracturées, où un phénomène plus ancien, comparable dans une certaine mesure, mais plus intense, avait jadis amené la formation de filons métallifères.

Et, comme ces anciennes fractures, mal soudées par les gangues filoniennes, ont eu fréquemment une tendance à se rouvrir ; comme, même sans réouverture, ces filons, formés en majeure partie de minéraux impénétrables aux eaux, déterminent, à leur contact, un plan de drainage, il arrivera constamment que des

¹ A l'exception de quelques sources salées, sulfatées ou ferrugineuses, devant leur minéralisation au contact de gîtes de sel, de gypse ou d'oxyde de fer dans les terrains tout superficiels, sources alors caractérisées par leur basse température.

Il existe bien des eaux chaudes dans le fond des grands bassins sédimentaires, comme le bassin de Paris ; mais elles n'ont aucune occasion naturelle de remonter à la surface et il faut les chercher artificiellement par un forage artésien.

³ Voir à ce sujet : *la distribution géographique des sources thermales* (Rev. gén. des Sciences, juillet 1898).

sources thermales actuelles se présenteront sur des filons anciens d'incrustation ou de remplissage éruptif.

Les fractures géologiques, donnant lieu à des sources thermales, peuvent, comme nous allons le voir, appartenir à cinq catégories principales :

1° Diaclases, ou cassures intérieures des roches ; 2° plis des terrains ; 3° failles ; 4° filons, ou dykes de roches éruptives ; 5° filons métallifères.

Nous allons les décrire dans l'ordre où nous venons de les énumérer, qui correspond à des sources de plus en plus distinctes des sources ordinaires d'eau douce, le premier type étant encore celui de nombreuses sources ordinaires ou vauclusiennes, le second des sources artésiennes, tandis que le troisième et le quatrième sont spéciaux aux sources thermales, le dernier étant même, par définition, intervenu dans la circulation de ces eaux thermales anciennes, particulièrement actives, qui ont incrusté des filons métallifères.

On remarquera, en outre, que, suivant une observation précédente, le premier type, à savoir les diaclases, n'est, quand il s'agit de sources thermales, qu'une dérivation accidentelle et superficielle de l'un des quatre autres. Les diaclases étant, par définition même, des cassures restreintes à une roche ou à un terrain déterminé, ne peuvent (si ce n'est peut-être dans les régions volcaniques) avoir des dimensions verticales suffisantes pour produire par elles-mêmes, des sources thermales.

Le second type (sources artésiennes en rapport avec des plissements brusques de terrains) sera lui-même, dans bien des cas, produit par une venue filonienne de l'un des trois derniers cas, alimentant, en profondeur, une nappe hydrothermale interstratifiée.

§ 1. — *Diaclases, ou cassures intérieures des roches.*

Les diaclases jouent un rôle considérable dans la circulation de ces eaux souterraines, presque superficielles, qui creusent les grottes et alimentent les sources dites vauclusiennes. Nous avons essayé ailleurs¹, avec notre ami M. Martel, de démontrer et de préciser cette action, que nous sommes donc loin de nier. Mais,

1890. (Bull. Soc. Géol., 3^e sér., t. XIX, p. 142.) *Sur quelques questions relatives à la géologie des grottes et des eaux souterraines.*

quand il s'agit de sources thermales, nous croyons, comme nous venons de l'expliquer, que l'influence profonde de ce genre de cassures est presque insignifiante et que, lorsqu'on a trouvé la relation d'une source thermique avec les diaclases d'une roche, on n'a nullement résolu le problème de son origine réelle, qui se rattache toujours à un accident tectonique d'une bien autre amplitude.

C'est en partant de cet accident géologique, de cette fracture principale, que les eaux thermales, remontant sous pression et rencontrant, vers la surface, un réseau de vides largement accessible, par lequel elles ont un libre accès au jour, s'y précipitent.

Le cas se présente même pour des strates poreuses et per-

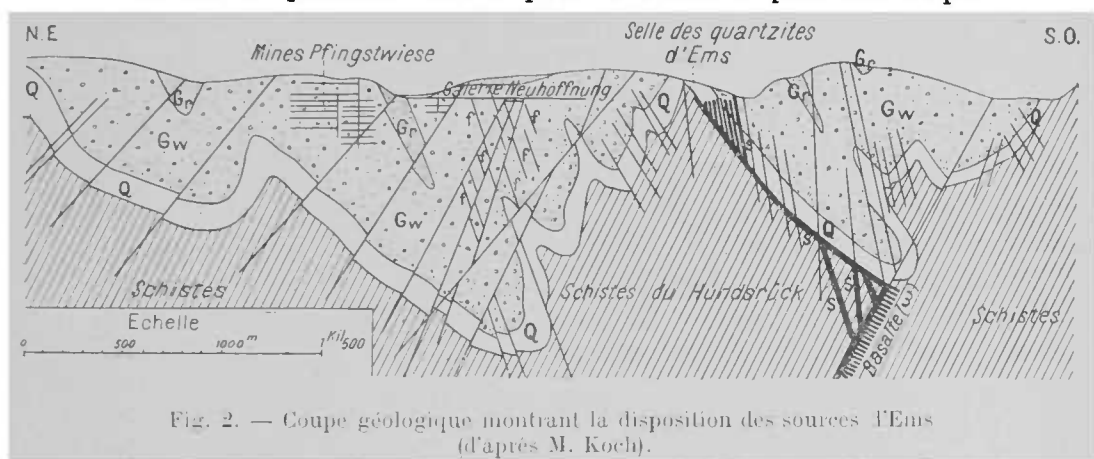


Fig. 2. — Coupe géologique montrant la disposition des sources d'Ems (d'après M. Koch).

Sch., schistes du Hundsrück. — *Q*, quartzite. — *Gw*, grauwacke (Plattergrauwacke). — *Gr.*, grès à spirifères. — *ω*, filou de basalte. — *fff*, filons métallifères. — *Ssss*, eau thermique, dans son trajet souterrain et à sa sortie au jour.

méables, où se produisent, de cette manière, des nappes d'eau thermales artésiennes. Il est encore plus net quand les eaux trouvent, dans des calcaires ou même dans des roches plus compactes, quartzites, granites, porphyres etc., des systèmes de fissures plus ou moins ramifiées.

Nous allons donner quelques exemples spéciaux de sources thermales situées sur des diaclases¹; mais, dans les descriptions que nous ferons ultérieurement de diverses sources thermales, Plombières, la Bourboule, Chatelguyon, etc., on ne manquera pas de remarquer que ces cassures interviennent souvent accessoirement.

A *Ems* (fig 2), les grauwackes, fortement plissées, forment

¹ Plusieurs des exemples cités dans ce chapitre et des figures correspondantes seront empruntés au bel ouvrage de DAUBRIÉ sur les *Eaux souterraines* (1887).

deux grandes cuvettes synclinales, reposant, par l'intermédiaire d'une couche de quartzite, sur les schistes du Hundsrück¹.

D'après une coupe due à M. Koch, les eaux paraissent remonter de la profondeur entre ces schistes et ces quartzites, qui forment, au-dessus d'elles, un toit imperméable ; puis, au voisinage du jour, elles trouvent, dans ces quartzites, une série de diaclases et les suivent, pour venir sourdre en des griffons très multipliés.

Il semble, en cette région, qu'un phénomène du même genre, mais plus ancien, se soit produit sur le synclinal suivant de grauwacke au nord-est et y ait contribué à l'incrustation des filons plombifères.

A *Géleznovodsk*, dans le Caucase, d'après M. Dru², les sources thermales sortent des fissures d'un massif de porphyre pétersili-ceux, recouvert de marnes éocènes.

A *Wildbad*, dans le Wurtemberg et à *Karlsbad*, en Bohême, elles sont en relation avec les diaclases du granite. A Wildbad, ce pointement granitique est lui-même enveloppé de grès bigarrés.

A *Pougues* (Nièvre), on trouve les eaux thermales dans les fissures d'un calcaire bajocien, où elles sont arrivées d'abord par une faille profonde.

§ 2. — *Plis des terrains.*

Les eaux thermales, arrivant au jour par suite d'un pli de la strate perméable, où elles ont cheminé souterrainement sous un couvercle imperméable, correspondent, en quelque sorte, à des puits artésiens naturels. Le nombre des exemples, qu'on en pourrait citer, est assez restreint ; car, généralement, les eaux, qui ont suivi un trajet semblable, ne sont pas descendues assez bas pour se thermaliser. Nous en mentionnerons cependant, d'après M. Daurée³, quelques-uns :

En Algérie, dans la *Basse-Mitidja*, au sud d'Alger, MM. Ville et Pouyanne ont constaté, le long de l'Oued Harrach, l'existence d'un certain nombre de sources artésiennes naturelles, dont la température n'atteint qu'exceptionnellement 21°, la moyenne du lieu étant

1882. GÜMBEL. (Sitzungsber. der k. bayer. Ak. der Wiss. zu München.) — Cf. DAURÉE. *Eaux souterr.*, I, 267.

² 1884. DRU. *Eaux minérales du Caucase*. (Voir, plus loin, le chapitre relatif au captage de ces eaux.)

³ DAURÉE. *Eaux souterr.*, I, 167 à 184 ; II, 163 à 172.

17°. Ces eaux paraissent venir des flancs du petit Atlas, au sud, où elle se seraient infiltrées, à une altitude de 120 à 150 m., au milieu de sables et argiles quaternaires, pour venir ressortir, 80 à 100 m. plus bas, vers la cote 50. Les sondages rencontrent l'eau entre 25 et 45 m. de profondeur.

De même, dans le *M'zab*, etc., des sources jaillissantes naturelles, parfois légèrement thermales, sont alimentées par des nappes artésiennes, qui, provenant d'infiltrations sur les collines crétacées du Nord, passent souterrainement du crétacé dans le quaternaire saharien¹ et viennent reparaître au jour dans celui-ci.

De même encore, le cours souterrain de l'*Oued Rhir* alimente des puits naturels (behours) et les sondages de *Touggourt*, *Ouargla*,

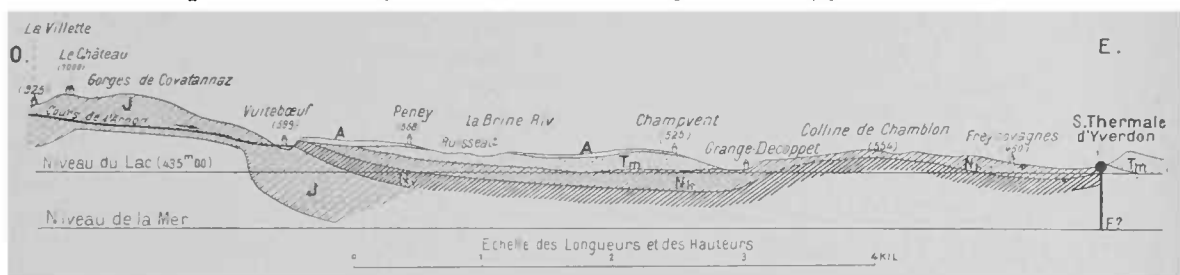


Fig. 3. — Coupe géologique montrant le gisement des sources thermales d'Yverdon (d'après M. Renevier).

J, jurassique supérieur. — Nv, valangien. — Nh, marnes d'Hauterive. — Tm, mollasse.
A, diluvium.

etc.² Une nappe semblable donne, à *Biskra*, des sources volumineuses à 29°,33, la moyenne du lieu étant de 22°

En Suisse, la source d'*Yverdon*³, à l'embouchure de l'Orbe sur le lac de Neuchatel (canton de Vaud), paraît, d'après une coupe due à M. Renevier (fig. 3), alimentée par une dérivation de l'Arnon, qui, suivant les couches valangiennes Nv, sous les marnes d'Hauterive plus imperméables Nh, vient reparaître au jour avec elles. La température de 24° dépasse de 15° la moyenne du lieu. Il faut cependant remarquer que l'émergence paraît avoir lieu sur une faille F, mettant en contact le valangien avec la mollasse, par des fissures de cette mollasse même.

¹ VILLE. (*Bull. Soc. géol.*, 2° s., t. XXII, p. 113.)

² 1856. CH. LAURENT (*Bull. Soc. géol.*, 2° s., t. XIV); 1867. DUBOCC. *Rapport sur le Sahara oriental à l'Exposition universelle*, p. 32; 1880. ROLLAND. (*Assoc. franç. pour l'avancement des sciences*, Reims, p. 547.)

Article « Yverdon » du *Dictionnaire Durand-Fardel*; DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, II, 167.

A *Baden*, en Argovie (fig. 4)¹, des eaux thermales, emprisonnées dans le Keuper, en partie perméable, où elles se sont minéralisées, sous une voûte d'argiles liasiques imperméables L, viennent apparaître au jour en un point où la vallée de la Limmat traverse cet anticlinal et fait apparaître ce Keuper. Elles ont une température de 46 à 50°

Enfin, dans les *Appalaches* et l'État de *Virginie*, M. Will. Rogers²

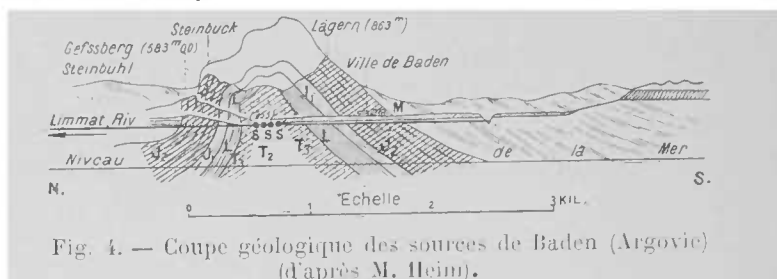


Fig. 4. — Coupe géologique des sources de Baden (Argovie) (d'après M. Heim).
*T*₁, muschelkalk supposé. — *T*₂, Keuper perméable (grès, argiles ligariées et gypse). *L*, lias imperméable (argile noire). — *J*₁, dogger perméable (calcaire ferrugineux). — *J*₂, malm perméable (calcaire de Baden). — *M*, mollasse.

a montré comment une série de sources thermales étaient situées sur des axes anticlinaux du silurien inférieur.

§ 3. — Failles.

Les trois dernières catégories de fractures, qu'il nous reste à examiner, les failles, les parois de roches éruptives et les filons métallifères, présentent, pour la circulation des sources thermales, une importance toute spéciale et l'on peut même dire que la très grande majorité d'entre elles n'ont pas d'autre origine.

Le fait est même si marqué et si net que, dans nombre de cas où des failles se trouvaient cachées par des terrains superficiels, l'existence de sources thermales a pu servir à les jalonner.

Ce rapprochement des sources thermales avec failles et filons s'explique aisément par la continuité en profondeur de ces accidents géologiques, qui ne sont pas limités à un terrain particulier, mais affectent souvent tout l'ensemble des terrains d'une région.

En outre, les parois de failles et de filons présentent des conditions physiques particulièrement favorables à la circulation des eaux : dans le cas des failles ou des parois de dykes éruptifs, on

1840. ALBERT MOUSSON. *Umgebungen von Baden*.

1843. ROGERS. *Association of Americ. geolog.*, Boston.

est, par définition même, au contact de deux dépôts de nature diverse et souvent l'un d'eux forme un mur impénétrable, le long duquel viennent se concentrer les eaux de l'autre ; dans le cas des filons métallifères, de même, le filon, généralement étanche par sa nature minéralogique, retient les eaux qui s'y accumulent.

Le fait est si connu pour ces derniers que, dans le Gard, d'après Emilien Dumas ¹, les habitants, pour s'alimenter d'eau douce, vont, par travers-bancs, chercher des filons de quartz, qu'ils nomment *carals*, ou conducteurs d'eau.

Cette influence contribue, d'ailleurs, certainement à l'aspect spécial que présentent, à leurs affleurements, les grand filons de quartz du Bourbonnais et de la Marche, le long desquels les terrains encaissants ont, presque toujours, été tellement altérés par le passage des eaux qu'ils en sont méconnaissables.

Il arrive, de même, qu'une faille vienne couper une nappe d'eau douce et amène cette eau à remonter par la fracture même : ainsi, d'après M. de Longuemar, à *Loudun* (Vienne ²).

Nous ajouterons que la tendance actuelle à la circulation des eaux thermales le long des failles a, tout naturellement, dû exister déjà aux époques plus anciennes, où se sont constitués les filons métallifères ; en sorte que les circulations hydrothermales, auxquelles paraît dû le remplissage de ces filons, ont souvent suivi des failles, qui se sont par là transformées en filons (Vals ; bordure de la Limagne, etc.) et que les deux cas, failles ou filons, se trouvent là confondus.

Enfin, il n'est pas surprenant que le plus grand nombre des sources thermales sortent au jour sur des filons, ceux-ci étant précisément d'anciens chenaux de circulations hydrothermales.

Cette remarque faite, nous allons donner quelques exemples de sources thermales en rapport avec des failles.

Tout d'abord, les eaux thermales de la *Limagne*, en Auvergne et en Bourbonnais, nous semblent en présenter un cas des plus typiques et, en même temps, des plus développés.

Quelle que soit, en effet, l'origine locale de ces nombreuses sources, qui présentent entre elles beaucoup d'analogies, il n'en est pas moins clair, à la seule inspection d'une carte d'ensemble

EMILIEN DUMAS. *Géologie du Gard*, t. II, p. 58 ; Cf. DAUBRÉE, *loc. cit.*, I, p. 277.

² DE LONGUEMAR. *Arrondissement de Loudun*, 1860 ; Cf. DAUBRÉE, *loc. cit.*, I, 110.

On sait combien souvent la rencontre d'une faille dans un percement souterrain amène aussitôt une forte venue d'eau.

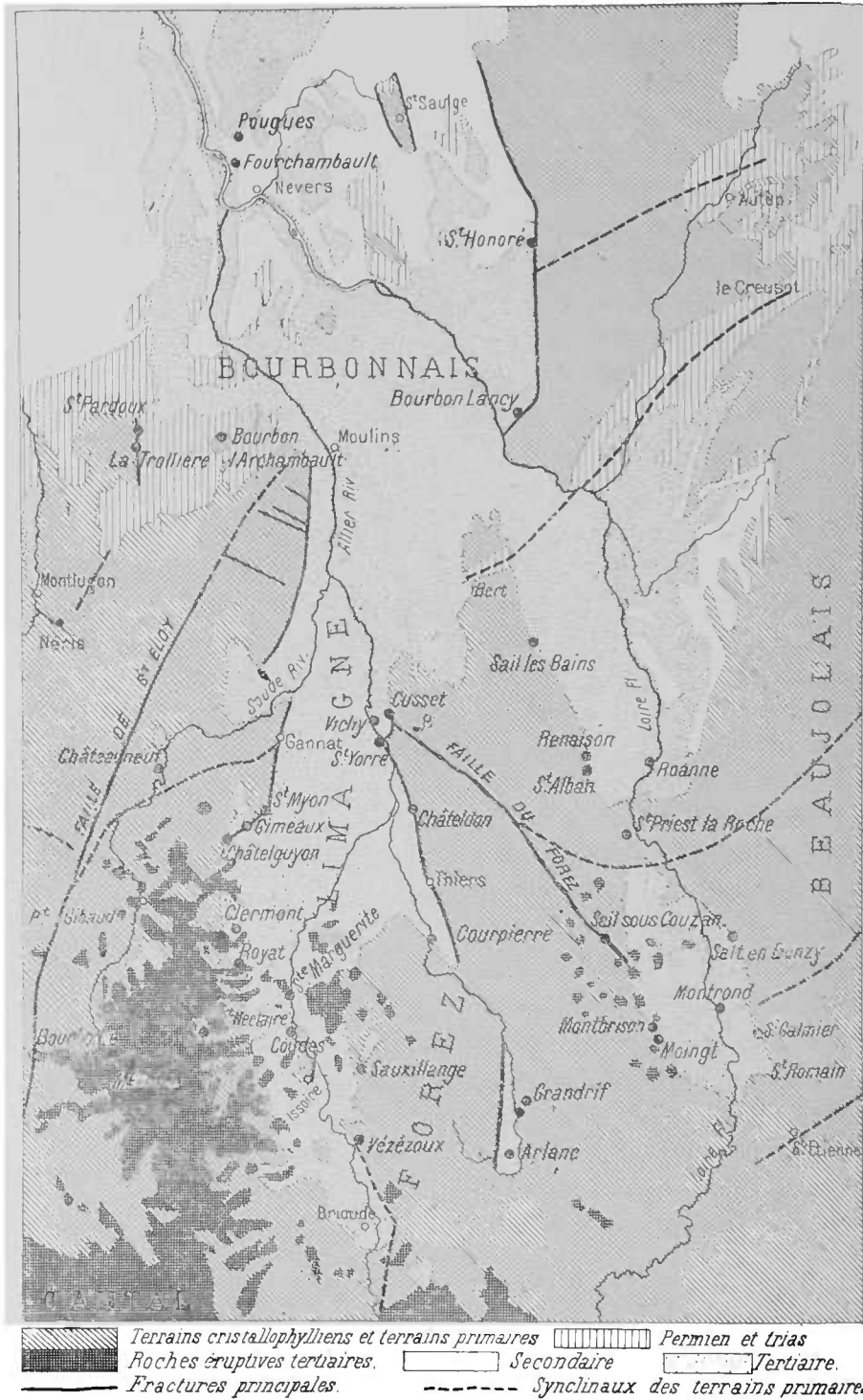


Fig. 5. — Carte géologique des bassins tertiaires du Plateau Central et sources thermo-minérales connexes.

Echelle au $\frac{1}{1.353.533}$

(fig. 5), qu'elles se rattachent, presque toutes, aux deux grandes failles si continues, par lesquelles les terrains tertiaires de la Limagne sont bordés à l'est et à l'ouest et brusquement mis en contact avec les roches cristallines.

Si l'on prend, en effet, la bordure ouest, on y trouve Royat, Châtelguyon, Gimeaux, Teilhède, Saint-Myon, etc. ; à l'est, Chateldon, Saint-Yorre, Cusset et Vichy¹

On est, dès lors, à priori, tenté de supposer que toutes ces sources résultent également d'infiltrations sur les massifs de roches cristallines qui les dominent, infiltrations remontées, suivant ces failles, au contact des marnes et argiles tertiaires, qui les ont empêchées, dans une certaine mesure, de s'épancher latéralement.

Dans cette hypothèse, les nappes artésiennes minéralisées, telles que celle de Saint-Yorre ou celle d'Hauterive (près Vichy), qu'on trouve en divers point du bassin et dont les exemples se multiplieront peut-être de plus en plus avec les essais de sondages, seraient le produit de déversements latéraux dans des strates sableuses ou graveleuses de ce tertiaire, présentant, au contraire, des conditions favorables à la formation de nappes.

Si on entre un peu plus dans le détail, il est à remarquer que toutes ces sources sont fortement chargées d'acide carbonique : ce qui s'explique aisément par la proximité des anciens volcans d'Auvergne et par la présence, fréquemment constatée dans les travaux de mine, notamment à Pontgibaud, de mofettes de ce gaz, restées emprisonnées en profondeur².

À côté de cette propriété commune, ces sources diffèrent, d'ailleurs, beaucoup par la température et la minéralisation : ce dont on rend compte en supposant un trajet plus ou moins long des infiltrations thermales à travers des roches diverses, avant leur remontée sur le même système de fractures.

Voir les feuilles de la carte géologique au $\frac{1}{80.000}$ de Clermont par M. MICHEL LÉVY; de Gannat et Moulins par nous-même. Cf. plus loin, p. 231.

La faille de l'Ouest se prolonge, comme nous avons pu le reconnaître d'une façon très nette depuis la publication de la feuille de Moulins, de Chantelle jusqu'aux environs de Moulins et est souvent jalonnée (vers Saint-Pourçain, etc.) par de gros filons de quartz. On trouve, de même, des filons de quartz sur la faille de Thiers, qui se dirige vers Chateldon et Saint-Yorre.

Ces failles de la Limagne semblent, pour la plupart, antérieures aux éruptions volcaniques ; cependant quelques-unes d'entre elles ont joué entre le pliocène moyen et le pliocène supérieur et même après la coulée des basaltes.

² Voir dans les tableaux II et III, p. 108 et 110, la proportion d'acide carbonique libre dans diverses eaux.

Royat et Châtelguyon sont remarquables par une assez forte teneur en chlorure de sodium : 1,67 gr. à Royat; 1,86 gr. à Châtelguyon, tandis qu'on a seulement 0,56 gr. à Vichy. A Châtelguyon, il faut remarquer, en outre, l'abondance relative du chlorure de magnésium (1,30 gr.). Au contraire, à Vichy, les bicarbonates alcalins atteignent 5,35 gr. dans la source la plus chaude (puits Chomel), contre 1 gr. à Royat.

Il est peut-être permis de chercher une relation entre la présence

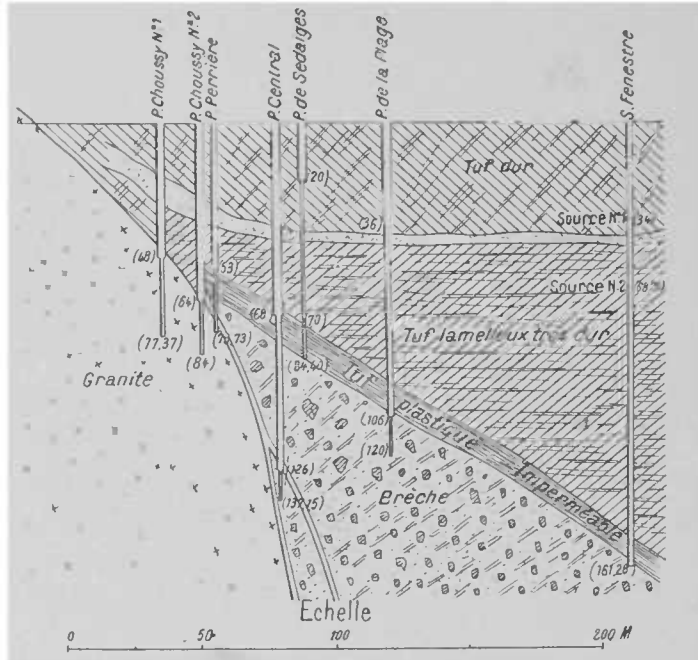


Fig. 6. — Coupe géologique montrant la disposition des sources thermales de la Bourboule (d'après Bonnefoy, in Daubrée).

des chlorures à Royat et Châtelguyon et l'existence, au voisinage immédiat, du stampien supérieur, présentant parfois un caractère lagunaire, marqué par l'existence de dépôts gypseux à Montpensier, Naves, etc.

La dissolution des alcalis contenus dans les feldspaths des roches cristallines et surtout dans les tufs du Culm, près de Vichy, paraît, en outre, avoir été facilitée par la température, qui atteint 33° à Châtelguyon, 34°,2 à Royat, 44° à Vichy (Puits Chomel) et jusqu'à 61°, à 159 m. de profondeur, dans un sondage tout récemment foré entre Vesse et Hauterive.

L'exemple de la *Bourboule* (Puy-de-Dôme) est non moins net.

On a là (fig. 6) le contact par faille du granite avec une brèche et des tufs cinéritiques, dans lesquels est intercalée une couche de tuf plastique imperméable. L'eau thermale remonte par la faille, contenue à sa partie supérieure par ce tuf et se disperse dans une série de cassures du granite, où les sondages vont la chercher.

A *Saint-Honoré* (Nièvre) ¹, on est, comme à Royat ou Châtelguyon, sur la faille limite d'un massif cristallin et des terrains sédimentaires (jurassique inférieur, butant contre les porphyres).

Dans le Briançonnais, d'après M. Lory, on considère comme sortant d'une même faille les sources thermales du *Monestier de Briançon*, de *Brides* et de *Salins* près Moutiers ².

C'est encore sur la faille terminale des Alpes autrichiennes que se trouvent les sources de *Baden*, *Mödling*, *Fischau*, *Vöslau*.

Dans les Pyrénées, c'est un fait presque constant que la présence des sources thermales sur le contact de roches cristallines avec des terrains sédimentaires, ainsi que nous le dirons au paragraphe suivant, et souvent ces contacts anormaux se produisent par failles.

Dans un cas moins net que les précédents, à *Bourbonne-les-Bains* (Haute-Marne) ³, M. Daubrée a admis, avec M. Rigaud, que les sources sortent d'une faille jalonnant le lit de l'Apance et s'infiltrent de là en nappe, au contact des grès bigarrés et des argiles bariolées.

De même, l'origine des sources des *Eaux Chaudes* (Basses-Pyrénées) serait le contact de la syénite et du crétacé, à partir duquel les eaux divergent dans les terrains superficiels.

§ 4. — *Contacts de filons, dykes, ou massifs de roches cristallines avec des terrains sédimentaires.*

Le contact d'un dyke cristallin avec les sédiments qu'il recoupe présente fréquemment, à la circulation des eaux souterraines, une issue tout indiquée. On est là dans des conditions analogues à celles d'une faille : entre des sédiments, pouvant offrir : soit des couches poreuses perméables aux eaux ; soit, tout au moins, des plans de schistosité favorables aux infiltrations et une roche cristalline, rela-

¹ Feuille de *Château-Chinon*, par MM. MICHEL LÉVY et DELAFOND. Voir plus loin, p. 268.

² Feuilles d'Albertville et Saint-Jean-de-Maurienne.

³ SUSS. *Antlitz der Erde*, I, p. 174.

⁴ I, 231. Cf. RIGAUD. (*Ann. d. M.*, 1880, 7^e série, t. XVII.) Voir plus loin, p. 127 et fig. 40 à 42.

tivement compacte et impénétrable (sauf le cas de diaclases superficielles). En outre, l'apparition de ces pointements cristallins correspond, en bien des cas, à un accident de dislocation, qui peut être accompagné de fractures encore ouvertes. Enfin, nombre de ces roches cristallines (le granite, par exemple) se présentent souvent dans les conditions d'un substratum sédimentaire, qui n'apparaît au milieu des terrains plus récents que sur les voûtes anticlinales, et

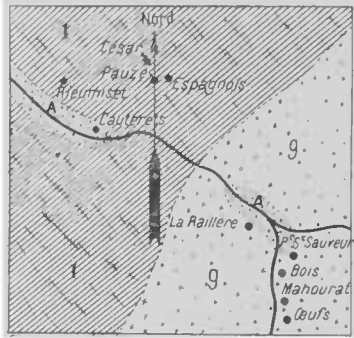


Fig. 7. — Gisement des sources de Cauterets (d'après M. Genreau).

g, granite. — *I*, schistes métamorphiques. — *A*, alluvions.

ces anticlinaux, ainsi qu'on peut le remarquer d'une façon générale pour les sources en rapport avec des plissements, ont bien des raisons pour être généralement favorables à la réapparition des eaux souterraines (cassures plus multipliées, relèvement vers la superficie de roches ayant pu recueillir des infiltrations et les échauffer dans leurs synclinaux plus profonds, etc.).

L'un des exemples les plus typiques de ce genre d'émergences au contact de filons éruptifs se présente pour les sources thermales de *Bagnères-de-Luchon* (Hautes-Pyrénées), que nous décrirons ultérieurement en détail¹. Les travaux de captage de ces sources ont montré, en effet, qu'elles suivaient les contacts de filons granulitiques avec des schistes anciens qu'ils traversent.

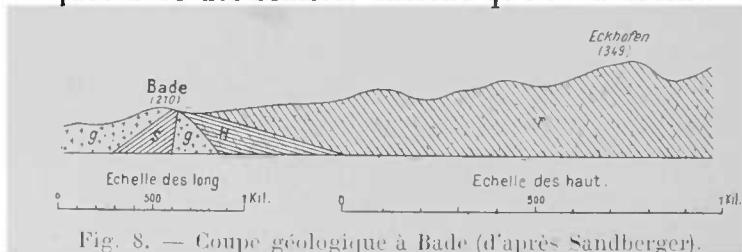


Fig. 8. — Coupe géologique à Bade (d'après Sandberger).

g, roches cristallines, granite et gneiss. — *s*, schistes primaires. — *H*, grès houiller. — *r*, grès rouge (rothliegende).

A *Cauterets* (Hautes-Pyrénées)², les sources thermales sont, de même, presque au contact du granite et des schistes métamorphiques : un premier groupe au sud, sur des diaclases du granite ; un second au nord, dans les schistes métamorphiques (fig. 7).

¹ Voir plus loin, p. 316, et le chapitre sur le captage.

² DAUBRÉE, *loc. cit.*, II, 184. Voir plus loin, p. 317.

Des exemples du même genre se retrouvent, comme nous le verrons, pour la plupart des sources pyrénéennes ¹

À *Bade* ², dans la Forêt Noire, les sources à 67°.5 sont en relation avec un lambeau de granite, gneiss et terrains primaires, intercalé dans le grès rouge (fig. 8).

§ 5. — *Filons d'incrustation.*

Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, le plus grand nombre des sources thermales sortent au jour sur d'anciens filons, marquant ainsi la persistance des circulations hydrothermales suivant les mêmes fractures du sol, qu'elles ont autrefois incrustées de produits métallifères et de gangues.

Il en est même résulté assez souvent (à Freiberg, au Comstock, à Sulphurbank, à la Sierra Almagrera, etc...), la découverte de véritables sources thermales, réalisée en profondeur par l'exploitation minière ³.

Toute source minérale laisse, d'ailleurs, en circulant dans les fissures terrestres, certains dépôts et tend à constituer elle-même des filons : ce qui, par contre-coup, peut amener, pour les fissures minces, où se ramifient souvent les eaux à la superficie, des obstructions locales, donc des déplacements de griffons.

Il semble, dès lors, à première vue, quand une source suit un filon, qu'on ait seulement affaire à la continuation d'un phénomène identique, se poursuivant à travers plusieurs périodes géologiques.

Cette hypothèse peut être admise, même quand la minéralisation actuelle n'a aucun rapport avec la minéralisation du filon, puisque l'étude des filons concrétionnés nous montre constamment des changements successifs dans la minéralisation des eaux, marqués par des bandes alternantes de substances diverses.

Elle paraît, d'abord, encore plus vraisemblable, quand on retrouve en dissolution dans les eaux certains éléments, qui y sont relativement rares, tels que le fluor, la strontiane, le cuivre, le plomb, etc., et qui précisément existent déjà dans le filon où circulent les eaux.

Nous croyons cependant qu'il ne faut pas trop se hâter d'interpréter ainsi les faits observés et que, sans être aucunement illo-

¹ Voir plus loin, p. 308 à 319.

SANDBERGER, *Die Gegend des Baden*, p. 41 ; DAUBRÉE, *Eaux souterr.*, II, 182.

² Voir plus loin, p. 65 et 287.

gique, cette idée n'est point non plus aussi démontrée qu'on le pourrait supposer sans réflexion. Il est clair en effet, qu'une eau chaude, circulant, pendant des centaines de mètres, dans une fente déjà incrustée des mêmes substances minérales, a des chances pour en dissoudre des traces, même quand elle n'en contenait pas à l'origine et que la minéralisation actuelle des eaux, venant sourdre sur l'affleurement d'un filon, peut, par suite, être la *conséquence* de son incrustation ancienne, au lieu d'en être la *cause* prolongée.

Cela nous semble, à vrai dire, plus en rapport avec la façon dont nous envisageons la formation des filons métallifères; car nous croyons qu'il a dû intervenir, au moment de leur remplissage par des métaux lourds, comme le plomb, l'argent, l'or, etc., un phénomène de fumerolles éruptives, qui n'est généralement point en cause dans les sources thermales actuelles, non volcaniques. Et, de plus, il nous paraît peu probable que la même source profonde, à laquelle nous attribuons ces veines métallifères, ait pu se prolonger sans un changement complet, par exemple depuis la période triasique quand le filon date du trias, jusqu'à la période actuelle.

La conclusion est naturellement toute différente pour ceux qui interprètent la formation des filons par la théorie connue du lessivage des roches traversées et de leur sécrétion latérale; mais nous avons exposé ailleurs, en détail, pourquoi nous étions opposé à cette théorie ¹

Ajoutons seulement encore, pour bien préciser, que, tout en croyant à une intervention spéciale et profonde dans la minéralisation des eaux qui ont incrusté jadis les filons métallifères, cette minéralisation des eaux une fois effectuée en profondeur, leur régime et leur mode d'incrustation ont dû être très analogues à ce que nous observons pour les eaux thermales actuelles.

De telle sorte que l'étude des eaux thermales apporte, suivant nous, une précieuse contribution à la connaissance des filons anciens et nous paraît, en particulier, comme nous l'avons déjà dit ², en montrer le côté relativement restreint dans cette portion de l'écorce, qui, au moment du remplissage, était propice à la circulation des eaux par son voisinage de la superficie : le mot « voisinage » étant entendu dans le sens d'une profondeur comparable aux différences de relief les plus fortes de l'écorce terrestre.

¹ *Ann. des mines*, août 1897.

² Voir plus haut, p. 33.

Nous allons passer en revue divers cas de sources thermales en rapport avec des filons et nous tâcherons de multiplier assez les exemples pour bien montrer la grande fréquence, sinon la presque généralité du phénomène.

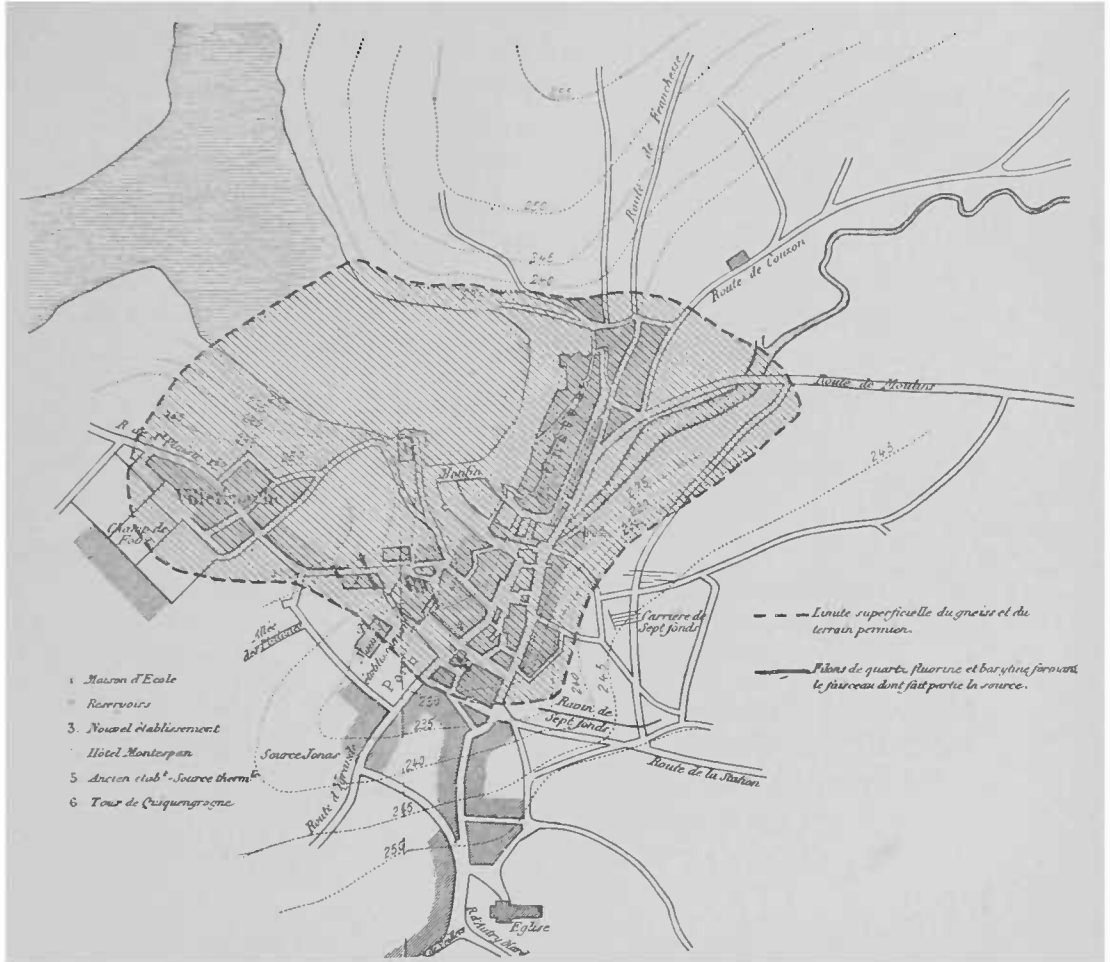


Fig. 9. — Carte géologique des environs de Bourbon-l'Archambault (Allier).

Echelle au $\frac{1}{8\ 800}$.

Prenons d'abord nos exemples parmi les principales sources minérales françaises.

Dans le Plateau Central, les sources de Bourbon-l'Archambault (Allier), de Nérès (Allier) et d'Evau (Creuse), que nous avons spécialement étudiées autrefois¹, rentrent tout à fait dans cette catégorie.

¹ Ann. des mines, juin 1888 et juin 1895.

A *Bourbon-l'Archambault* (fig. 9), le griffon, très nettement déterminé, d'une source thermale à 53°, sort d'un filon de quartz, fluorine, barytine et strontianite, N. 140° E, recoupant un pointement isolé de gneiss granulitisé, qui n'a guère plus de 1 km. de diamètre, au milieu des terrains permien. ¹

A *Néris* et à *Evaux*, soit de 35 à 40 km. plus au sud, les sources sont également sur des filons de quartz, presque exactement parallèles à celui de Bourbon-l'Archambault et faisant partie d'un grand ensemble de fractures N-O.-S-E, perpendiculaires au remarquable décrochement, jalonné par une trainée houillère, qui traverse tout le Plateau Central de Champagnac à Saint-Eloy et Souvigny (fig. 5, p. 56).

Les sources de Néris sont dans le granite ; celles d'Evaux dans le

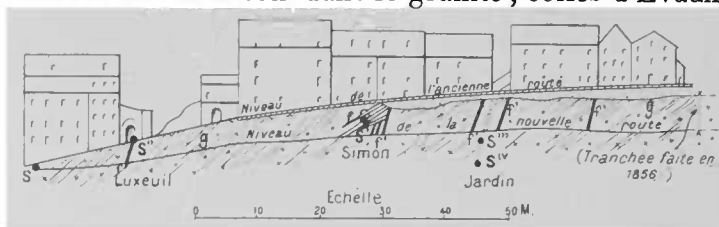


Fig. 10. — Coupe à Plombières (côte de la Gendarmerie) (d'après M. Daubrée), montrant l'association des sources thermales SS avec des filons métallifères *f, f'*, *g*, granite. — *ff'*, veines de fluorine. — *ff'*, veines de quartz. — *S'* source Simon. — *S''*, source de Luxeuil. — *S'''* et *S''''*, sources du Jardin (tarées).

gneiss. Leur température atteint relativement 53° à Néris, 55° à Evaux. On voit donc que, de toute façon, il y a similitude entre ces trois sources thermales, dont la composition chimique présente également des analogies ²

Dans les Vosges, on retrouve un gisement tout pareil à Plombières.

A *Plombières* ³ (fig. 10), il existe, dans le granite à grands cristaux, un faisceau de filons de quartz et fluorine *f, f'* ramifiés dans la roche en véritable stockwerk, le long desquels sortent les sources thermales atteignant 70°.

A *Lamalou*, dans l'Hérault ⁴, des sources thermales, atteignant 47°, sont en relation manifeste avec un faisceau de filons quartzo-

¹ Voir plus loin, p. 256 et fig. 30.

² Voir plus loin, p. 254 et fig. 29.

JUTIER et LEFORT, *Etudes sur les eaux minérales de Plombières*, 1860 ; DAUBRÉE, *Eaux sout.*, I, 280. Voir plus loin, p. 284 et fig. 43. La figure 43 représente à une plus grande échelle, un détail de la figure 10.

DAUBRÉE, *loc. cit.*, I, 282. Voir plus loin, p. 274.

barytiques, autrefois exploités pour cuivre et plomb et dans lesquels il existe des parties bréchoïdes, cimentées par de la barytine de formation plus récente (peut-être même, a-t-on supposé, presque contemporaine).

A *Vals*, dans l'Ardèche¹, les sources thermales bicarbonatées sodiques, riches en acide carbonique et analogues à celles de Vichy, sortent de terre dans des conditions très comparables, à la limite des terrains cristallins et des sédiments (ici, du gneiss granulitique et des terrains secondaires) le long d'un filon de quartz pyriteux, pour s'épancher, au voisinage, en nappe artésienne.

Hors de France, nous pouvons rapprocher des cas de Plombières et de Nérès, ceux de *Karlsbad* et de *Marienbad* en Bohême, sur lesquels nous reviendrons plus tard². Ces sources sont sur des filons quartzeux, remplissant eux-mêmes des diaclases du granite.

Enfin, les travaux des mines rencontrent souvent en profondeur, comme nous le rappelions plus haut, des sources thermales sortant de filons métalliques, qui, dans ce cas, ne sont plus, au point de vue pratique, qu'une gêne pour l'exploitation, mais qui n'en constituent pas moins un fait d'un réel intérêt théorique.

Ainsi qu'il est naturel de le prévoir, ce phénomène est particulièrement fréquent sur les filons d'âge récent ou tertiaire, en relation avec les dernières venues de roches éruptives, puisque les fractures filoniennes de cette époque ont eu moins de temps pour se combler, se consolider et s'unir en un tout homogène avec l'ensemble du massif environnant. Cependant, on en connaît aussi des cas dans des remplissages métallifères, qui semblent plus anciens : notamment à *Freiberg*, en Saxe, où, en 1821, on a recoupé, à 160 mètres de profondeur, dans un filon d'argent, une source à 26° et à *Kautenbach* en Prusse-Rhénane, où un filon de plomb et de cuivre a donné, en 1824, une source à 35°³.

Dans le fameux filon argentifère du *Comstock* aux États-Unis (Nevada)⁴, on a observé un accroissement de la température remarquablement rapide et des venues d'eau chaude, qui, en un point des travaux, atteignent 77° vers 800 m. Il existe, d'ailleurs, à quelques kilomètres de distance, des sources bouillantes, dites *Steamboat Springs*.

DAUBRÉE, *loc. cit.*, I, 283. Voir, plus loin, p. 273.

² Page 291.

DAUBRÉE, *loc. cit.*, I, 285.

⁴ *Gîtes minéraux et métallifères*, II, 793 à 806.

Même phénomène aux mines de mercure de *Sulphur-Bank*, en Californie. Là le cinabre, mêlé de soufre, se trouve dans une colline formée de divers terrains sédimentaires, recoupés par une coulée de basalte et les travaux ont rencontré de nombreuses venues d'eaux chaudes, sulfurées ou bicarbonatées.

Enfin, on a fait des observations semblables aux mines d'argent de la *Sierra Almagrera* dans le sud de l'Espagne ; à *Milianah*, en Algérie, sur un filon de cuivre pyriteux ; à *Huelseton*, près Camborne, en Cornouailles, où une source à 33° jaillit d'un filon stannifère à 292 mètres de profondeur ; à *Takanoku*, au Japon, où des sources à 40° sortent des galeries d'exploitation d'une mine de cuivre, etc.¹.

Voir, sur ces eaux thermales des mines métalliques : POSZEPNY. *Ueber die Genesis der Erzlagerstätten* (Berg. u. Hüt. Jahrb. d. Berg Ak. zu Leoben und Przibram., t. XLIII, 1895).

CHAPITRE II

LIGNES DE MOINDRE PRESSION DE LA SURFACE TOPOGRAPHIQUE

Les diverses catégories de fractures, que nous venons d'examiner, plissements, diaclases, failles et filons, déterminent un premier plan géométrique, par lequel les eaux thermales trouvent une issue rapide et facile vers la surface. Mais ces eaux ne sortent pas indifféremment sur tous les points de la ligne, plus ou moins accidentée, suivant laquelle ce plan recoupe le sol. Là encore elles obéissent à ce grand principe du minimum d'effort, qui, sous une forme plus ou moins déguisée, règle les mouvements des eaux souterraines. Si l'on envisage une coupe longitudinale suivant le plan de la fracture thermale et une ligne de comparaison formée par une horizontale passant au point le plus bas du circuit souterrain, la pression que l'eau aurait à vaincre pour remonter en un point quelconque de la superficie peut être représentée par la hauteur de celui-ci au-dessus de la ligne de comparaison. Il en résulte évidemment que, sauf intervention d'éléments exceptionnels empêchant la libre circulation des eaux le long de la fracture, ces eaux viendront sourdre au point le plus bas du profil, produit par l'intersection du filon et de la superficie.

Nous ne voulons pas dire par là qu'il faille considérer géométriquement cette ligne d'intersection comme indéfinie et chercher, sur une carte, le point le plus bas de son prolongement illimité, pour avoir l'emplacement de la source thermale résultante ; il faut évidemment se borner à considérer la portion de cette fracture pratiquement ouverte et accessible aux eaux, portion généralement très limitée ; mais, dans l'étendue de cette portion, s'il existe un ravin, une vallée, un pied d'escarpement, un rivage, c'est là que se produira la source thermale.

Ce principe, si élémentaire qu'il puisse sembler lorsqu'on

l'expose ainsi, n'a pas toujours été reconnu et on n'en a pas toujours tiré toutes les conséquences logiques, lorsqu'on a eu à entreprendre des captages de sources thermales. C'est pourtant lui qui doit absolument dominer tout plan de captage ; un captage rationnel doit toujours se proposer, à moins d'impossibilités spéciales tenant à la propriété du terrain ou à toute autre cause, de ramener le ou les griffons de la source à leur position logique, c'est-à-dire sur la colonne de moindre pression présentée par le plan de fracture.

Déterminer la source thermale à sortir de son plan de fracture est relativement difficile, quoiqu'on le réalise parfois en allant chercher cette fracture par des travers-bancs et procurant à la source un écoulement plus facile par galerie à un niveau inférieur ; mais, là même, ce que l'on fait alors en réalité, c'est aller capter la source, dans son plan de fracture, à un point plus bas que la superficie. Dans la grande majorité des cas, on captera, au contraire, sur l'émergence de la fracture filonienne, en obligeant, par quelque artifice, les eaux à se rassembler en un point convenablement choisi, où l'on s'arrangera toujours pour que la pression soit moindre qu'en tout autre et, au moyen d'une disposition appropriée, il sera souvent aisé de déplacer la source le long de son plan de fracture.

Par une application du même principe, on peut, à volonté, au moyen de travaux de mine, détourner une source d'un point à un autre, en allant la chercher, d'une manière quelconque, par puits, par galerie, etc., à un niveau inférieur à son niveau actuel, ou simplement l'attirer à soi en la pompant, l'écartant d'un point défectueux en y surchargeant l'émergence de maçonneries, ou, plus simplement, d'une nappe d'eau douce, etc. Ces artifices sont utiles à connaître, aussi bien pour capter rationnellement une source que pour se garder, dans certains cas, contre les manœuvres de voisins concurrents peu scrupuleux et il y a lieu d'en tenir compte dans l'institution des périmètres de protection. Leur étude occupera donc une grande place dans la partie de cet ouvrage consacrée au captage.

Mais, ici, nous nous bornons à examiner ce qui se passe pour la source thermale naturelle, indépendamment de toute intervention artificielle de l'industrie humaine.

Parmi les lignes de dénivellation ou de moindre pression, dont l'intersection avec la fracture filonienne produit un griffon de

source thermale, il y a lieu de citer, tout d'abord, les vallées, gorges et ravins.

Il suffit d'avoir visité quelques stations thermales pour avoir remarqué qu'elles se trouvent, pour la plupart, dans un fond, dans une vallée encaissée, dans un ravin, une gorge, un entonnoir, et les baigneurs, qui ont à les fréquenter, le déplorent le plus souvent, quand la vallée n'est pas large, à cause des inconvénients physiques et pittoresques qui en résultent. S'il existe une rivière au fond de cette vallée, c'est, presque toujours, dans les alluvions de cette vallée, au voisinage du lit de la rivière qui, par sa charge hydrostatique, refoule les filets d'eau chaude vers ses berges, que se trouvent les sources thermales : d'où, en nombre de cas, difficultés pour le captage des eaux thermales dispersées dans ces alluvions.

Citons seulement, comme exemple, les sources de *Pfaefers* dans les Grisons, au fond de la gorge profondément encaissée de la Tamina; celles de *Châteauneuf* (Puy-de-Dôme), dans le lit de la Sioule, dont la vallée est là très abrupte; celles de *Evaux* (Creuse), au fond d'un étroit ravin; celles de *Bourbon-l'Archambault* (Allier), dans un curieux entonnoir topographique, au fond duquel reparait une boutonnière de gneiss, partout ailleurs recouvert par du terrain permien; celles de *Bagnères-de-Luchon* (Hautes-Pyrénées) dans la vallée de la Pique, au pied de la montagne de Superbagnères; celles des *Eaux-Chaudes* et des *Eaux-Bonnes*, dans les vallées du gave d'Ossau et du Valentin, etc.

Un cas plus favorable pour l'établissement d'une grande station thermale est celui où l'émergence se trouve au flanc, ou même au pied d'un vaste massif montagneux, d'où paraissent provenir les infiltrations souterraines, à la limite de ce massif, souvent cristallin et d'un bassin sédimentaire, qui lui succède.

Ainsi les sources situées sur les failles des deux bords de la Limagne, *Royat*, *Chatelguyon*, *Vichy*, etc.; les eaux de *Vals* sur le bord sud-est du plateau central, etc.

Mais, là encore, la faille ne détermine qu'un premier plan hydrothermal, et, pour avoir les sources, il faut chercher ses intersections avec des ravins transversaux, comme la gorge de *Royat*, le cours du Sardon à *Chatelguyon*, la vallée du Sichon à *Cusset*, celle de l'Allier à *Vichy*, etc.

Quand les sources sont situées dans une île restreinte, elles se trouvent généralement toutes à proximité du rivage, entre la masse,

plus ou moins montagneuse, de l'île et la mer, qui exerce, d'autre part, sa pression hydrostatique.

Le fait est des plus nets pour les diverses sources thermales

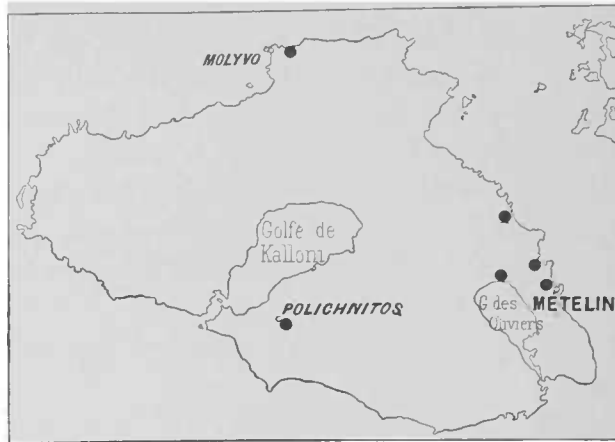


Fig. 11. — Carte des sources thermales de Mételin (Lesbos).

Echelle au $\frac{1}{960\ 000}$.

Les points noirs désignent les sources thermales.

que nous avons étudiées dans l'île de *Mételin*, ou Lesbos (fig. 11)

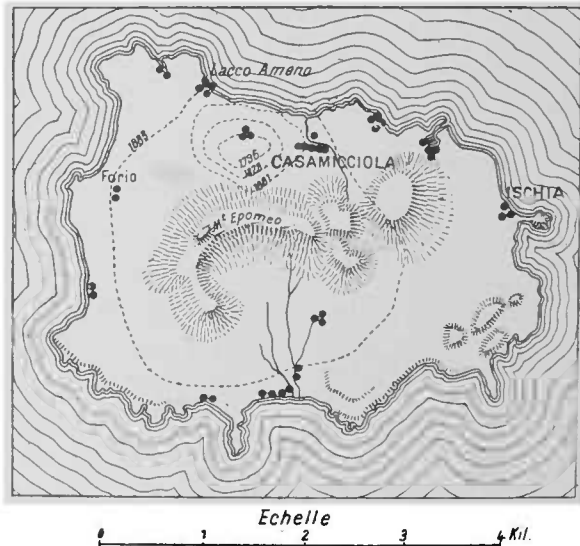


Fig. 12. — Carte des sources thermales d'Ischia (d'après M. Mereati).

Les points noirs désignent les sources ; les quatre courbes portant des millésimes indiquent les surfaces fortement ébranlées par les tremblements de terre de 1796, 1823, 1881 et 1883.

dans l'Archipel, sources chlorurées-sodiques qui lui forment une ceinture.

On le retrouve à *Milo* et *Nisyros* dans l'archipel grec ; à *Ischia*, (fig. 12) autour du volcan de l'Épomeo, qui atteint 800 mètres d'altitude ; à la *Réunion* ; à l'île *Saint-Paul* (fig. 13)¹, où les sources sont localisées à l'intérieur du cratère, envahi par la mer, dont le fond dessine la baie centrale de l'île, etc.

Dans les îles volcaniques, ces sources littorales sont souvent chargées d'acide carbonique ; ailleurs, l'élément minéral, qui y domine, est, presque toujours, le chlorure de sodium, qu'il est naturel d'attribuer à des infiltrations d'eau de mer.

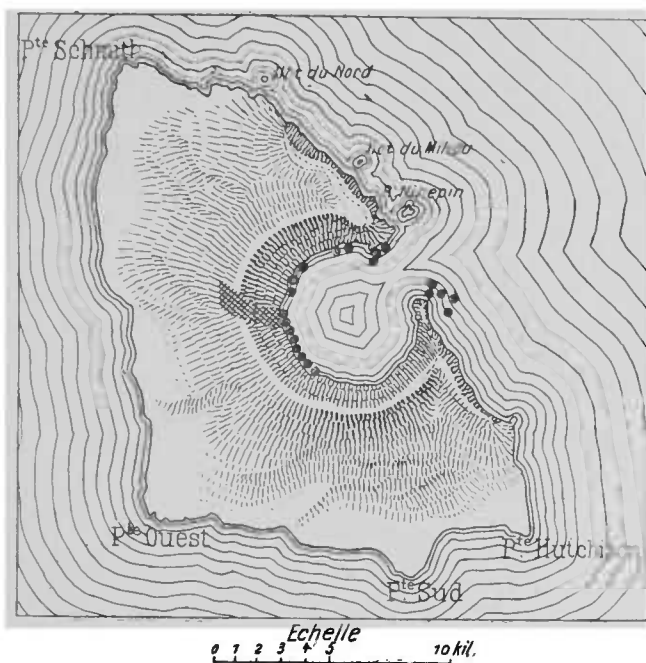


Fig. 13. — Carte des sources thermales de l'île Saint-Paul (d'après M. Vélain).

Les hachures croisées indiquent une zone chaude.

Enfin, les sources des régions volcaniques forment des groupes indépendants et qui, dans une certaine mesure, échappent aux lois précédemment étudiées ; car, là, le sol présente souvent, à la surface même, une température si élevée que le moindre circuit souterrain produit des eaux thermales, parfois en outre fortement minéralisées par les fumerolles ou mofettes et les sels solubles que renferment fréquemment les laves.

Ces sources thermales se relient, par une chaîne continue, aux

¹ VÉLAIN, *Recueils des Mémoires relatifs au passage de Vénus*.

eaux chaudes des solfatares et à celles que rejettent constamment les éruptions volcaniques.

Comme exemples caractéristiques de sources thermales volcaniques, nous citerons seulement celles des environs de Naples et de Pouzzoles ; la ceinture de sources à acide carbonique abondant, qui entoure Puebla, au Mexique ; les geysers d'Islande, ou de Nouvelle-Zélande, etc., etc. Nous aurons, d'ailleurs, l'occasion d'y revenir en détail dans la cinquième partie de cet ouvrage.

CHAPITRE III

VARIATIONS AVEC LE TEMPS DANS LE NIVEAU DES GRIFFONS. — INFLUENCE DE L'ÉROSION SUPERFICIELLE, DES DÉPÔTS ET INCRUSTATIONS, ETC.

Il est un fait, que l'on constate dans un très grand nombre de sources thermales (et particulièrement pour bien des sources carbonatées calciques) et dont il peut être intéressant, à plusieurs égards, d'examiner les causes : c'est l'abaissement progressif des griffons avec le temps¹.

Au voisinage de ces sources on trouve, en effet, à des altitudes diverses, mais parfois très supérieures à celles des griffons actuels, des dépôts, travertins, tufs, veines de calcite, etc., qui témoignent nettement d'une circulation ancienne d'eaux chaudes. Par suite de la tendance naturelle des eaux à sortir de préférence au point de moindre pression, c'est-à-dire, pour les eaux ascendantes thermales, au point le plus bas de la superficie qu'elles puissent atteindre, il paraît, à première vue, dans certains cas, difficile d'admettre que, si cette superficie, sur l'emplacement des griffons actuels, eût été anciennement au niveau où nous la voyons, les eaux fussent venues sourdre en un point plus élevé. La conclusion logique est que l'abaissement progressif des griffons peut avoir souvent suivi le travail de l'érosion et, notamment, si la source est près d'une rivière, le creusement de la vallée : en sorte que les niveaux successifs des dépôts sont alors susceptibles de fournir des points de repère pour l'étude de ce creusement lui-même.

Nous avons eu l'occasion de décrire ailleurs un exemple parti-

¹ Nous n'avons pas besoin de faire remarquer l'intérêt que peut présenter, pour l'histoire des filons métallifères, cette étude directe des modifications de la circulation hydrothermale avec les progrès de l'érosion superficielle, ou de l'incrustation des fissures. Dans ce chapitre, nous allons voir des cas de véritables filons formés sous nos yeux. La question des dépôts et incrustations n'est, d'ailleurs, traitée ici qu'incidemment et fera l'objet d'un paragraphe spécial (4^e partie ; ch. I, § 5, p. 139).

culièrement intéressant (et bien connu historiquement) de ce genre de phénomènes : celui des sources de *Pfäfers-Ragatz*, en Suisse ¹, situées dans le lit de la Tamina, qui correspond lui-même à un ancien lit abandonné par le Rhin. A la suite de ce déplacement, le cours actuel du Rhin s'est creusé de 700 m., puis s'est régularisé, tandis que la Tamina n'a pas encore atteint son niveau d'équilibre et continue à éroder progressivement son lit. Le déplacement des griffons thermaux, qui se sont abaissés avec le niveau du torrent, en continuant à sourdre à peu près sur sa rive, montre que l'érosion a, depuis le xv^e siècle, progressé d'environ 1 m. par siècle.

A *Chatelguyon* (Puy-de-Dôme), nous avons pu faire une observation semblable, mais dont l'interprétation est plus discutable : les sources carbonatées, qui sortent aujourd'hui dans le lit de la rivière le Sardon, arrivent au jour par une fracture inclinée plus ou moins complexe, qui suit environ le flanc gauche du ravin ; sur tout ce flanc gauche, jusqu'à 30 m. d'altitude au-dessus du ruisseau actuel², on voit, à travers les terrains tertiaires profondément métamorphisés, courir des veines d'aragonite et des filons d'ocre brune³ ayant de 0,15 à 0,20 d'épaisseur, qui résultent manifestement d'un dépôt par les sources.

La même remarque peut se faire, dans des conditions presque identiques, à la petite source voisine de *Gimeaux*, où les filons d'aragonite, résultant des incrustations thermales, s'élèvent à environ 15 m. au-dessus de la rivière, des deux côtés.

Des faits du même genre ont, d'ailleurs, été observés en bien des endroits : ainsi à *Karlsbad* (Bohême), où l'on trouve des dépôts d'incrustation jusque dans le haut de la ville, tandis que la principale source actuelle est sur le bord de la rivière, la *Tepel* ⁴ ; à *Piatigorsk* (Caucase), où, d'après M. Dru, les travertins montent à 37 m. au-dessus des sources les plus hautes, etc. ⁵ Dans cette dernière station, on peut voir (fig. 14) comment le niveau des anciens tra-

¹ *Les eaux minérales de Pfäfers*. (Ann. des Mines, fév. 1894, p. 13 et 16 du tirage à part.)

² De la cote 405 à 435. Voir, sur Chatelguyon, p. 259 et fig. 31.

Les dépôts d'aragonite ont incrusté les deux parois de fentes, qui peuvent avoir 0^m,08 à 0^m,10 de large, en laissant au centre un vide, qu'elles n'ont, presque toujours, que partiellement comblé.

⁴ Voir sur Karlsbad, p. 291 et fig. 48.

⁵ *Rapport sur les eaux minérales du Caucase*, 1 vol. in-folio, chez Chamerot, 1884, p. 18.

vertins (reconnaissables à ce qu'ils ne contiennent pas de soufre, comme les récents) est en rapport avec celui des alluvions anciennes. Il ne nous semble donc pas nécessaire de faire intervenir, ainsi que M. Dru l'a supposé, une oscillation du sol (qui, d'ailleurs, a pu, comme nous le verrons, jouer un rôle dans certains cas), alors que l'érosion suffit ici pour tout rendre compréhensible.

La première explication, que nous avons donnée, de ces modifications dans le niveau des griffons, est, cependant, loin d'être la seule et ne paraît pas s'appliquer, par exemple, au cas de Karlsbad.

Il faut, en effet, noter que, comme les sources thermales arrivent au jour sous pression, à l'état artésien, elles peuvent ne

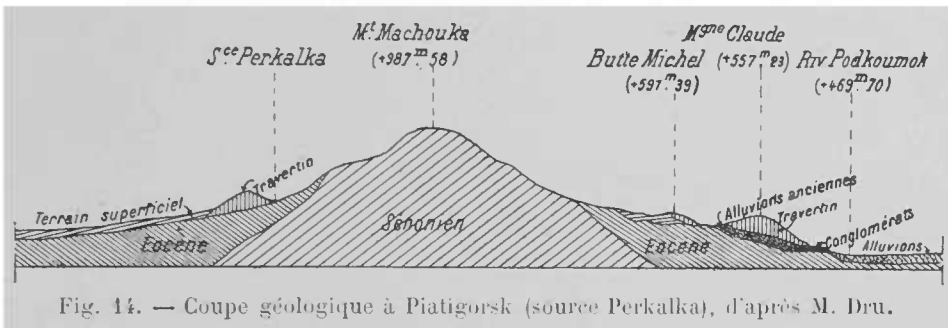


Fig. 14. — Coupe géologique à Piatigorsk (source Perkalka), d'après M. Dru.

pas sortir seulement au point le plus bas de la fracture, mais aussi, et en même temps, par suite de circonstances locales (comme on le constate notamment à Karlsbad, Plombières, etc. ¹), en quelques points situés à un niveau supérieur sur celle-ci. On est donc amené à se demander, quand on voit ainsi la preuve d'une ancienne circulation hydrothermale au-dessus du point d'émergence actuelle, si ces griffons supérieurs, utilisés autrefois, n'ont pas été simplement obstrués par les incrustations résultant du passage prolongé des eaux thermales, tandis que les griffons inférieurs, parcourus par une eau à plus forte pression, résistaient plus longtemps à cette obstruction. C'est ce que semblerait prouver, par exemple le cas de Karlsbad, où l'on a pu remettre en activité divers griffons du haut de la ville, en rouvrant mécaniquement leurs fissures.

L'arrêt des sources supérieures, alors que les sources inférieures continuent à jaillir, pourrait être également, dans une certaine mesure, attribué à une diminution progressive de la force ascendante de l'eau par un appauvrissement en gaz, accentué avec le

¹ Voir plus loin, p. 81 et 291.

temps : cette eau n'étant plus aujourd'hui capable d'alimenter les sources du haut, tandis qu'elle atteint encore les griffons du bas.

En particulier, dans les eaux bicarbonatées, où le carbonate de chaux est maintenu en dissolution à la faveur d'un excès d'acide carbonique libre et se dépose par suite de son dégagement, la précipitation de ce sel doit surtout se faire au voisinage de la surface, dans les parties hautes de la fracture, qui sont, dès lors, probablement les premières à s'obstruer ; d'autant plus que l'eau y arrive, comme nous venons de le remarquer, avec une pression moindre.

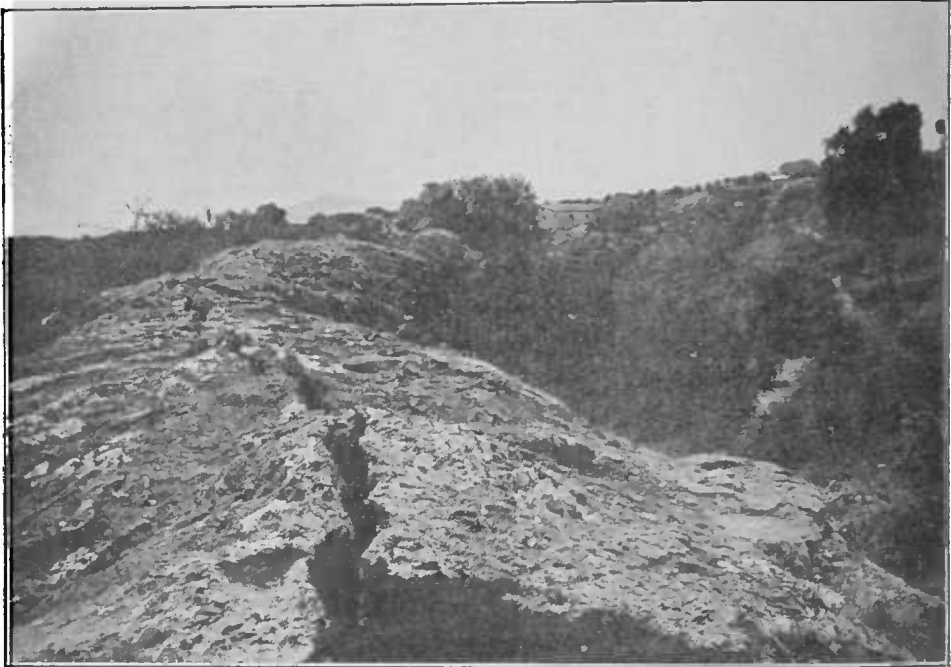


Fig. 15. — Hammam-Meskoutine. Incrustations calcaires en dos d'âne.

Un commencement d'incrustation dans ces parties hautes, joint au supplément de charge que les eaux ont à vaincre pour y accéder, doit y arrêter plus vite l'afflux des eaux. Cette influence, agissant dans le même sens que l'érosion progressive de la superficie, peut amener, pour les sources thermales suintant dans des vallées encore en creusement, un abaissement progressif du griffon.

Inversement, mais par un phénomène connexe, on remarque, sur un très grand nombre de sources chaudes à dépôts calcaires ou siliceux, la formation progressive de sortes de colonnes, de cheminées, de champignons, qui commencent par s'élever peu à peu

sur le griffon de ces sources, jusqu'au moment où les eaux ne peuvent plus en sortir et y séjournent comme dans des vasques : ce qui amène généralement l'obstruction superficielle de la colonne d'émergence et, par suite, le déplacement de la source thermique, qui va chercher ailleurs une issue plus facile ou même disparaît complètement.

Les sources fameuses d'*Hammam-Meskoutine* (province de

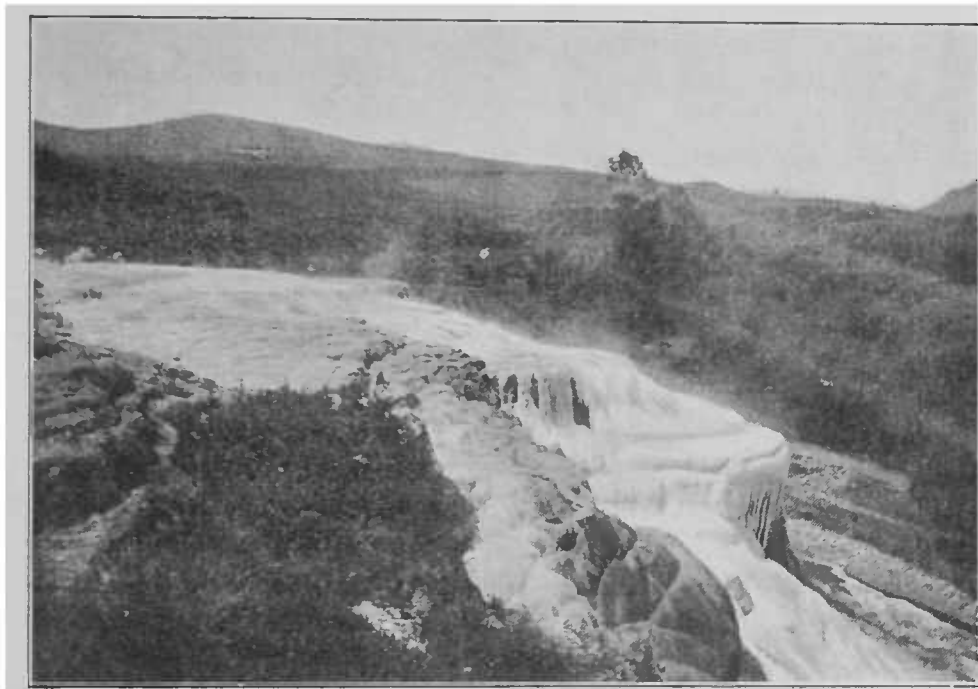


Fig. 16.—*Hammam-Meskoutine*. Cascades pétrifiées, vues d'en haut et sources actuelles (reconnaissables à la vapeur qui s'en dégage).

Constantine), en Algérie, donnent un exemple remarquable de ce genre de phénomènes.

Les photographies que nous en avons prises et que nous reproduisons ici (fig. 15 et 16) montrent deux des aspects de ces dépôts calcaires ¹.

L'une représente un dos-d'âne, qui s'est formé sur une fissure thermique et le long duquel existe une longue crevasse, qui semble résulter d'une réouverture.

Sur le prolongement de ce dos-d'âne se dressent une série de

¹ Voir également des photographies dans DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, II, p. 23 et 24.

cônes de diverses hauteurs, généralement terminés en pointe au sommet et l'on arrive à de véritables cascades pétrifiées, formées d'une succession de vasques superposées en gradins d'escaliers, dont nous voyons la partie supérieure sur la figure 16.

Des apparences identiques se reproduisent pour les terrasses calcaires d'Hierapolis en Asie-Mineure, pour celle du Parc national des États-Unis, accompagnées de nombreuses cheminées de travertins, etc., et, sans même d'intervention hydrothermale, de simples eaux calcaires peuvent en réaliser, ainsi que nous l'avons constaté, avec notre ami M. Martel, dans la rivière souterraine de Padirac (Lot) ¹.

De même pour certains geysers d'Islande, du Parc National et de Nouvelle-Zélande, où des cônes analogues sont formés, non plus de carbonate de chaux, mais de silice ².

Les dépôts de carbonate de chaux s'expliquent aisément par le dégagement de l'acide carbonique, et ceux de silice par une réaction des vapeurs acides sur les eaux calcalines; mais, dans les deux cas, on a généralement admis l'influence d'organismes végétaux, algues, mousses, etc., qui ont peut-être surtout pour effet de fournir des supports aux sels précipités et de multiplier les surfaces d'évaporation.

Il est certain qu'aux environs de Tivoli on a trouvé 50 p. 100 d'algues microscopiques dans les travertins et, dans les geysers du Yellowstone-park, la présence de certaines algues gélatineuses rend le dépôt de silice trente fois plus abondant.

Quant aux formes de cheminées, de tubes, ou de barrages circulaires, de *gours*, que prennent parfois ces dépôts, soit calcaires, soit siliceux, on en conçoit aisément le mode de construction.

L'eau incrustante, sortant d'un orifice circulaire, dépose, autour de l'orifice, un enduit, par dessus lequel elle est obligée de passer pour continuer à s'écouler. Sur cette première couronne de dépôt s'en ajoute ainsi une seconde et, progressivement, la source se construit à elle-même une sorte de tube piézométrique, jusqu'au moment où elle ne peut plus passer par dessus le rebord, que toutes sortes de circonstances accidentelles (bouillonnement, jet d'eau momentané, etc.) ont eu pour effet de faire monter légèrement au-dessus du niveau hydrostatique normal.

Tour du Monde, décembre 1890.

Voir une photographie dans DAUBRÉE, *loc. cit.*, II, 14.

Par un phénomène d'un autre genre, dont la conséquence première est analogue, si des éboulis ou des alluvions viennent recouvrir le griffon d'une source thermale, ainsi que cela s'est passé dans bien des cas, entre l'époque des captages romains et notre temps, la source thermale, à la condition que sa pression hydrostatique soit suffisante, peut se frayer un chemin dans des terrains meubles, vers un orifice plus élevé. Mais ce n'est jamais sans une perte dans le débit et, bien rarement, sans une diminution dans la minéralisation et la thermalité.

Enfin, nous avons fait allusion plus haut, à propos d'une source du Caucase, à la possibilité d'un déplacement de griffons sous l'influence d'oscillations du sol. Sans remonter aux grands bouleversements dynamiques des époques géologiques anciennes, c'est un phénomène qui peut se produire même de nos jours, en particulier dans les régions volcaniques. Bien des observations montrent, de plus, qu'après des tremblements de terre les sources thermales peuvent changer de point d'émergence, mais toujours à de faibles distances. C'est un fait sur lequel nous reviendrons dans un chapitre spécial ¹.

¹ Page 198.

CHAPITRE IV

MULTIPLICITÉ DES SOURCES DANS UNE MÊME STATION THERMALE

Quand nous avons étudié, dans un paragraphe précédent, l'émergence des sources thermales, nous avons montré qu'elles se trouvaient définies, en théorie, d'une façon assez précise, par l'intersection d'une fracture génératrice et d'une ligne de moindre pression du sol. Mais, en réalité, comme nous l'avons déjà indiqué à ce moment, il est très rare qu'une source thermale unique se présente isolément, comme cette théorie trop simple le ferait prévoir, et l'on a, au contraire, en un même point géographique, des groupes de sources, plus ou moins rapprochées les unes des autres, dont on est plutôt porté, par un sentiment qui se conçoit, à exagérer qu'à diminuer le nombre.

Ces sources peuvent, au point de vue médical, présenter des différences très tranchées ; car de faibles variations dans la température, dans la composition chimique, dans la proportion d'eau superficielle mélangée à l'eau thermale, dans le degré d'altération des sulfures, dans la réduction des sulfates, etc. ont, à cet égard, une importance souvent notable¹. Géologiquement, elles n'en constitueront pas moins, dans la presque totalité des cas, une seule venue profonde, épanchée, à une distance plus ou moins grande du griffon principal, par des fissures ou des interstices superficiels et plus ou moins refroidie par de l'eau douce.

Nous venons, d'ailleurs, de voir incidemment, dans des paragraphes antérieurs, comment cette multiplicité apparente de griffons, correspondant à un même filon hydrothermal, peut s'expliquer, soit par les diaclases, ainsi que nous en avons signalé des cas à Ems, à Géleznovodsk, à Karlsbad, à Marienbad, etc., soit par

¹ C'est ainsi qu'à Luxeuil et à Vittel des griffons, éloignés de quelques mètres et provenant incontestablement de la même colonne ascendante d'eau minérale, ont une composition chimique très différente.

une dispersion encore plus fréquente dans les alluvions et les éboulis des vallées, des flancs de côteaux, ou des rivages, qui forment, pour des raisons exposées plus haut, le gisement ordinaire des sources thermales.

Il en résulte qu'un groupe de sources, constituant une station thermale, pourra être représenté logiquement dans nos études par les sources les plus chaudes et les plus fortement minéralisées du groupe, toutes les autres n'en étant que des dérivations secondaires ; ces sources particulièrement chaudes marqueront, en même

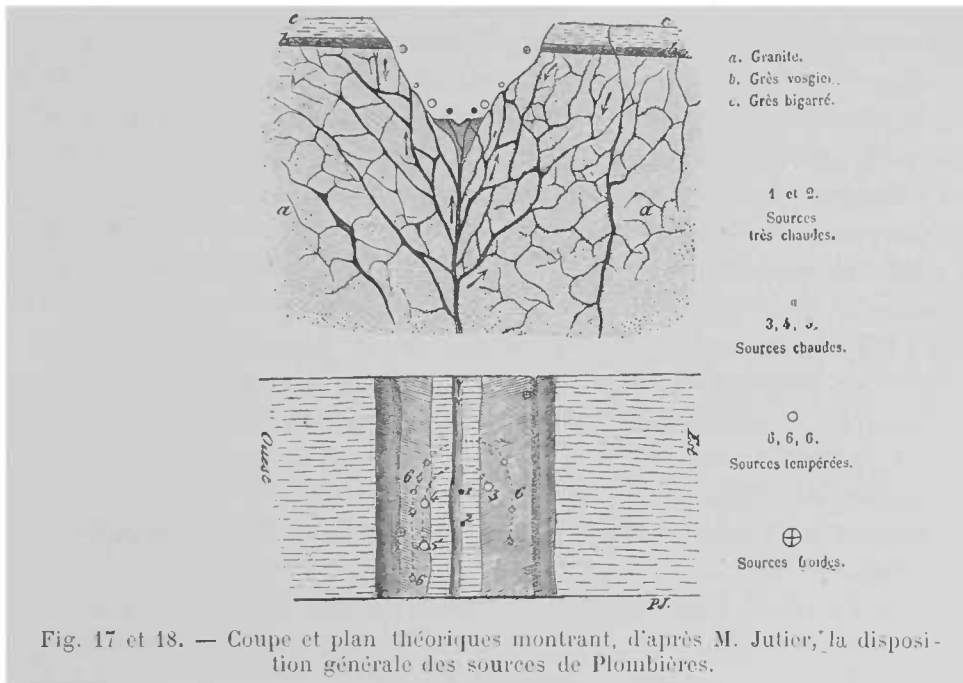


Fig. 17 et 18. — Coupe et plan théoriques montrant, d'après M. Jutier, la disposition générale des sources de Plombières.

temps, la place et parfois la direction de la fracture, par laquelle les eaux thermales remontent de la profondeur.

Nous pourrions multiplier les exemples de ce fait ; nous en citerons seulement quelques-uns, qui nous paraissent bien montrer le mécanisme ordinaire du phénomène.

A *Plombières*,¹ on a distingué, depuis longtemps, trois groupes de sources, composées identiquement des mêmes principes et d'autant plus minéralisées qu'elles sont plus chaudes :

1° Les sources très chaudes, 1 et 2 (fig. 17 et 18) à plus de 62° (Bain Romain, d'Enfer, Vauquelin, etc.) ;

Voir plus loin, page 284.

SOURCES THERMO-MINÉRALES.

2° Les sources chaudes, 3, 4, 5, à température de 49 à 55° (Capucins, Crucifix, Dames) ;

3° Les sources tempérées, 6, de 13 à 33 degrés, dites aussi savonneuses à cause de leurs dépôts d'halloysite.

Or, il se trouve que la disposition de ces sources est celle qu'indiquent les figures ci-jointes, dues à M. Jutier, c'est-à-dire que les sources très chaudes sont au fond du thalweg, les chaudes sur une ceinture un peu plus élevée et les tempérées sur un cercle plus étendu, concentrique au précédent, de 8 à 20 m. plus élevé.

Cette disposition est trop régulière pour qu'il ne faille pas voir, dans les chaudes et les tempérées, le résultat d'infiltrations secondaires dans le granite, mélangées d'eau froide. On peut alors remarquer que chacune de ces ceintures tempérées et chaudes constitue, en vertu du principe des pressions hydrostatiques réciproques, que nous exposerons plus loin, une sorte de ligne de défense autour des sources principales, en concentrant celles-ci dans le thalweg et rejetant les eaux froides au dehors.

D'après une série d'observations de M. Jutier, qu'il y aurait lieu de discuter, la force ascensionnelle de l'eau thermale correspondrait, d'ailleurs, à peu de chose près, à leur écoulement naturel au fond du thalweg ¹ et les sources plus élevées résulteraient seulement d'un circuit superficiel d'eaux froides, descendues au contact des eaux thermales et s'y étant à la fois échauffées et minéralisées.

A *Karlsbad*, l'eau chaude², qui afflue par des diaclases du granite, fournit, de même, un grand nombre de sources, qui vont en se refroidissant, à mesure qu'on s'éloigne de la source principale, le Sprudel, située dans la vallée ; mais, là, l'eau thermale arrive avec une force ascensionnelle considérable, qui lui permet de monter, sans perte sensible de chaleur, jusqu'à des émergences plus élevées sur le flanc du coteau.

A *Evaux* (Creuse), comme nous l'avons dit ailleurs³, un grand nombre de sources sortent dans une tranchée d'environ 60 m. de

Loc. cit., p. 121. M. JUTIER considère, comme un argument déterminant en faveur de sa thèse, le fait que le débit augmente fortement en abaissant le niveau d'écoulement ; mais, c'est là un fait qui est, comme nous le verrons (p. 177), général et qui s'explique théoriquement.

¹ Voir pages 74 et 291.

² *Ann. des Mines*, juin 1895. Voir plus loin, page 254 et fig. 29.

long et de large ; il est certain qu'elles viennent d'une fracture principale située à l'amont et, plus on s'éloigne de celle-ci, plus la force ascensionnelle diminue, en même temps que la minéralisation et la thermalité décroissent.

Les sources thermales uniques ne se présentent guère — et cela confirme la théorie précédente — que lorsque la fracture se trouve dans une roche compacte et résistante, affleurant à la surface du sol : ainsi à Bourbon-l'Archambault, Néris, etc.

Nous pouvons, à cette occasion, signaler de suite, entre les sources d'une même catégorie, des groupements géographiques à plus grande distance que ceux dont il vient d'être question : ainsi la concentration des sources à acide carbonique libre en certaines régions d'Auvergne, de la Forêt Noire, de Bohême, etc. ; celle des sources sulfurées sodiques dans les Pyrénées, des sources chlorurées au voisinage de terrains triasiques ou tertiaires, etc. C'est un phénomène d'un ordre tout différent, auquel nous consacrerons tout un chapitre ultérieur et dont nous essayerons alors de donner l'explication.

QUATRIÈME PARTIE

PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES DES EAUX THERMO-MINÉRALES ET EXPLICATION DE CES PROPRIÉTÉS

CHAPITRE PREMIER

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX THERMO-MINÉRALES. SELS EN DISSOLUTION ET GAZ

La composition chimique des eaux thermo-minérales est, de toutes les questions qui touchent à notre sujet, celle qui a suscité le plus grand nombre de travaux et donné lieu aux études les plus minutieuses¹. Il était naturel, en effet, de chercher, dans la reconnaissance des éléments chimiques tenus en dissolution par les eaux, l'explication la plus logique et la plus simple de leurs propriétés médicinales.

A ce titre, les substances les plus intéressantes sont souvent celles qui se présentent en quantités très minimes et qui, dans une analyse donnée sans commentaire, risqueraient de passer inaperçues. Aujourd'hui, après les derniers progrès réalisés en métallurgie par l'addition de traces infinitésimales de certains métaux, après la révolution produite en médecine par les découvertes de Pasteur, l'action des infiniment petits et des dissolutions extrêmement diluées, en quelque sorte homéopathiques, n'est plus discutable : ce ne sont souvent pas les gros bataillons qui triomphent, mais les combattants disséminés, prêts à s'introduire dans les moindres interstices intramoléculaires. On peut donc se demander si le dernier mot est dit en fait d'analyse des eaux thermales et si l'avenir ne nous réserve pas, de ce côté, quelque surprise pareille

¹ Il ne peut entrer dans notre plan de donner ici les procédés d'analyse employés pour les eaux minérales ; c'est là une question de pure chimie, que l'on trouvera traitée dans divers ouvrages spéciaux. Consulter notamment le beau *Traité d'analyse des substances minérales* de M. Carnot, en cours de publication (Dunod, 3 vol. in-8°).

à la rencontre de l'argon et du krypton dans l'air : la découverte de principes chimiques encore insoupçonnés, dont la présence expliquerait les propriétés assez étonnantes observées par les médecins dans certaines sources, comparables, pour leur composition apparente, à de l'eau distillée.

Cette réserve faite, on possède, pour les sources thermo-minérales des principaux pays du monde, des séries d'analyses innombrables, qui, notamment pour la France, sont résumées dans un ouvrage important de MM. Jacquot et Willm¹. Le classement même des substances dissoutes par sels, avec la mention des différentes sources où chaque sel se rencontre, a été l'objet d'une longue étude de M. Daubrée².

C'est donc un ordre de faits, sur lequel on nous permettra d'être assez bref et nous ne rappellerons que sommairement des faits déjà vulgarisés, pour nous attacher plutôt à en tirer certaines conclusions et certaines idées générales nouvelles.

Les eaux thermales, en raison même du circuit accompli souterrainement, tiennent en dissolution des éléments chimiques recueillis sur leur passage, soit qu'elles les aient trouvés à l'état solide dans les roches et les terrains, soit, plus exceptionnellement, qu'ils leur aient été apportés sous forme de fumerolles volatiles. Nous donnerons bientôt une liste de ces éléments, que les analyses reconnaissent isolément et dont le groupement par sels reste toujours un peu hypothétique ; ils comprennent, comme on le verra, à peu près tous les corps de la chimie et même ceux qui ne se rencontrent guère que dans les filons métallifères. Il nous paraît cependant indispensable, avant d'aller plus loin, de remarquer que ce rapprochement entre la composition des eaux thermales et celle des filons métallifères, mis parfois en relief par des listes placées côte à côte, n'est guère qu'apparent, surtout si on laisse de côté les sources en relation avec les phénomènes volcaniques.

En réalité, les produits en dissolution dans les eaux thermales ne peuvent pas ne pas se distinguer de ceux rencontrés dans l'in-

Eaux minérales de la France. Etudes chimiques et géologiques (Baudry, 1894).

DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, II, p. 1 à 135.

M. POSZEPNY a donné incidemment, dans un mémoire récent : *Über die Genesis der Erzlagerstätten* (Berg u. H. Jahrb. der Berg. Ak. zu Leoben und Przibram, etc. t. XLIII, 1895), une étude chimique sur quelques eaux thermales, avec des analyses portant sur celles qu'ont rencontrées des travaux de mines à Joachimsthal, au Comstock, à Sulphurbank, etc., et un examen de leur dépôts.

Voir encore, sur les questions : STRUVE, *Über Nachbildung der natürlichen Mineralwasser*; LUDWIG, *Die natürlichen Wässer* (1 vol., Erlangen, 1862).

crustation des filons métallifères, précisément pour cette raison majeure que les premiers représentent la partie la plus soluble des sels contenus dans l'eau thermale, tandis que les seconds en sont, par hypothèse, les parties précipitées. Donc, pour avoir chance de retrouver des produits réellement analogues à ceux de nos eaux thermales actuelles, il aurait fallu analyser autrefois les eaux qui s'échappaient par le griffon des fractures, où nous exploitons aujourd'hui des filons métallifères.

Mais, en outre, si l'on considère les dépôts ordinaires de nos sources thermales actuelles, ils sont généralement fort différents de ceux qui remplissent les filons, où nous allons chercher les métaux et se composent, dans la grande majorité des cas, d'un très petit nombre de substances, toujours les mêmes : carbonate de chaux, silice, peut-être barytine, oxydes de fer et de manganèse, réalgar, etc.

Seuls, ceux des régions volcaniques s'en rapprochent accidentellement et contiennent parfois quelques métaux proprement dits : mercure, plomb, cuivre, etc. : ce qui correspond avec la théorie que nous avons exposée ailleurs sur la formation des gîtes métallifères et dans laquelle nous attribuons un rôle important aux fumerolles volcaniques.

On peut, en outre, sans préjuger ce qui sera dit plus loin sur l'origine des éléments dissous dans les eaux, remarquer que la composition chimique des eaux thermales est, presque toujours, intimement liée à la constitution géologique de la région avoisinante et que celle-ci permet souvent même de prévoir la nature des eaux thermales qu'on y rencontre : ce qui est indirectement la meilleure preuve de nos hypothèses. Ainsi, dans les terrains sédimentaires non métamorphiques, les eaux trouveront, en général, beaucoup d'éléments à dissoudre, puisque ces terrains, par définition même, sont le résultat d'une première trituration aqueuse et d'une précipitation, au moins en partie chimique, dans un bassin lacustre ou marin. Les métaux légers ou oxydables, à sels facilement solubles, tels que les sels alcalins ou alcalino-terreux, s'y présenteront, par suite, sous une forme toute préparée pour une redissolution et facile à remettre en mouvement. Le plus souvent, on aura des carbonates de chaux, magnésie, fer ou manganèse ; les alcalis plus solubles ayant été concentrés par évaporation dans certains points restreints, sous forme de chlorures, associés avec du sulfate de chaux, que la réduction par les matières organiques

pourra ramener à l'état de sulfure. On devra donc s'attendre à rencontrer, dans les terrains sédimentaires : des eaux simplement calcaires ou ferrugineuses, des eaux salées ou gypseuses, et des eaux sulfurées calciques, à moins, cela va de soi, que l'abondance de l'acide carbonique, ayant une origine quelconque, ne permette la dissolution facile d'alcalis restés à l'état de silicates dans certaines arkoses des rivages lacustres et ne donne, par suite, des eaux à carbonates alcalins.

Ces eaux, dans les parties peu disloquées, seront froides ; dans les régions alpestres, elles pourront, au contraire, être chaudes.

Les roches cristallines et les terrains anciens métamorphiques ne contiennent pas leurs éléments sous une forme aussi directement soluble et, par suite, les eaux superficielles froides y sont plus pures ; mais les régions, où se trouvent ces roches, étant souvent très fissurées, coupées de filons, etc., présenteront parfois des sources très chaudes, ayant, à la faveur de leur thermalité, dissous certains éléments de ces filons ou de ces roches. Ces eaux ne deviendront très minéralisées que dans deux cas : ou bien, lorsque leur circulation les amène au contact de pyrites et autres sulfures abondants : ce qui, par des réactions chimiques complexes, amène la dissolution des alcalis des roches à l'état de sulfures (cas assez fréquent dans les schistes anciens, notamment dans les Pyrénées) ; ou, lorsque le voisinage de massifs volcaniques récents a laissé le sol pénétré d'acide carbonique, qui produira des sources acidulées, comme celles d'Auvergne, de Bohême, de Toscane, etc.

Enfin, la proximité des volcans en activité amène, outre une température élevée du sol, l'abondance des dégagements gazeux, des fumerolles plus ou moins acides et produit, par suite, dans les eaux qui rencontrent ces fumerolles, certaines minéralisations exceptionnelles, telles que l'acide borique abondant, ou des métaux lourds, comme le mercure, le plomb, le cuivre, etc.

Nous allons maintenant examiner, tour à tour, les divers points suivants :

§ 1. — Eléments chimiques reconnus dans les eaux thermo-minérales.

§ 2. — Proportion des divers éléments contenus dans les eaux et groupement hypothétique de ces éléments par sels. Classification des eaux thermales d'après les principes chimiques dominants.

§ 3. — Gaz des eaux thermo-minérales.

§ 4. — Origine des principales substances et des gaz contenus

dans les eaux thermo-minérales. Relation de la nature des eaux avec celle des roches du voisinage.

§ 5. — Dépôts formés par les eaux thermales. Incrustation des griffons. Boues et corrosion produite sur les chenaux souterrains.

§ 6. — Réactions chimiques exercées par le contact prolongé des eaux. Production de minéraux artificiels.

§ 1. — *Éléments chimiques reconnus dans les eaux thermo-minérales.*

Ainsi que nous le faisons remarquer tout à l'heure, on a dressé de longues listes des éléments chimiques reconnus dans les sources thermo-minérales et on est arrivé, un peu artificiellement, à y retrouver la plupart des métaux. Nous insisterons surtout, au risque de quelque disproportion dans les développements, sur la présence de ceux qui y sont le plus inattendus ou qui donnent lieu à des discussions théoriques ; pour les autres, il nous suffira de renvoyer à tous les traités de géologie, sans reproduire ici des énumérations quelque peu fastidieuses.

Prenons d'abord les métalloïdes.

Le *soufre* existe fréquemment à l'état de sulfure de sodium, de sulfate de soude et accessoirement d'hyposulfite dans les eaux des Pyrénées (0,076 gr. par litre à Bagnères-de-Luchon, source Bayen) ; on le retrouve abondamment à l'état de sulfure de calcium, ou de sulfate de chaux, dans les sources en relation avec des dépôts de gypse, à l'état de sulfate de magnésie ou de soude dans celles qui ont traversé des dépôts salifères.

On rencontre de l'hydrogène sulfuré et de l'acide sulfureux dans les émanations volcaniques, solfatares, etc., de l'acide sulfurique libre auprès de divers volcans, etc.

Le *sélénium* est associé au soufre, probablement à l'état de séléniate d'ammoniaque, dans des produits volcaniques (Lipari, etc.).

Le *chlore* forme de très nombreux chlorures de métaux alcalins, de calcium, de magnésium, etc., qui deviennent particulièrement abondants dans les eaux ayant rencontré des dépôts salifères ; l'acide chlorhydrique accompagne parfois l'acide sulfurique.

Le *brome* se trouve à l'état de bromures de magnésium, de sodium, etc. (Nauheim, Cauterets, etc.¹).

L'*iode* est très répandu, même dans les eaux douces, où divers organismes, et spécialement des plantes, ont la propriété d'en fixer les moindres traces. On retrouve des iodures alcalins dans les eaux salines. L'eau de Vichy présente des traces d'iode.

Le *fluor*, reconnu d'abord par Berzelius à Karlsbad, a été signalé à Plombières, Contréxeville, ainsi qu'à Vichy, Néris, Bourbon-l'Archambault, où les chimistes successifs ne sont pas toujours d'accord pour le rencontrer²; à Karlsbad et à Plombières, il a produit, d'après Daubrée, des dépôts récents de fluorure de calcium.

La présence du *phosphore* est intéressante à mentionner, à cause des discussions auxquelles a donné lieu la formation de certaines phosphorites. Ce corps est fréquent, d'après Daubrée³ mais toujours en petites quantités, sous forme de phosphate tricalcique de chaux et de phosphates de soude, d'alumine, peut-être aussi de phosphate ammoniac-magnésien. A Vichy (Grande Grille) M. Willm compte 0,0028 gr. de phosphate disodique. La proportion en est toujours très faible.

L'*arsenic* paraît jouer un rôle notable à la Bourboule (0,0155 gr. d'arséniate de soude), à Saint-Nectaire (0,0027 gr. d'arséniate de fer) et dans diverses autres sources d'Auvergne, ainsi que dans des régions volcaniques (Pouzzoles, etc.); on en retrouve des traces à Plombières, à Vichy, à Lamalou, etc.

L'abondance du *carbone*, soit à l'état d'hydrocarbure dans les sources bitumineuses ou pétrolifères, etc., soit à l'état d'acide carbonique, est tellement connue qu'il suffit de la rappeler.

Le *bore* est abondant, sous forme d'acide borique, dans les sulfoni de Toscane et se retrouve fréquemment dans les eaux géysériennes d'Islande, du Yellowstone-Park, ainsi qu'à Sulphur bank, aux Steamboat Springs, etc. Mais il n'existe pas seulement, comme on l'a souvent cru, dans les régions volcaniques. M. Dieulauf, qui avait fait de cette question une étude approfondie, l'avait retrouvé dans la plupart des sources chlorurées⁴ et le considérait,

¹ M. de Gouvenain l'avait signalé à Vichy et à Bourbon-l'Archambault, où M. Willm ne l'a pas retrouvé.

DE GOUVENAIN (*Ann. des Mines*, 7^e sér., t. III, p. 39, 1873); WILLM (*Rec. des Travaux du comité consult.*, t. XII, p. 311).

³ *Eaux souterr.*, II, 9.

⁴ (*Ann. Chimie et Physique*, 1882, p. 143). Il suffit de rappeler le cas des grands

dès lors, comme ayant, dans les eaux, la même origine que le chlorure de sodium : ce qui, pour des cas tels que celui des Soffioni, nous semble une exagération en sens inverse de celle des volcanistes à outrance.

Il avait constaté sa présence notamment à Salies, Dax, Pouillon, Gaujacq, Briscous, Oraas, Aincille, Camarade, dans les Pyrénées ; à Salins et Montmorot, dans le Jura ; à Tarasp et Saint-Moritz (Engadine) ; à Castellane, Moriès et Gevaudan (Basses-Alpes) ; à Gréoulx, Digne, Uriage (Isère) ; Birmenstorff et Wildegg (Suisse) ; Friedrichshall, Hombourg, etc.

A *Salies*, en particulier, dans les Basses-Pyrénées, on utilise les eaux-mères, obtenues par concentration à feu nu des eaux naturelles, après que le sel industriel en a été précipité.

M. Dieulafait a attiré l'attention sur leur teneur très forte en acide borique : 0,16 gr. par litre d'eau-mère, correspondant à 16 ou 20 litres d'eau naturelle. Les sources de Salies donnant 130 m³ d'eau par jour, il en a conclu que les seules sources de Salies fournissaient 400 kil. d'acide borique par année et, par suite, auraient pu, si elles s'étaient accumulées pendant un grand nombre de siècles dans un bassin fermé, constituer un gisement analogue à ceux du Thibet et de la Californie.

L'eau de Wildegg (Suisse), celle d'Uriage et celle de Friedrichshall sont également remarquablement riches en bore.

On s'est demandé si le bore des eaux thermales ne proviendrait pas parfois de minéraux, tels que la tourmaline, qui sont abondants dans les granulites.

La présence du *silicium*, à l'état d'acide silicique, est, comme on devait s'y attendre, des plus fréquentes dans les eaux thermales et spécialement dans les eaux chaudes et carbonatées, ces eaux étant constamment en contact avec des silicates dans leur trajet souterrain.

On connaît assez les grands dépôts de geysérite, ou silice hydratée, des geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande, du Yellowstone Park, etc. On a trouvé jusqu'à 0,60 gr. de silice par litre dans le geyser de Te Tarata, en Nouvelle-Zélande.

Dans les eaux moins chaudes, on a reconnu : au Mont-Dore (45°, 5'), 0,179 gr. de silice ; à Plombières (71°), 0,056 gr. de silicate de soude et 0,07 gr. de silice en excès ; à Néris (52°), 0,108 gr. de silice ;

gisements salins de Stassfurt-Anhalt, où l'on exploite un sel double de borate de soude et de chlorure de magnésium, la Stassfurtite (*Gîtes minér. et métall.*, I, 444).

à Evaux (55°), 0,097 gr. de silicate de soude et 0,03 gr. de silice en excès, etc.

La silice hydratée se trouve dans la plupart des sources sulfurées sodiques, où elle peut arriver à former le tiers de la minéralisation totale.

Si nous passons maintenant aux métaux, le *potassium* et le *sodium* sont, tout naturellement, en raison de la solubilité de leurs sels, parmi les plus abondants. Mais la proportion de potassium est toujours très inférieure à celle de sodium, aussi bien dans les sources produites par la rencontre de gîtes salifères, où la proportion des sels de l'eau de mer se retrouve plus ou moins altérée, que dans celles qui ont emprunté leurs alcalis, sous forme de carbonates, ou parfois de chlorures, aux roches cristallines.

Ainsi, à Salies-de-Béarn, pour 245 gr. de chlorure de sodium on en a seulement 2,3 gr. (c'est-à-dire moins de $\frac{1}{100}$) de chlorure de potassium.

A Salins, dans le Jura, pour 22,74 gr. de chlorure de sodium on a 0,25 gr. de chlorure de potassium, soit à peu près la même proportion; de même, à Salins-Moutiers, en Suisse, 12,4 gr. de l'un contre 0,16 de l'autre; à Chatelguyon 1,86 gr. contre 0,18.

Dans les sources carbonatées, à Vichy (Grande Grille), on a 3,52 gr. de carbonate neutre de soude contre 0,24 gr. de carbonate de potasse, soit $\frac{1}{145}$; à Vals, jusqu'à 7,28 gr. de bicarbonate de soude contre 0,25 gr., pour la potasse (source Madeleine); à Royat, 0,73 gr. de carbonate de soude, avec 1,67 gr. de chlorure de sodium et 0,16 gr. de sulfate de soude, contre seulement 0,14 gr. de carbonate de potasse, etc.

En dehors du chlorure et du carbonate de soude, qui sont les sels de soude les plus abondants dans les eaux thermales, on rencontre encore le sulfure de sodium dans les eaux du type pyrénéen, le sulfate, le borate, etc. A Bagnères-de-Luchon, il existe 0,09 gr. de sodium contre 0,004 de potassium; ($0,07 \text{ Na}^2\text{S} + 0,0038 \text{ Na}^2\text{OS}^2\text{O}^2 + 0,09 \text{ NaCl} + 0,03 \text{ Na}^2\text{OCO}^2 + 0,006 \text{ Na}^2\text{OSO}^3$); à Cauterets, on a signalé, en outre, du silicate de soude, de l'iodure et du bromure de sodium.

En principe, et si on laisse de côté les sources des terrains salifères, on peut dire que le sodium est caractéristique des sources chaudes, comme le calcium des sources froides, les eaux chaudes ayant seules pu dissoudre les alcalis des roches cristallines.

Le *lithium* est un des éléments rares, que l'on a recherchés avec le plus de soin dans les eaux thermales, en raison de ses propriétés médicinales. Il est, très fréquemment, associé aux autres métaux alcalins, surtout lorsque ceux-ci, comme en Auvergne, paraissent avoir été empruntés à des roches granulitiques, ou à des éruptions récentes, mais seulement à l'état de traces.

A Vichy (puits Chomel), on a trouvé 0,02 gr. de carbonate de lithine; à Royat, 0,032 gr.; à Chatelguyon, 0,014 gr. de chlorure; à la Bourboule, 0,017 gr.; à Saint-Honoré, 0,003 gr. de sulfate.

La source de Maizières, en Morvan, en contient, dit-on, une proportion particulièrement forte.

On prétend également que l'eau de Ballardvale, près d'Andover (Massachusetts), à 22 kil. de Boston, contiendrait 0,21 gr. de carbonate de lithium, c'est-à-dire une proportion tout à fait inusitée, provenant de terrains renfermant du triphane et du lépidolithe.

Des traces de *rubidium* et de *cæsium* ont été reconnues à Baden, Karlsbad, Vichy, Bourbonne, Salies-de-Béarn, etc.

La *chaux* existe dans presque toutes les eaux, soit douces, soit thermales; ses sels principaux sont le carbonate, le sulfate, le sulfure (résultant de la réduction du sulfate par des matières organiques) et enfin le chlorure. La proportion de carbonate neutre de chaux par litre atteint 0,70 gr. à Saint-Nectaire, 1,37 gr. à Saint-Alyre près Clermont, 2,89 gr. au Puy-de-la-Poix en Auvergne. On a trouvé, d'autre part, jusqu'à 1,40 gr., de sulfate de chaux dans les sources de Belleville, jusqu'à 3,65 gr., de chlorure de calcium dans une source des îles Fidji.

Le *baryum*, bien que plus rare, a été néanmoins constaté, soit en chlorure, soit en bicarbonate, dans diverses sources, notamment dans les sources salines exemptes de sulfates (la présence de sulfates devant amener la précipitation du sulfate de baryte). A Ems, il y aurait 0,0028 de baryum, d'après Frezenius. A Lamalou, où la source sort d'un ancien filon de barytine, M. Willm en signale des traces, qui auraient même, croit-on, suffi pour donner de la barytine cristallisée récente. On en a également trouvé dans les dépôts de Luxeuil et de Karlsbad, ainsi qu'au Boulou (Pyrénées-Orientales).

Le *strontium*, assimilable, sous bien des rapports, au baryum, a été reconnu également dans nombre d'eaux thermales : Ems, Kreutznach, Durckheim, Karlsbad, Vichy, Saint-Alyre.

Le *magnésium*, en chlorure, en sulfate ou en carbonate, est très fréquent dans les sources salines, comme on pouvait le prévoir à priori, en raison de son association habituelle avec les métaux alcalins. Son abondance dans toutes les roches basiques l'amène aussi, sous forme de carbonate, dans les eaux qui ont circulé au milieu de roches semblables et nous avons attribué ailleurs, à de semblables circulations thermales dans des serpentines, la formation de gîtes de giobertite, ou d'écume de mer ¹

Souvent le sulfate de magnésie est associé avec du sulfate de soude, dont la proportion par rapport à la sienne varie de 66 p. 100 à Pullna (Bohème), jusqu'à 31 p. 100 à Birmenstorff (Suisse).

Dans certaines eaux carbonatées (Saint-Alyre, Pougues dans la Nièvre, etc.), le carbonate de magnésie accompagne le carbonate de chaux.

L'*aluminium* forme parfois du sulfate ou du silicate d'alumine, mais ne joue, en somme, qu'un rôle très insignifiant dans les eaux minérales.

Il est à peine besoin de mentionner la présence du *fer*, qui, sans entrer jamais en proportions très fortes, est néanmoins très ordinaire, comme on le sait, à l'état de bicarbonate, sulfate, accessoirement arséniate, phosphate, crénate, etc.

Quant au *manganèse*, habituellement associé au fer, il est également fréquent dans nombre d'eaux (dépôts de Luxeuil, Lamalou, etc.).

Si nous abordons maintenant la série des métaux plus lourds et plus rares, réellement caractéristiques des filons métallifères, nous n'aurons plus à en mentionner que des traces insignifiantes, souvent contestables et, après avoir été signalées par un chimiste, exposées à être niées par un autre : traces qui, presque toujours, sont même dues à quelque circonstance accidentelle, telle que la présence d'objets métalliques, tuyaux en plomb, robinets en cuivre, etc., sur la circulation des eaux, ou au passage de ces eaux par des filons, où ces métaux s'étaient antérieurement déposés, c'est-à-dire à un de ces phénomènes de remise en mouvement, sur la grande importance desquels nous avons récemment appelé l'attention.

Cependant, comme on a constaté la présence de beaucoup de ces métaux et spécialement du nickel, du cobalt, du cuivre dans les micas, les amphiboles, les péridots de certaines roches, ou encore

celle du zinc dans d'assez nombreux terrains sédimentaires, il peut parfaitement arriver qu'un lessivage de ces roches en ait introduit des traces dans les eaux thermales, par les mêmes réactions toutes superficielles, auxquelles une certaine école veut attribuer uniquement la formation des gîtes métallifères. Mais, précisément, le contraste entre les dépôts actuels de sources attribués à cette cause et les anciens filons nous paraît mettre nettement en évidence, pour ceux-ci, l'existence d'une autre intervention plus profonde, à laquelle nous avons toujours attribué le rôle essentiel dans la constitution de ces filons.

Enfin, au voisinage des volcans, il peut intervenir de ces réactions plus profondes et l'on observe encore aujourd'hui, dans certains cas (d'ailleurs très rares), des dépôts métallifères de mercure, plomb, cuivre, etc.

Le *nickel* a été signalé à Ronneby, en Suède; nickel, cobalt, cuivre et plomb ont été également reconnus à Lamalou (Hérault), où leur présence est toute naturelle, en raison de la proximité d'une mine de cuivre, dont l'exploitation a failli faire disparaître les sources.

A Cransac (Aveyron), des eaux provenant du lessivage d'une mine de houille en ignition renferment, avec du fer, des traces de nickel et de zinc; dans la source carbonatée d'Orezza (Corse), on a également cru trouver des traces de carbonates de manganèse et de cobalt.

A Vichy, l'existence du cobalt, qui aurait été là plus anormale, a été démentie après avoir été annoncée.

L'*étain*, fort peu soluble et assez rare, n'a été trouvé dans les eaux qu'en proportions tout à fait infinitésimales (Kissingen, Bruckenaue).

Le *cuivre*, dont les sels entrent, au contraire, si facilement en dissolution et qu'on rencontre, par suite, dans nombre d'eaux superficielles, au voisinage d'affleurements cuprifères, se retrouve dans quelques sources thermales, notamment dans les sources ferrugineuses, qui ont souvent pris leur fer à des pyrites légèrement cuprifères et dans quelques sources sulfurées sodiques, dont le soufre pourrait bien avoir une origine analogue.

Parmi les cas les mieux constatés, nous avons déjà cité Lamalou. On peut ajouter Bagnères-de-Luchon (traces de cuivre et de manganèse), Balaruc (Hérault) (chlorure de cuivre), Bruckenaue, Rippoldsau, Saint-Moritz.

Au Boulou (Pyrénées Orientales), une source bicarbonatée sodique à 17° renferme des traces de cuivre, peut-être du nickel et du cobalt, de la glucine (vérifiée par deux observateurs), du manganèse et de la baryte.

Le *plomb* des eaux paraît, presque toujours, attribuable aux objets de plomb en contact avec elles ; souvent, comme il est arrivé pour la plupart de ces traces métalliques, de prétendues découvertes n'ont pas été confirmées ; nous citerons seulement, d'après Daubrée : Kissingen, Ems, Karlsbad, Ronneby, etc. On sait, d'ailleurs, que des remises en mouvement récents ont été constatées, pour le plomb et le zinc, dans des galeries de mines : ce qui rendrait la présence de ces métaux tout à fait normale dans une source voisine de gîtes métallifères.

Le *mercure* se dépose, en cinabre, dans les Steamboat Springs de l'état de Nevada, à Sulphurbank, près du lac Clear en Californie, en Nouvelle-Zélande (Auckland). Quant au mercure, souvent cité, que M. Descloiseaux aurait trouvé au grand geyser d'Islande, il faut, presque certainement, l'attribuer à la rupture d'un instrument de physique.

Enfin, on a annoncé la présence de traces d'*argent* à Liebenstein et, peut-être aussi, de l'*or* dans la source de Karlsbad, qui a offert à la perspicacité des chimistes allemands un champ très habilement exploité.

§ 2. — *Proportion des divers éléments contenus dans les eaux et groupement hypothétique de ces éléments par sels. Classification des eaux thermo-minérales d'après leurs principes chimiques dominants*¹.

Dans le paragraphe précédent, nous nous sommes borné, en somme, à dresser une liste qualitative des éléments chimiques renfermés par les eaux. Il reste maintenant à voir comment ces

¹ Pour les analyses détaillées de sources thermales, qui forment la base de ce paragraphe, on peut, comme ouvrages généraux, consulter : pour la France : 1883. *Statistique détaillée des sources minérales en France et en Algérie* (Paris, Impr. nationale). — 1885, Ad. CARNOT, *Analyses des eaux minérales françaises exécutées à l'École des Mines* (Ann. de M., janvier 1885) et 1894, JACQUOT et WILLM, les *Eaux minérales de la France* (1 vol. chez Baudry) ; — pour l'Algérie : 1889, Notice pour l'Exposition universelle ; — pour l'Espagne : 1892. MINISTERIO DE FOMENTO, *Monografía de las aguas minerales y termales de España* ; — pour l'Italie : 1864. GIOV. GARELLI, *Delle acque minerali d'Italia* ; — pour les Etats-Unis : 1886, *Mineral Springs*

éléments se groupent entre eux pour former des sels, quelle est la proportion relative et quelles sont les associations habituelles de ces sels, de manière à pouvoir établir une classification rationnelle des eaux thermales. Les tableaux d'analyses ci-joints mettront, mieux que toutes les explications, en lumière, les principaux faits sur lesquels nous allons avoir à insister ; mais, auparavant, quelques explications préliminaires ne seront peut-être pas inutiles.

L'habitude générale est, aujourd'hui, dans les analyses chimiques d'eaux minérales, de donner les éléments, non isolés comme la chimie les dose, mais groupés par sels hypothétiques et de classer ceux-ci dans un certain ordre, toujours le même, indépendamment de la proportion de ces éléments dans l'eau considérée¹. Nous nous conformerons à cet usage dans nos tableaux de comparaison ; car c'est assurément le meilleur moyen de faciliter au lecteur, sous une forme qui lui est déjà familière, les rapprochements entre diverses eaux analogues. Néanmoins, il est des cas où cette méthode a des inconvénients, qu'il ne faut pas se dissimuler.

Tout d'abord, quand il s'agit d'apprécier une source isolée, pour une étude exclusivement chimique, il y a évidemment avantage à voir, du premier coup, quels sont les sels qui y dominent et par suite, à les trouver classés par ordre d'importance : ce que nous ferons généralement dans nos descriptions de détail.

En outre, il est tels cas, où le chimiste est embarrassé devant un tableau de groupements salins, qui dissimule, au premier abord, l'abondance relative des divers éléments, en les disséminant entre plusieurs sels : par exemple, le sodium réparti entre le chlorure, le sulfate, le carbonate, le sulfure, l'hyposulfite, le silicate, le phosphate, l'arséniate, etc... Il peut alors y avoir intérêt à

of the United States; Geological Survey (Bull. 132) ; — 1892. SCHWEITZER. Mineral Waters of Missouri (Geol. surv. of Missouri, t. III) ; — pour l'Inde : 1882. OLDHAM. Thermal Springs of India (Mém. géol. surv. of India, t. XIX, p. 99-161).

Voir, en outre, comme ouvrages d'ensemble : 1860. DURAND-FARDEL ET LEBRET. *Dictionnaire des eaux minérales*, contenant de très nombreuses analyses ; — 1878. D^r H. QUINCKE. *Balneologische Tafeln. Graphische Darstellung der Zusammensetzung und Temperatur der wichtigsten Heilquellen* (Berlin, chez Hirschwald) ; — 1862. H. LUDWIG. *Die natürlichen Wässer in ihren chemischen Beziehungen* (Erlangen) ; — 1888. DUBRÉE. *Eaux souterraines aux époques actuelles*, et divers annuaires, tels que ceux du D^r Constantin James, de la Gazette des Eaux, etc. C'est de ces divers recueils que nous avons extrait les éléments nécessaires pour composer les tableaux ci-joints.

Sur un vœu de l'Académie de médecine, l'*Annuaire des eaux minérales françaises*, contenant les analyses de M. Willm, ne donne que les éléments groupés.

détruire ces combinaisons théoriques pour reconstituer le tableau d'analyse réel par éléments, tel qu'il avait été d'abord obtenu.

Voici maintenant, d'après M. Ad. Carnot, quelques définitions relatives aux analyses des eaux thermales¹

« L'évaporation à sec d'un litre d'eau, suivie d'un grillage à température très modérée, fournit un résidu, que, par abréviation, on appelle *rés du fixe*. On remarquera qu'il ne doit jamais être égal à la somme des éléments dosés par litre ; car il ne comprend, ni l'acide carbonique existant en dehors des carbonates neutres, ni les matières organiques, ni l'eau des sels formés par les hydracides avec les bases ; certains sels changent, d'ailleurs, de composition pendant l'évaporation à sec. Mais son poids doit différer très peu, en général, de la somme des poids des sels neutres, que l'on peut supposer formés par la combinaison des éléments dosés².

« Au sujet des groupements proposés, on peut remarquer que, d'après les lois de la thermochimie, il est naturel de supposer les bases les plus fortes (soude, potasse, lithine, chaux, magnésie...) unies aux acides les plus énergiques (acide sulfurique, acide chlorhydrique). Le surplus des bases fortes, aussi bien que l'oxyde de manganèse et le protoxyde de fer, doit exister, en général, dans les eaux sous forme de bicarbonates, ou bien en combinaison avec des acides organiques³. »

Par suite des rapprochements géologiques invoqués pour l'origine des sources, on supposera, d'abord, la soude en chlorure, la chaux en sulfate ou en carbonate, le fer en carbonate, etc...

En partant de ces conventions et laissant de côté, par hypothèse, les produits accessoires, on peut calculer la proportion des divers sels supposés contenus dans une eau thermale⁴ et l'on est alors, tout naturellement, conduit à chercher une base de classification de ces eaux d'après la nature du sel qui y domine.

¹ Nous les empruntons à un mémoire de M. Carnot sur les *Analyses des eaux minérales françaises, exécutées au bureau d'essai de l'École des Mines* (Ann. des Min., janvier 1885). Voir également, sur les analyses d'eaux minérales : JACQUOT et WILLM. *Eaux Minérales de la France*, ch. v, p. 73 à 81.

² Il existe malheureusement de grandes divergences entre les interprétations des divers auteurs d'analyses. Les uns calculent les éléments à l'état anhydre, d'autres y compris l'eau d'hydratation.

Divers auteurs ont insisté récemment sur le rôle médical attribué aux matières organiques, que l'on constate dans les eaux.

Quand on dissout dans l'eau deux sels différents par leur acide et par leur base, il se produit, par double décomposition partielle, quatre sels, dans une proportion qu'on ignore absolument.

Le nombre de ces sels étant assez élevé et chacun d'eux pouvant prendre le dessus dans telle ou telle eau, il en résulte des classifications très compliquées, très variables suivant les auteurs, et que chacun pourra imaginer aisément, mais qui, même pour les applications médicales auxquelles elles sont spécialement destinées, risquent, à notre avis, d'induire en erreur, puisque la vertu propre d'une eau doit tenir souvent, essentiellement, à des substances, qui y sont en quantité très faible et que, par suite (leur rôle thérapeutique lui-même restant toujours mal précisé), il est impossible, en bonne logique, de prendre jamais comme entrée de classification.

Voulant ici faire, avant tout, œuvre de géologue, nous croyons plus simple de nous borner aux catégories suivantes, qui, géologiquement, se présentent comme bien distinctes et qui correspondent à des modes de formation réellement différents : c'est-à-dire à l'état naturel des eaux, et non à leur état altéré ou artificiel. Nous commencerons par les définir dans ce paragraphe ; après quoi, nous essayerons d'en expliquer l'origine dans un paragraphe ultérieur :

1° *Sources ferrugineuses* (sans acide carbonique libre), presque superficielles et froides ;

2° *Sources salines* (à chlorures de sodium ou de magnésium ; sulfates de chaux, de soude ou de magnésie ; sulfures de calcium, ou rarement de sodium, accidentels, etc.), également froides en principe et minéralisées par la dissolution de gîtes salifères ;

3° *Sources carbonatées*, caractérisées par la présence de l'acide carbonique libre, qui a généralement amené la dissolution d'alcalis et produit des sources alcalines, mais qui, parfois aussi, en fait des sources ferrugineuses, à température variable ;

4° *Sources sulfureuses*, à sulfure de sodium dominant, toujours chaudes ;

5° *Sources alpestres, indifférentes ou indéterminées* (*wildbäder, akrothermen*), à minéralisation très faible, mais à haute température.

Les indications mêmes, que nous venons de donner dans cette énumération, sur la température habituelle de ces diverses catégories d'eaux, montrent bien comment, des premiers types, qui se rattachent directement aux sources ordinaires, on passe peu à peu aux derniers, qui sont, au contraire, essentiellement thermaux. Il va, d'ailleurs, de soi qu'une source chaude pourra à *fortiori*

présenter la minéralisation des trois premiers groupes, si les eaux qui l'alimentent se sont trouvées descendre assez profondément ; mais l'inverse n'est pas exact et les deux derniers types ne comprennent jamais de source froide (ce qui résulte de la définition même pour les sources alpestres).

On remarquera, en outre, que nous restreignons beaucoup le sens dans lequel on entend, le plus souvent, les sources ferrugineuses. Il est, en effet, un très grand nombre de sources classées par les statistiques dans cette catégorie, dont l'acide carbonique libre est, en réalité, l'élément essentiel et caractéristique et qui, sauf cette teneur en fer accidentelle, se rattachent directement aux autres eaux à acide carbonique libre, classées dans un autre groupe, que cet acide soit associé aux alcalis, ou même à la chaux.

De même, nous établissons une distinction absolument tranchée et fondamentale entre les eaux sulfurées à base de chaux et celles à base de soude, que l'on rapproche les unes des autres, dans la plupart des ouvrages, à cause de leur principe sulfuré commun, mais qui présentent, le plus souvent (sauf dans certains cas exceptionnels sur lesquels nous reviendrons), des conditions de gisement et une allure tout à fait différentes.

Entrons maintenant dans quelques détails et précisons par des exemples :

1° Sources ferrugineuses. — Le fer, si abondant dans toutes les roches et dans tous les terrains, passe de là fréquemment en dissolution dans les eaux, à la faveur de divers acides : soit les acides organiques, tels que l'acide crénique, produits par les plantes ; soit l'acide carbonique de l'air ou des calcaires, soit encore l'acide sulfurique résultant de l'oxydation des pyrites. Il en résulte des déplacements superficiels et des concentrations locales des éléments ferrugineux par des eaux, qui ne sont pas à proprement parler des eaux thermales, mais qu'on utilise néanmoins parfois en médecine. Evidemment, cette dissolution est très facilitée par la présence d'acide carbonique abondant et d'origine profonde, tel que celui des eaux d'Auvergne, ou par le carbonate de soude des mêmes eaux gazeuses : on obtient alors des sources ferrugineuses, rentrant dans la catégorie des sources carbonatées, dont nous parlerons plus loin.

D'autre part, la réduction du sulfate de fer par des matières organiques pourra amener la précipitation de sulfure de fer.

2° Sources salines. — Nous rangeons dans cette importante catégorie toutes les eaux qui doivent leur minéralisation à une simple *dissolution* des sels contenus dans les terrains traversés, sans qu'il y ait eu *décomposition* des minéraux par un agent chimique quelconque et, par conséquent, sans que ni la thermalité, ni l'acide carbonique aient eu besoin d'intervenir.

Ces sources comprendront donc, en premier lieu, toutes les eaux qui se seront trouvées en contact avec des gîtes de chlorure de sodium ou de sulfate de chaux, comme il s'en trouve si fréquemment dans les terrains permo-triasiques ou tertiaires du continent européen : gisements qui, outre ces deux sels principaux, pourront contenir en proportions variables et céder aux eaux minérales, suivant les cas, toute la série des chlorures et sulfates de métaux alcalins ou alcalino-terreux.

Les sources salées fortement minéralisées des régions à gîtes salifères peuvent être, soit naturelles, soit artificielles (puits et sondages); dans ce dernier cas, elles constituent, avant tout, un mode d'exploitation et d'extraction du sel gemme; mais les eaux-mères des salines sont, elles-mêmes, fréquemment utilisées pour l'usage médical¹.

D'autre part, sans empiéter ici sur ce qui sera dit plus loin quand nous essayerons d'expliquer l'origine de la minéralisation des eaux, on doit remarquer que l'on rencontrera souvent, surtout sur les rivages des districts fortement disloqués par des phénomènes volcaniques récents, de simples infiltrations d'eau de mer, qui, échauffées par leur pénétration profonde à la faveur des fissures du sol, reviennent former des sources salines à haute température.

Enfin, toute une série de transitions insensibles conduisent, de ces eaux-mères des salines, qui peuvent contenir jusqu'à 320 gr. de sel par litre, à des eaux de moins en moins minéralisées, empruntant alors simplement leur faible teneur en chlorure de sodium aux traces de ce sel, que renferment la plupart des roches volcaniques et qui persistent même dans les roches très anciennement cristallisées, comme les granites ou les granulites.

Le tableau I ci-joint² donne une idée de ces variations de com-

¹ *Dictionnaire DURAND-FARDEL*, article *Eaux-Mères*. Les eaux-mères, d'abord utilisées à Kreuznach, servent aujourd'hui dans des stations de plus en plus nombreuses.

² Voir JACQUOT et WILLM, *loc. cit.*, p. 27, un tableau résumé relatif aux seules sources salines des Alpes. Pour certaines sources, nous n'avons pu nous procurer que quelques éléments de l'analyse. C'est la cause des lacunes que l'on remarquera dans nos colonnes. On fera aisément la distinction de ce cas, avec celui où un élément isolé fait réellement défaut dans une analyse complète

COMPOSITION COMPARÉE DE DIVERSES SOURCES SALINES

Éléments calculés

NUMÉROS D'ORDRE	SOURCES	TEMPÉRATURE MAXIMA des sources de la station thermale.	RÉSIDU FINE	CHLORURES				
				NaCl	KCl	LiCl	CaCl ²	Magnés.
1	Rheinfelden (Suisse)	»	318,8	311,63	»	»	»	»
2	Saline de Hall (Tyrol), eau-mère	»	263,9	255,55	»	»	»	»
3	Salies-de-Béarn (source Bayaa)	15°	256	245,45	2,30	0,017	»	»
4	Arnstadt	»	237	224	»	»	»	»
5	Reichenhall (Bavière)	»	233	212	»	»	»	»
6	Saline de Kissingen (Bavière)	»	»	158	»	»	»	»
7	Bex	»	170	156,66	»	»	»	»
8	Ashby (Leicestershire)	»	»	117,77	»	»	»	»
9	Colberg	»	51,03	43,63	»	»	»	»
10	Stronchino (Toscane)	»	»	36	»	»	3,61	»
11	Pymont	»	40	32	»	»	»	3,92
12	Eau de mer (moyenne)	»	36	28	»	»	»	»
13	Nauheim	»	33,35	29,30	»	»	»	»
14	Salins (Jura)	11°	26	22,74	0,25	»	1,57	0,87
15	Hombourg	»	»	14,80	»	»	»	»
16	Hall	11° 2	15,70	14,58	0,007	»	0,38	0,31
17	Durkheim	»	16,6	12,71	»	»	»	»
18	Soden	»	14,8	11,03	»	»	»	»
19	Kreutznach (Elisenquelle)	»	12,24	9,49	0,08	0,08	1,74	0,53
20	Mondorf	»	»	8,76	»	»	3,16	»
21	Wildeggen (Argovie)	»	»	7,90	»	»	»	3,94
22	Friedrichshall (Saxe)	»	»	7,90	»	»	»	0,20
23	Wiesbaden (Kochbrunnen)	68°	8,26	6,83	0,14	traces	0,47	»
24	Uriage (Isère)	27°	9,70	6,11	»	»	»	»
25	Bourbonne (Haute-Marne)	65°	7,19	5,12	0,17	0,08	0,16	0,07
26	Abano (Mont Isone)	85°	6,59	3,87	»	»	0,09	0,13
27	La Bourboule (Puy-de-Dôme)	60°	5,02	3,17	»	»	»	»
28	Bourbon-l'Archambault (Allier)	53°	3,18	1,77	»	0,01	»	»
29	Saint-Gervais (Haute-Savoie)	48°	5	1,75	»	»	»	»
30	Royat (Puy-de-Dôme), source de la commune	34° 2	4	1,67	»	»	»	»
31	Luxeuil (Vosges), Source des étuves	52°	1,17	0,70	0,078	0,01	»	»
32	Saint-Honoré (Nièvre)	31°	0,59	0,37	»	»	»	0,04
33	Eaux-Bonnes (B ^{as} -Pyrénées), St Vieille	32° 5	0,599	0,266	0,02	0,0005	»	»
34	Evaux (Creuse)	56° 7	1,44	0,24	»	traces	»	»
35	Néris (Allier)	52° 8	1,12	0,18	»	»	»	»
36	Eau de pluie à Manchester	»	»	0,003	»	»	»	»
37	Ussat (Ariège), Grand établissement	38°	1,13	0,04	»	»	»	»
38	Rivière de l'Elbe	15°	0,126	»	»	0,04	»	»
39	Saint-Amand (Nord)	25°	»	0,09	traces	»	»	»
40	Neige à Fécamp	»	»	0,017	»	»	»	»
41	Eau de pluie à Fécamp	»	»	0,011	»	»	»	»
42	Aulus (Ariège), S ^{aint} Laporte	20°	2,31	0,003	0,003	»	»	»
43	Rhin à Strasbourg	»	0,23	0,02	»	»	»	»

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX THERMO-MINÉRALES 403

ASSÉES PAR ORDRE D'ABONDANCE DU CHLORURE DE SODIUM

mmes par litre.

NaBr ou KBr ou Mg Br ²	NaI	SiO ²	SULFATES				CARBONES					CO ² libre	
			Na ² OSO ³	K ² OSO ³	Ca OSO ³	MgOSO ³	Na ² CO ³	K ² CO ³ et Li ² CO ³	CaO CO ²	FeCO ³	MnO CO ²		MgO CO ²
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,16	traces	»	0,66	»	2,74	3,57	»	»	0,27	»	»	0,03	0,02
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	»	2,7	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,014	»	»	64,47	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,08	»	»	»	0,89	1,30	1,70	»	»	0,12	»	»	»	»
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,03	traces	»	»	0,68	1,41	»	»	»	traces	»	»	traces	»
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,06	0,008	0,01	»	»	»	»	»	»	0,06	0,01	»	0,03	0,14
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
traces	traces	0,027	»	»	»	»	»	»	0,22	0,02	traces	0,01	»
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,11	traces	»	1,67	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
traces	traces	0,06	6,06	0,20	1,35	5,15	»	»	0,01	»	»	0,52	0,40
traces	traces	0,03	»	»	0,09	»	»	»	0,42	0,005	traces	0,01	»
0,07	traces	0,007	1,53	0,14	1,05	0,48	»	»	0,32	»	»	0,01	0,09
»	»	»	»	»	1,38	»	»	»	0,05	»	»	traces	0,009
»	»	0,10	1,15	»	»	0,40	»	»	»	»	»	»	»
0,004	traces	0,09	0,21	»	»	»	1,18	0,20	0,11	0,005	traces	0,04	0,45
0,03	traces	traces	0,35	0,15	»	»	0,47	»	0,28	0,0016	»	0,03	0,37
»	»	»	1,773	0,108	0,95	0,07	»	»	0,15	»	»	0,004	0,05
»	traces	0,10	0,16	»	»	»	0,74	0,14	0,78	0,05	»	0,351	1,39
»	»	0,09	0,154	»	»	»	0,02	»	0,07	0,002	»	0,002	0,002
0,002	»	0,06	0,004	0,037	»	»	0,01	»	0,08	»	»	0,007	»
0,004	traces	»	0,03	»	0,15	»	»	»	»	»	»	»	0,009
»	»	0,03	0,82	0,02	»	»	0,12	»	0,07	0,004	»	0,03	»
»	»	0,10	0,36	0,04	»	»	0,31	»	0,09	0,001	»	0,01	0,04
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	0,026	0,015	0,012	0,70	0,19	»	»	0,14	0,001	»	0,002	0,01
»	»	»	»	»	0,007	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	0,018	0,09	»	0,12	0,085	»	»	0,16	0,12	»	0,03	0,005
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	0,02	0,01	»	1,86	»	»	»	0,11	0,009	»	»	0,01
»	»	0,05	0,01	»	0,01	»	»	»	0,14	»	»	0,005	»

position et met immédiatement en pleine lumière les erreurs capitales que l'on commettrait en compulsant brutalement des statistiques, où les eaux de Salies-de-Béarn et celles de Luxeuil, pour prendre deux exemples français, sont notées de même comme sources chlorurées sodiques. Nous avons eu soin d'y indiquer, comme point de comparaison, quel est le degré de salure de certaines eaux douces et même de l'eau de pluie ou de la neige. On sait, en effet, que par le simple apport des vents venant de la mer, la plupart des eaux douces contiennent un peu de chlorure de sodium, qui se déplace ou se concentre, par diverses causes, dans les couches superficielles du sol, jusqu'au moment où les fleuves le ramènent à la mer. Cette comparaison est nécessaire pour ne pas se laisser induire en erreur par des chiffres de teneurs à nombreuses décimales, dont on ne sait pas toujours de suite apprécier la portée.

Ce tableau a un autre but, c'est de faire connaître, par une série d'exemples rapprochés les uns des autres, la nature et la proportion variable des sels, qui accompagnent ordinairement dans les eaux le chlorure de sodium et le sulfate de chaux et dont l'un ou l'autre peut, dans certaines conditions de gisement spéciales, arriver à prédominer (notamment le sulfate de soude, ou les sels de magnésie).

Ces sels comprennent fréquemment du chlorure de calcium, qui arrive exceptionnellement à atteindre la proportion de 8 à 10 par rapport à 1 de chlorure de sodium dans les eaux acidulées de Nauheim (Hesse-Électorale). Il est possible que là l'acide carbonique ait commencé par intervenir pour dissoudre la chaux en bicarbonate, que le chlorure de sodium aura ensuite partiellement transformé en chlorure de calcium.

Ailleurs, on aura du chlorure de potassium (Methana, en Argolide), ou, plus rarement, du chlorure de magnésium (Rennes-les-Bains, dans l'Aude, etc.)

Le brome et l'iode interviendront, comme dans l'eau de mer et comme dans les dépôts salins qui en résultent, en proportions variables : ainsi, dans l'eau-mère de Nauheim, 26^{gr},76 de brome de magnésium par litre.

En même temps, on rencontre les sulfates divers de chaux, soude, potasse, magnésie, dont la prédominance dans telle ou telle source lui donnera des propriétés caractéristiques.

Un fait plus remarquable et qui donne lieu à une catégorie de sources spéciales, dites chloro-bicarbonatées sodiques, c'est la ren-

contre fortuite, sur un même griffon hydrothermal, des conditions qui donnent les eaux salines et de celles qui produisent les eaux à acide carbonique libre.

Cette coïncidence, fréquente en somme dans les régions volcaniques littorales, où l'eau de la mer cède son chlorure et les mofettes éruptives leur acide carbonique, se retrouve également dans quelques régions de volcans éteints. Il nous suffira de citer : comme exemples du premier cas, Casamicciola d'Ischia et Castellamare près Naples; comme spécimens du second, Royat, Saint-Nectaire et la Bourboule en France, Wiesbaden, Ems et Nauheim en Allemagne.

Si la présence de l'acide carbonique abondant n'est, dans les eaux salées, qu'un phénomène accidentel, celle de l'hydrogène carburé, dans les gîtes de sel et, par suite, dans les sources qui en dérivent, est, au contraire, une circonstance tellement normale qu'il est indispensable d'en tenir compte dans toutes les théories relatives, aussi bien à la formation des gîtes salins qu'à celle des hydrocarbures¹

Il n'est guère de gîte de sel qui ne donne des dégagements de gaz combustible et toutes les recherches de pétrole rencontrent, en même temps que l'huile minérale, de l'eau salée.

La même association se retrouve dans les volcans de boue, macalubes, etc., comme elle existe également jusque dans les volcans proprement dits, qui dégagent toujours à la fois des chlorures et des hydrocarbures plus ou moins saturés, plus ou moins brûlés et transformés en acide carbonique.

Enfin, avant d'abandonner les eaux salines, il est important d'envisager, pour tous les sulfates qu'elles contiennent, la possibilité d'une réduction partielle, soit par les matières organiques superficielles, racines de plantes, tourbe, débris de bois, etc., soit par les sortes d'algues, dites conferves, si fréquentes dans les eaux thermales et dont l'influence sur la sulfuration des eaux pyrénéennes (où on les connaît sous les noms spéciaux de Luchonine, Barégine, Glairine, etc.) paraît bien vraisemblable.

Ainsi se constituent, quand il s'agit d'eaux froides sulfatées calciques, ces eaux sulfurées calciques, dont Enghien, près Paris et Camoins, près Marseille, sont de bons exemples; dans le cas

¹ Dieulafoy (*C. R.*, 1898, t. LXXXVI, p. 1470) a montré que les dépôts salifères, ainsi que l'eau de mer, renfermaient toujours un peu d'ammoniaque, qui passe dans les eaux minérales salines.

des eaux thermales à base sodique, on a les eaux d'Aix-la-Chapelle en Allemagne, d'Eaux-Bonnes en France, de Schinznach en Suisse, de Mehadia en Hongrie, etc.

La proportion d'hydrogène sulfuré libre, produite dans les eaux sulfurées calciques, peut varier dans de fortes proportions, comme le montre un tableau ci-dessous relatif à des sources de la Suisse.

	Centimètres cubes par 10 litres.
Lostorf (Soleure).	398
Lenk (Berne).	445
Gourniguel, Schwarzbrunnen (Berne)	350
Stachelberg (Glaris)	147
Heustrich	110
Gourniguel, Stockbrunnen	82
Lac Noir (Fribourg)	26
Alvenen (Grisons)	9
Schimberg (Lucerne).	7
L'Alliaz (Vaud)	6
Le Présé (Grisons)	6

3. Sources carbonatées. — Les sources carbonatées sont essentiellement caractérisées par la présence de l'acide carbonique libre, dont l'abondance est, comme nous le verrons, directement liée aux manifestations volcaniques, en sorte que ces sources sont presque exclusivement localisées dans les régions des volcans tertiaires ou modernes.

Cette présence de l'acide carbonique a eu pour effet, suivant la température et suivant la nature des roches en contact, la dissolution, soit simplement des bases terreuses et du fer, soit même, bien souvent, des alcalis et notamment de la soude.

On a ainsi un groupe important de sources alcalines, dans lesquelles la silice, dissoute à la faveur des carbonates alcalins, entre fréquemment en proportions notables.

Quand l'acide carbonique accompagne le chlorure de sodium, il donne des sources chloro-bicarbonatées, dans lesquelles des doubles réactions peuvent produire des chlorures de calcium, etc.

Parmi les sources à carbonates alcalins et acide carbonique surabondants, nous citerons Vichy et Vals; les eaux de Plombières sont bicarbonatées, silicatées sodiques; celles de Royat et la Bourboule, chloro-bicarbonatées; celles de Saint-Galmier, acidulées sodiques et calciques.

Ces bicarbonates peuvent, d'ailleurs, être accompagnés, suivant

les cas, de sels divers, ainsi que le montrent les tableaux II et III ci-joints.

Comme exemple d'eau carbonatée, où le fer domine, celle d'Orezza en Corse contient 0,128 gr. de carbonate ferreux, contre 0,60 de carbonate de chaux et 0,07 de carbonate de magnésium.

Enfin il peut arriver (ce qui introduit toujours des confusions dans les statistiques et les cartes hydrominérales) qu'une eau renferme, en faible proportion, de l'acide carbonique et des carbonates par une cause accidentelle, — telle que l'action sur des calcaires, pareille à celle qui se produit pour n'importe quelle eau de surface, circulant dans des calcaires fissurés — et semble ainsi se rattacher à ce groupe, sans avoir, en réalité, avec lui aucune communauté d'origine.

Nous reviendrons bientôt sur la présence d'acide carbonique gazeux dissous dans les eaux bicarbonatées et nous verrons que sa teneur pourrait, dans une eau saturée de ce gaz, atteindre théoriquement 11 grammes par litre.

4° Sources sulfurées sodiques. — Les sources sulfurées sodiques sont encore des sources alcalines, comme celles à chlorure de sodium ou à carbonate de soude dominant. Mais, à l'inverse de ces dernières, elles sont principalement thermales, c'est-à-dire d'origine profonde et ce genre de minéralisation ne peut, en principe, se présenter que lorsque la température est élevée ¹

Il en résulte donc une différence capitale avec les sources sulfurées calciques, qu'on classe souvent dans le même groupe par une similitude chimique apparente et qui sont, en réalité, essentiellement différentes pour un géologue, puisqu'elles résultent, tout au contraire, de réactions très superficielles et localisées dans quelques terrains sédimentaires appropriés.

En France, ces eaux sulfurées sodiques se trouvent surtout dans les Pyrénées (Amélie-les-Bains, Bagnères-de-Luchon, Saint-Sauveur, Cauterets, les Eaux-Bonnes, etc.); il en existe toutefois un autre groupe dans les Alpes (Aix-les-Bains, Allevard) et un en Corse. A l'étranger, on en connaît de bons exemples au Caucase.

Le tableau IV ci-joint montre, pour quelques-unes des principales sources de ce groupe, quelle est la proportion des différents sels.

¹ Il existe cependant des sources sulfurées sodiques accidentelles froides, minéralisées d'abord par un gisement salin de sulfate de soude et soumises ensuite à une action réductrice quelconque, qui transforme ce sulfate en sulfure.

NUMÉROS D'ORDRE	NOM	SITUATION géographique.	ALTITUDE MOYENNE	TEMPÉRATURE MAXIMA de la station thermale.	RÉSIDU FINE	POIDS TOTAL.	CARBONATES NEUTRES							
							CO ² libre.	Na ² O CO ²	K ² O CO ²	Li ² O CO ²	CaO CO ²	MgO CO ²	SiO ² CO ²	
1	La Bourboule, source Choussy	Puy-de-Dôme.	846	56°	5,03	5,02	0,45	1,18	0,178	0,02	0,11	0,04		
2	Chaudesaignes, source Chevalier.	Cantal.	650	81°3	»	0,94	0,625	0,59	traces		0,05	0,008		
3	Heilbronn.	Brohlthal (Allemagne).	419	»	»	5,37	»	1,75	»	»	0,37	1,09		
4	Karlsbad.	Bohême.	390	73°7	»	5,459	»		1,26		0,306	0,178		
5	Marieubad, Kreutzbrinnen	—	»	»	»	»	»		1,22		0,341	0,636	0,03	
6	Le Mont-Dore, source Bertrand.	Puy-de-Dôme.	1 050	45°	1,47	1,47	0,63	0,41	0,85	0,004	0,22	0,12		
7	Saint-Nectaire, source Cornadore	—	700	37°5	4,95	4,95	0,71	1,46	0,22	0,05	0,45	0,35		
8	Royat, grande source de la Commune	—	450	34°2	4,001	4,03	1,39	0,74	0,14	0,03	0,78	0,35		
9	(Source Hôpital)	Allier.	260	44°	5,18	6,95	1,18	3,52	0,30	0,02	0,38	0,05		
10	(Source Lucas)				5,02	6,73	1,68	3,42	0,23	0,01	0,41	0,05		
11	(Source Célestins)				4,77	6,40	1,77	3,12	0,23	0,02	0,50	0,07		
							Dans les analyses suivantes, on a dosé les carbonates au lieu des carbonates neutres							
12	Châteauneuf, source Morry	—	558	38°	»	3,01	2,35	0,97	0,13		1,015	0,39		
13	Montrond	Loire.		26°	4,82	»		4,58	»	»	0,08	0,06		
14	Saint-Yorre (source Régner)	Allier.	»	12°3	»	4,74	»	4,66	0,37	»	0,68	0,33	trac	
15	Saint-Yorre, source Saint-Charles)	—	»	»	»	8,34	»	5,11	0,44	»	0,52		trac	
16	Vals (source Célestine)	Ardèche (Vivaraire)	250	26°	4,12	3,76	2,66	4,43	0,167	0,04	0,61	0,52		

On a supprimé partout la troisième décimale en forçant d'une unité le chiffre précédent. Densité de l'acide carbonique = 1,529. Un litre de gaz à 0° et sous pression 760 pèse 1 gr. 98.

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX THERMO-MINÉRALES 109

ÉES SODIQUES

CARBONATES NEUTRES		SULFATES					CHLORURES					SiO ₂	Na ₂ O Ph ₂ O ₃	Na ₂ O As ₂ O ₅	Na ₂ O BO ₂ O
FeO CO ₂	MnO CO ₂	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	CaO SO ₄	MgO SO ₄	FeO SO ₄	NaCl	KCl	LiCl	CaCl ₂	MgCl ₂				
,005	traces	0,21	»	»	»	»	3,17	»	»			0,10	»		»
»	»	0,03	traces	»	»		0,13	traces	»		0,006	traces	»		»
,11	»	0,30	»	»	»	»	1,67	»	»			0,07	»		»
,0036	0,0008	2,587	»	»	»	»	1,038	»	»		»	0,075	»	»	»
,038	»	4,916	»	»	»	»	1,51	»	»		»	»	»	»	»
,01	0,001	0,06	»	»	»	»	0,37	»	»		»	0,18	»	»	»
,02	»	0,14	»	»	»	»	2,12	»	»		»	0,13	»	»	»
,05	»	0,16	»	»	»	»	1,67	»	»		»	0,10	»	»	»
,002	»	0,27	»	»	»	»	0,57	»	»		»	0,06	»	»	»
,004	»	0,27	»	»	»	»	0,57	»	»		»	0,05	»	»	»
traces	»	0,27	»	»	»	»	0,53	»	»		»	0,04	»	»	»
les bicarbo-															
,05	»	0,16	»	»	»	»	0,17	»	traces		»	0,12	»	»	»
»	»	»	»	»	»	»	0,008	»	»		»	0,09	»	»	»
,06	traces	0,23	»	»	»	»	0,55	0,01	»		»	0,01	traces	0,02	traces
»	traces	0,80	»	»	»	»	0,54	0,01	»		»	0,04	traces	0,02	traces
01	»	0,04	»	»	»	»	0,11	»	»		»	0,41	»	»	»

dépassait 5.

TABLE
SOURCES BICARBONATÉES SODIQU

(Exemple d'analyses clas

NUMÉROS D'ORDRE	NOM	SITUATION géographique.	ALTITUDE	DÉBIT par 24 heures en mètres cubes.	TEMPÉRATURE	RÉSIDU FINE	POIDS TOTAL des matières dosées.	BASES			
								Na ⁺ O	K ⁺ O	Li ⁺ O	CaO
1	Hauterive.	Allier	260	»	»	»	8,51	2,37	0,09	»	0,17
2	— (Nouvelle source).	—	»	6,48	17°5	5,58	9,22	2,81	0,08	0,002	0,27
3	Brughiés	—	»	»	»	»	1,62	0,43	0,03	»	0,08
4	Abrest	—	»	»	»	1,72	»	0,70	0,008	»	0,22
5	Hôpital.	—	»	50	34°	5,18	5,97	2,50	0,21	0,003	0,22
6	Grande-Grille	—	»	112	43°	5,02	5,65	2,44	0,15	0,003	0,15
7	P. Lucas.	—	»	50	28°	3,02	»	2,37	0,14	0,002	0,22
8	Puits Carré et Chomel.	—	»	120	44°	5,03	»	2,46	0,15	0,004	0,13
9	Cusset, Sainte-Marie.	—	»	»	16°	»	»	»	»	»	»
10	Saint-Yorre (source Saint-Charles).	—	»	»	»	4,86	»	2,54	0,07	0,005	0,12

TABLE
COMPOSITION DES EAUX SULF

NUMÉROS D'ORDRE	NOM	SITUATION géographique.	ALTITUDE	TEMPÉRATURE maxima.	RÉSIDU SEC	CO ² libre.	H ² S libre.	Na ⁺ S	Na ⁺ O S ²⁻ O	Na ⁺ O S ²⁻ O	K ⁺ O S ²⁻ O	CaO S ²⁻ O
1	Aix - les - Bains (Eau de soufre).	»	260	47°C	0,492	»	0,0042	»	0,003	0,03	»	0,086
2	Amélie-les-Bains (Hôpital militaire)	Pyrénées - Orientales.	250	62°1	0,32	»	»	0,01	0,008	0,046	0,01	»
3	Ax (Rossignol).	Ariège	716	77°6	0,23	0,003	»	0,02	0,009	0,03	0,009	»
4	Bagnères-de-Luchon (Bayou).	Haute-Garonne.	630	68°	0,35	0,014	»	0,076	0,003	0,006	0,009	»
5	Barèges (Tambour).	Hautes-Pyrénées	1 232	45°	0,27	0,02	»	0,4	0,01	0,017	0,006	»
6	Cauterets (César)	—	1 200	50°	0,25	»	»	0,02	0,01	0,03	0,006	»
7	Eaux - Chaudes (Le Clot).	—	675	36°	0,32	0,008	»	0,009	0,008	0,07	»	0,07
8	Molitg (Lloupia).	Pyrénées - Orientales.	450	37°5	0,23	»	»	0,015	0,009	0,02	0,005	»
9	Saint-Sauveur.	Hautes-Pyrénées	770	»	0,25	0,02	»	0,02	0,01	0,03	0,008	»

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX THERMO-MINÉRALES 111

LA RÉGION DE VICHY

(Éléments chimiques.)

BASES				CO ² libre.	CO ² des bicarbonates.	HCl	SO ⁴ H ²	PbO ²	SiO ²	As ² O ³	III	BrH	SOURCE ET DATE de l'analyse.
FeO	SO	MnO	AlO ³										Analyses en grammes par litre.
0,007	»	»	»	5,11	0,34	0,16	0,02	0,07	»	»	»	»	In Carnot (1885). Parmentier.
0,01	»	»	0,004	4,53	0,34	0,13	»	0,01	0,001	»	»	»	
0,01	»	»	»	0,86	0,07	0,01	0,02	0,03	»	»	»	»	In Carnot (1885).
0,007	»	»	»	0,44	0,24	0,08	0,03	»	0,03	»	»	»	
aces	»	»	»	0,26	0,44	0,33	0,18	0,02	0,06	traces	»	»	Willm (1881).
0,001	»	»	»	0,19	0,11	0,35	0,19	»	0,06	0,0005	»	»	
0,003	»	»	»	0,28	0,05	0,35	0,18	»	0,05	0,0005	»	»	
»	»	»	»	0,18	0,12	0,33	0,19	»	0,06	0,0005	»	»	D ^r Parmentier (1889).
0,006	»	»	0,004	2,40	3,34	0,31	0,17	traces	0,01	0,001	»	»	

SODIQUES FRANÇAISES

NaCl	KCl	MgCl ²	NaBr, KBr	NaI, KI	Na ² O CO ²	K ² O CO ²	Li ² O CO ²	CaO CO ²	MgO CO ²	FeO CO ²	BORÉ	ARSENIC	PHOSPHATE	SILICE	SiO ² Na ⁺
0,03	»	»	»	traces	»	traces	traces	0,19	0,001	0,01	»	»	0,006	0,04	»
0,036	»	»	»	traces	0,08	»	»	0,01	0,0006	»	trace nette	»	»	0,05	»
0,02	»	»	»	traces	0,04	»	»	0,007	0,0006	»	traces	traces	traces	0,09	»
0,09	»	»	»	»	0,03	»	»	0,01	0,0017	»	traces	»	traces	0,09	»
0,04	»	»	traces	traces	»	»	»	»	»	»	traces	»	traces	0,05	0,058
0,06	»	»	traces	traces	»	»	»	»	»	»	traces	»	traces	0,045	0,028
0,08	0,007	traces	»	traces	»	»	»	»	»	»	»	traces	»	0,049	0,018
0,017	»	»	»	traces	0,07	»	»	0,008	traces	»	traces	traces	»	0,045	0,02
0,07	»	»	»	traces	»	»	»	»	»	»	traces	»	traces	0,04	0,03



Si l'on prend comme type une des sources de Bagnères-de-Luchon, la source Reine, on voit que, sur un résidu total de 1/3 de gramme par litre, c'est-à-dire très faible, les éléments dominants sont, par ordre d'importance numérique : $\text{NaCl} = 0,08$; $\text{Si O}^2 = 0,07$; $\text{Na}^2\text{S} = 0,05$; $\text{CaOCO}^2 = 0,03$; $\text{Na}^2\text{OS}^2\text{O}^2 = 0,006$; $\text{Na}^2\text{OSO}^3 = 0,04$; $\text{K}^2\text{OSO}^3 = 0,008$; $\text{Na}^2\text{OCO}^2 = 0,007$.

D'une source à l'autre, la proportion des éléments varie ; mais à Barèges, par exemple, on retrouve aussi, comme éléments principaux, le silicate de soude et le chlorure de sodium, puis le sulfure de sodium, le sulfate de soude et l'hyposulfite de soude. A Saint-Sauveur, l'ordre est exactement le même. Aux Eaux-Chaudes, c'est encore le chlorure de sodium et le silicate de soude qui dominent, avec les sulfates de soude et de chaux ; mais la proportion de sulfure de sodium est beaucoup plus faible : $\text{Na}^2\text{S} = 0,009$ contre $\text{Na}^2\text{OSO}^3 = 0,069$.

On voit donc qu'à s'en tenir aux résultats de l'analyse brute, ces sources sulfurées sont, avant tout, des sources chlorurées sodiques très faibles.

On y remarque, presque toujours, la présence d'un élément accessoire, qui peut présenter quelque intérêt : c'est le bore, probablement emprunté, comme la soude, aux roches cristallines.

Pour l'usage médical, on attache une importance spéciale à la sulfuration et à l'alcalinité de ces eaux.

Tout d'abord, l'alcalinité, dont nous n'avons qu'un mot à dire, est due surtout, comme le montrent nos analyses, à du silicate et à du carbonate de soude. Le résidu de l'évaporation d'une eau sulfureuse, même si on l'a distillée dans le vide, est, d'après M. Willm, alcalin et fait effervescence avec les acides.

Quant à la sulfuration, qui est le caractère le plus frappant de ce genre de sources, elle a donné lieu à de très nombreux travaux, qui ne semblent pas avoir tranché le problème et l'on ne sait pas encore exactement quelle est la nature du principe sulfuré qui joue un rôle actif dans ces eaux¹

¹ Voir, à ce sujet : 1853. FONTAN. *Recherches sur les eaux minérales des Pyrénées, de l'Allemagne, de la Belgique, de la Suisse et de la Savoie* (1 vol. in-8° de 510 p., chez J.-B. Baillière, p. 6 à 157). L'auteur étudie ce qu'il appelle le blanchiment des eaux de Luchon, le bleuissement de celles d'Ax, la lactescence de celles de Cadéac, la couleur jaunâtre de celles de Barèges, le louchissement de celles de Molitg, puis les substances organiques (pyrénéine, sulfurine). Suivant lui (p. 430), il y a un rapport entre l'abondance du principe sulfureux et la proximité du centre de la chaîne (Maladetta), soit quand on s'éloigne de Luchon dans la longueur des Pyrénées, soit transversalement à la chaîne (!)

Généralement, on admet que le principe sulfuré est le sulfure de sodium Na^2S , bien que sa chaleur de formation par la soude et le sulfhydrate soit nulle, en sorte que ces deux corps ne réagissent pas l'un sur l'autre et que le sulfure se dissocie, au contraire, en sulfhydrate de soude. Quelquefois, on a fait intervenir le sulfhydrate.

La décomposition de l'un comme de l'autre sels donne également de l'hydrogène sulfuré libre, dont la proportion varie avec les eaux.

En outre, l'oxydation des eaux sulfurées peut mettre en liberté du soufre divisé (comme à Ax), ou du polysulfure, comme à Barèges, avec des hyposulfites et des sulfates.

Nous ajouterons que, dans la plupart des eaux sulfureuses, il existe, à une certaine profondeur dans le griffon, une matière organique tout à fait spéciale, qui se dépose, au contact de l'air, en amas gélatineux, translucides ou opaques et que l'on appelle, suivant les points, *pyréneine*, *barégine*, *luchonine*, *glairine*, etc.

Il est difficile de décider d'une manière absolue si cette matière organique est une cause ou un effet de la sulfuration. Mais nous penchons fortement pour la première hypothèse et nous croyons que sa présence doit contribuer à réduire le sulfate de soude en dissolution.

Vue au microscope, elle offre une gangue muqueuse, emprisonnant des sporules ovoïdes dans un état de germination plus ou moins avancé. Souvent, elle est colorée en noir par du sulfure de fer.

Certaines sources en relation avec les volcans sont également très riches en hydrogène sulfuré, qui donne à l'air de l'acide sulfureux et de l'acide sulfurique. avec dépôt de soufre libre. On les qualifie généralement de *sources sulfureuses*. Elles se rattachent, par un lien intime, aux solfatares, qui sont un prolongement direct du volcanisme, sous forme de jets de vapeur d'eau mélangés d'hydrogène sulfuré et aux fumerolles volcaniques elles-mêmes. dans lesquelles on retrouve des produits semblables.

L'acide sulfurique contenu dans les eaux peut, à son tour, exercer des réactions diverses, soit sur les roches avec lesquelles elles se trouvent en contact, soit sur les sels qu'elles contiennent déjà.

Le gypse et l'alun sont parmi les produits les plus habituels des solfatares.

5° Sources indifférentes, indéterminées ou alpestres (wildbade
 — La catégorie de sources, que nous admettons ici, figure rarement dans les statistiques et les tableaux d'eaux thermales. n'est, en effet, pas une eau thermale, ni une eau douce quelconque dans laquelle l'analyse ne découvre des traces, si faibles soient-elles, d'un ou de plusieurs sels : en sorte que toutes les sources haute température et très faible minéralisation, désignées par nous sous le nom de sources alpestres, peuvent être considérées suivant les cas, comme sulfatées sodiques, chlorurées sodiques, bicarbonatées calcaires, ou ferrugineuses, etc. Mais il nous semble qu'il y a un véritable abus des mots et de la statistique à ranger, par exemple, dans un même groupe, l'eau de Salies-de-Béarn, qui contient 255 gr. de chlorure de sodium par litre, et l'eau de Plombières qui en renferme 0,01 gr., c'est-à-dire beaucoup moins que l'eau de pluie sur les côtes de la Manche. On ne peut même pour ce nous semble, invoquer, en faveur de ces classifications très mécaniques, la question médicale ; car nous ne croyons pas que le mode d'action de ces eaux (peut-être en grande partie hydrothérapique) ait été encore bien sérieusement déterminé.

Au contraire, il est évident pour un géologue que, dans les régions de roches cristallines ou de terrains métamorphiques non solubles ayant été soumises à des dislocations récentes et offrant par suite à la circulation rapide des eaux de longs circuits profonds, on trouve toute une série d'eaux, avant tout remarquables par leur haute température et leur débit abondant, et dont la minéralisation peut, d'ailleurs, être quelconque, suivant la nature feldspathique calcaire, légèrement pyriteuse, etc., des roches traversées.

Ce sont toutes ces eaux, particulièrement fréquentes, comme on pouvait s'y attendre, le long de la chaîne des Alpes, sur son versant externe et fissuré, en Suisse, en Tyrol, etc., que nous appellerons les sources alpestres. On peut en prendre comme type Ragaz dans les Grisons, Gastein dans le Tyrol, Plombières dans les Vosges, dont nous donnons ci-dessous la composition. Le seul inconvénient, que nous ne nous dissimulons pas, d'adopter ce groupe nouveau (ou du moins peu usité en France), c'est qu'il définit mal ; car la teneur très faible des eaux de Ragaz, de Gastein, ou de Plombières n'est pas, comme résidu fixe, inférieure à celle de beaucoup d'eaux étudiées antérieurement et notamment la plupart des eaux sulfurées des Pyrénées (Eaux-Chaudes, Carterets, Saint-Sauveur, Barèges, Bagnères-de-Luchon, Ax, Amé-

les-Bains, etc.), dont aucune ne contient plus d'un tiers de gramme de résidu fixe par litre. Mais il faut ajouter, pour caractériser ces eaux indifférentes, que, dans leur faible minéralisation, n'entre pas le principe sulfuré, auquel on attribue, même à des doses infinitésimales, une action efficace et qui se décèle immédiatement par des caractères physiques manifestes. Sans empiéter ici sur le terrain médical, il est possible que, dans les eaux indifférentes, quelque principe mal reconnu jusqu'ici ou quelque phénomène physique en rapport avec leur circuit profond, contribue de même à l'effet thérapeutique.

	TEMPÉRATURE	RÉSIDU FIXE		NaCl	KCl	LiCl	NaBr	NaI	Na ⁺ OSiO ⁻	K ⁺ OSiO ⁻	CaOSiO ⁻	Na ⁺ OCO ⁻	K ⁺ OCO ⁻	CaOCO ⁻	MgOCO ⁻	FeOCO ⁻	Na ⁺ OSiO ⁻
Ragaz.	38°	0,30	0,05			trace	trace	trace	0,03	0,007		0,006	»	0,13	0,05	0,001	
Plombières.	70°	0,37	0,01			trace			0,42	0,01		0,056	»	0,02	0,001	trace	0,06
Gastein.	71°	0,37	0,05						0,20	0,0017	0,05	0,006	»	0,05		0,007	0,03

§ 3. — *Gaz des Eaux thermo-minérales.*

En énumérant les principes chimiques contenus dans les eaux thermo-minérales, nous avons laissé de côté, jusqu'ici, les gaz, qui peuvent s'y trouver en proportion plus ou moins forte et dont l'influence thérapeutique est souvent considérée comme très sensible¹. On a quelquefois distingué ces gaz en *spontanés* et *dissous*.

Les gaz spontanés sont ceux que les eaux charrient avec elles et qui se disséminent dans l'espace, dès qu'ils ne sont plus soumis qu'à la pression atmosphérique; les gaz dissous sont, au contraire, ceux qui restent en dissolution à cette pression et dont la nature est évidemment la même que celle des gaz spontanés, mais dont la proportion peut être très différente, puisqu'elle dépend, avant tout, de la solubilité: solubilité qui décroît de l'hydrogène sulfuré à l'acide carbonique, à l'oxygène et à l'azote. D'une façon générale, on remarque que la proportion des gaz dis-

¹ On a cependant abandonné l'idée d'une action produite par l'azote gazeux.

sous est, comme on devait s'y attendre, d'autant plus forte que les eaux sont plus froides.

Quand on cherche à concevoir l'origine de ces gaz dissous dans les eaux thermales, on voit que la majeure partie d'entre eux doit être apportée par elles de la profondeur, soit qu'elles les aient amenés depuis leur point d'infiltration, ou qu'elles les aient recueillis dans leur circuit souterrain sous forme de fumerolles, ou encore qu'ils proviennent de réactions chimiques. Une faible partie peut être introduite par la dissolution des éléments de l'air en contact avec l'eau dans le griffon même par un mélange d'eaux superficielles aérées ou par des réactions opérées sur ce griffon, telles qu'une réduction de sulfates donnant de l'hydrogène sulfuré.

On peut, dès lors, prévoir aussitôt une certaine relation de la nature et de la proportion de ces gaz, d'une part avec leur solubilité dans l'eau, de l'autre avec la composition chimique des eaux thermales, composition qui peut, à son tour, être influencée par la présence des gaz eux-mêmes.

Nous allons bientôt passer en revue les principaux gaz des eaux thermales : mais il convient, avant tout, de faire une remarque générale sur la façon dont se recueillent ces gaz et, par suite dont se font les analyses de gaz apportés par l'eau.

En ce qui concerne les gaz spontanés, il y a toujours dégagement irrégulier d'un point à l'autre de la source thermale, ou, en un même point, d'un instant à l'autre. Quant aux gaz dissous, leur proportion dépend de la pression barométrique et du temps écoulé depuis que l'eau thermale a été recueillie.

Il en résulte forcément des causes d'erreurs dans les prises d'essai et des divergences dans les analyses.

On peut recueillir les gaz dans des éprouvettes, en munissant au besoin celles-ci, quand la surface de l'eau n'est pas facilement accessible, d'un long tube terminé par un entonnoir et descendant tout le système, plein d'eau minérale, jusqu'à la surface de l'eau. Les gaz, qui sortent de l'eau en crépitant ou par bulles, remplissent bientôt l'éprouvette, et l'on peut les conserver en les faisant passer dans des cloches, qu'on soude à la lampe.

L'analyse, qui ne porte guère que sur les gaz acide carbonique, carbure d'hydrogène, oxygène, azote, hydrogène sulfuré, est généralement assez simple.

De tous ces gaz, que nous allons maintenant passer en revue,

le plus abondant de beaucoup est l'*acide carbonique*, qui, dans les sources en relation avec des massifs volcaniques tertiaires ou récents, joue un rôle tout à fait essentiel et caractérise ce qu'on appelle les sources acidulées (*Säuerlinge*).

Nous avons déjà dit un mot de cette question à propos des sources carbonatées et nous aurons à y revenir, quand nous essayerons d'expliquer l'origine des éléments divers contenus dans les eaux.

En outre, les tableaux II et III (p. 108 et 110) donnent la proportion de l'acide carbonique libre dans un certain nombre de sources.

Cet acide carbonique peut (comme les autres gaz, d'ailleurs, mais avec une intensité particulière) donner lieu à des bouillonnements tumultueux, soit constants, soit intermittents, qui dépendent des accumulations de gaz dans les fissures internes, de la pression barométrique, etc.

Parfois l'eau minérale semble en ébullition et s'élève à une grande hauteur au-dessus de la source (*sprudels*); ailleurs, les gaz apparaissent seulement sur l'eau, sous forme de perles brillantes, d'un volume variable.

La proportion d'acide carbonique libre (en dehors de l'acide carbonique combiné) atteint, comme nous l'avons vu, 3 grammes par litre dans les eaux très minéralisées. Elle pourrait, théoriquement, s'élever à 11 gr. dans une eau saturée de gaz : cette eau dissout, à la pression ordinaire et vers 20°, environ son propre volume d'acide carbonique.

Une certaine quantité d'acide carbonique est, du reste, un élément constant dans les eaux souterraines, où sa présence peut résulter simplement de l'introduction d'air atmosphérique, avec les divers gaz qui le constituent, ou d'une attaque légère sur des calcaires.

Après l'acide carbonique, on peut citer l'*hydrogène carboné*, dont les dégagements abondants produisent les *volcans de boue*, les *salses*, *salinelles*, *macalubes*, *fontaines ardentes*, etc., et autres phénomènes, représentés par des types classiques dans les Apennins, au Caucase, etc.

La plupart des eaux salées et des gisements de sels contiennent, pour des raisons qui ne sont pas encore bien élucidées, une certaine proportion d'hydrocarbures, qui parfois prend le rôle essentiel et, réciproquement, on sait que la plupart des gîtes pétrolières (Pensylvanie, etc.) sont associés à des sources salées. On trouve, en outre, du carbure d'hydrogène en petites proportions

dans les gaz dégagés par diverses sources : ainsi ceux d'Aix-la-Chapelle en contiennent 2 p. 100.

Puis vient l'*hydrogène sulfuré*, très fréquent dans les sources sulfurées calciques et dont les solfatares produisent, on le sait, de fortes proportions. Nous avons donné¹ la teneur en hydrogène sulfuré de quelques sources sulfurée calciques froides de Suisse.

Les gaz, qui constituent la majeure partie de l'air, *oxygène* et *azote*, se retrouvent, tout naturellement, dans les eaux, qui ont pu les entraîner de leur point d'infiltration jusqu'à leur sortie. L'azote est, d'ailleurs, constant dans les dégagements volcaniques. La proportion relative de ces deux derniers gaz dans les eaux dépend, sans doute, de leur solubilité, qui tendrait à enrichir le mélange dissous en oxygène ; mais elle est très influencée par les réactions chimiques, qui ont pu se produire en profondeur et qui ont généralement une tendance à absorber de l'oxygène.

Ainsi les gaz dégagés par les eaux chlorurées sodiques de Bourbon-l'Archambault contiennent 64,2 d'azote contre 2 d'oxygène et 33,7 d'acide carbonique.

Les eaux sulfurées sodiques, toujours chaudes et revenant, par suite, d'une grande profondeur, ne contiennent guère que de l'azote, tandis que les eaux sulfurées calciques, qui sont froides et superficielles, renferment, en même temps, de l'hydrogène sulfuré, de l'acide carbonique et parfois de l'oxygène²

La présence de l'*hydrogène* libre a été reconnue par Bunsen dans les geysers d'Irlande et, par d'autres savants, dans les soffioni de Toscane ; on retrouve le même gaz dans les dégagements volcaniques sous-marins, où il paraît produit par la dissociation de l'eau.

Enfin, nous ajouterons, à titre de curiosité, que M. Bouchard et Troost ont constaté récemment dans les eaux thermales de Cauterets, la présence de traces d'*argon* et d'*helium*³. L'une des sources examinées par eux ne contenait que de l'hélium ; l'autre, avec l'hélium, un élément inconnu différent de l'argon ; la troisième, de l'argon et de l'hélium.

¹ Page 106.

Voir : *Dictionnaire* DURAND-FARDEL, article *Azote*. On a attaché un moment quelque importance physiologique à la présence de l'azote dans certaines eaux des Pyrénées, dites *azoades*, telles que Panticosa, Bagnères-de-Bigorre et Cauterets.

(C. R. 2 septembre 1895, t. CXXI, p. 392.)

§ 4. — *Origine des principales substances et des gaz contenus dans les eaux thermales. Relations de la nature des eaux avec celle des roches au voisinage.*

L'hypothèse, que nous avons longuement développée jusqu'ici sur l'origine des eaux thermales, aura suffisamment montré que nous ne considérons pas leur composition chimique comme un phénomène mystérieux et inexplicable, en rapport avec des causes tellement profondes qu'elles échappent à nos moyens d'investigations.

Au contraire, bien qu'il se rencontre assurément dans l'application mainte difficulté de détail, et qu'il puisse se présenter quelques exceptions pour les sources des régions volcaniques, nous croyons qu'on doit, en principe, arriver à retrouver, par l'étude géologique de la région considérée, l'origine des éléments chimiques que renferme une eau thermale quelconque et, jusqu'à un certain point, l'explication de la proportion relative dans laquelle ces éléments y sont dissous¹. C'est là un indice de plus du lien tellement intime, qui rattache, pour nous, de toutes façons, les eaux thermales à la géologie générale d'un pays et nous n'avons pas besoin de faire remarquer toutes les conséquences pratiques qui en découlent, tant pour la préservation ou l'enrichissement des sources déjà existantes que pour la découverte de sources similaires.

Deux paragraphes précédents ont déjà été consacrés, l'un à faire l'énumération qualitative des divers corps chimiques que peuvent renfermer les eaux minérales, l'autre à montrer leur proportion quantitative et leurs groupements habituels. Les tableaux que nous avons donnés à ce propos et les indications que nous nous sommes déjà trouvé fournir, chemin faisant, sur le gisement des sources analysées, auront mis en lumière une loi intéressante, qu'on n'a pas toujours songé à énoncer, tant on la trouvait naturelle et évidente : c'est l'association ordinaire des sels, dans les eaux minérales, par groupes caractéristiques, qu'on rencontre

Voir, sur l'altération chimique des roches par la circulation des eaux superficielles, l'ouvrage de LUDWIG, *Die natürlichen Wässer in ihren chemischen Beziehungen zu Luft und Gesteinen* (Erlangen, 1862); cf. une note récente de M. TERMIER, *sur l'élimination de la chaux, par métasomatose, dans les roches éruptives de la région du Pelvoux* (Bul. Soc. géol., compte rendu somm., 21 mars 1898).

fréquemment dans les eaux d'une même région, ou dans les eaux du même type provenant de régions différentes, association certainement due aux conditions géologiques dans lesquelles s'est faite la minéralisation de ces eaux.

Cette loi, envisagée dans son ensemble et dans ses conséquences générales, se rattache assez intimement à une autre, que nous essayerons plus tard de démontrer et d'interpréter dans une partie ultérieure de cet ouvrage : c'est la localisation des sources thermales, sur la surface d'un pays, en certaines régions spéciales, géologiquement définies, où la plupart des sources présentent une composition comparable et nous aurons à voir alors les conséquences théoriques, qui en découlent pour l'origine même des sources thermales ; mais, ici, nous voulons nous borner à envisager la question d'une façon plus restreinte et tâcher seulement d'expliquer, dans chaque cas de détail, la composition chimique des eaux par celle des terrains traversés.

Les groupements, auxquels nous faisons allusion, sont ceux, grâce auxquels nous avons pu, dans l'innombrable variété des compositions d'eaux thermales, choisir quelques types principaux, auxquels nous avons rattaché tous les autres : c'est, par exemple, l'association, sur laquelle nous avons déjà insisté, des divers chlorures entre eux et avec les sulfates alcalino-terreux ou alcalins.

Nous avons vu également déjà qu'un certain lien semblait rattacher la minéralisation des eaux à leur thermalité : ce que nous expliquons par cette simple considération que, suivant sa température plus ou moins forte, une eau est susceptible de dissoudre telle ou telle catégorie de sels.

Ainsi les eaux ferrugineuses, chlorurées sodiques, sulfatées ou sulfurées calciques n'ont pas besoin d'être chaudes pour être minéralisées ; au contraire, le sulfure de sodium caractérise habituellement des sources chaudes. La soude (sauf en chlorure) se trouve de préférence dans les eaux chaudes, en contact avec des roches cristallines qui la fournissent ; la chaux (sauf en chlorure), dans des eaux froides provenant de terrains sédimentaires, etc.

Cette minéralisation des eaux thermo-minérales paraît s'être produite de trois manières distinctes.

1. — Par simple dissolution d'éléments directement solubles dans l'eau, tels que le chlorure de sodium, le sulfate de chaux, le sulfate de soude, etc. ;

B. — Par réaction chimique d'éléments déjà contenus dans l'eau sur les minéraux des terrains traversés, ou, plus rarement, sur d'autres éléments des mêmes eaux : ainsi oxydation des pyrites, donnant des sulfates ; influence de l'acide carbonique, produisant des bicarbonates solubles ; décomposition des silicates alcalins des roches ; chlorure de sodium réagissant sur le carbonate de chaux ; neutralisation amenant le dépôt de la silice gélatineuse, etc. ;

C. — Par apports gazeux, d'origine plus ou moins profonde : ces apports semblant aujourd'hui, en dehors des régions volcaniques actives, à peu près bornés à l'acide carbonique, tandis qu'ils nous paraissent avoir eu, sous la forme de chlorures, fluorures, sulfures, etc., un rôle prépondérant dans les circulations hydro-thermales, qui ont produit les filons métallifères. Au voisinage immédiat des volcans, on trouve, en outre, une abondance spéciale de bore, d'arsenic, etc. Ces divers points vont se trouver expliqués en étudiant successivement la formation des eaux salines, carbonatées, sulfurées sodiques et alpestrées.

1° Eaux salines : chlorurées sodiques, sulfatées calciques, sodiques et magnésiennes, etc. — Bien qu'on puisse concevoir théoriquement, par exemple dans des régions volcaniques, le cas d'une eau chargée de principes chlorurés à haute température et agissant, pour les décomposer et se les assimiler, sur les éléments alcalins des roches, les eaux salines paraissent, en principe, minéralisées par simple dissolution : cette solution s'étant opérée principalement sur les résidus d'évaporation de bassins lagunaires, remontant eux-même à diverses périodes géologiques anciennes ; notamment, pour l'Europe, au permien, au trias, ou, dans le tertiaire, au lutétien et à l'helvétien ¹

Nous avons, en outre, à signaler des cas, en somme accessoires, où le chlorure de sodium a dû être enlevé simplement aux faibles traces de ce sel, que renferment la plupart des roches cristallines et volcaniques ; celui encore, où il viendrait primitivement d'un emprunt fait par les vents aux vagues de la mer pulvérisées ² ; ou

On sait combien anciennement les gisements de sel et les sources salées ont attiré l'attention : d'où tant de noms de lieux, dont la racine contient le mot sel, ou source salée, en diverses langues : les villes d'Angleterre terminées en *wich* ; les Salies, Salins, Salat, Saléon, Sales, Satalval, de France ; les Salzbronn, Salzhausen, Salzburg, Salzungen, d'Allemagne ; ou encore les Hall, Halle, Hallstadt, Hallein, Reichenhall, etc., du Tyrol.

Travaux de POSZEPNY, *Zur Genesis der Salz Ablagerungen* (Ak. d. Wissensch, 1877, t. LXXVI).

enfin celui, où l'eau de la mer s'infiltrerait dans les fissures souterraines, comme cela doit arriver fréquemment sur des rivages fracturés et, en particulier, dans les régions volcaniques, etc.¹.

La composition de la plupart des eaux salines dépend donc, avant tout, de deux séries de phénomènes successifs : 1° conditions de l'évaporation lagunaire, très variable suivant les cas ; 2° conditions de la redissolution actuelle des sels déposés, influencées par la température de l'eau, par la présence d'autres sels, etc.

Nous n'avons pas à revenir ici sur la façon dont s'est faite l'évaporation lagunaire : question que nous avons longuement traitée ailleurs² et dont il nous suffira de rappeler quelques résultats principaux.

Comme on le sait, le premier effet d'une évaporation incomplète, portant sur une quantité limitée d'eau de mer, est de précipiter du gypse, puis du chlorure de sodium et, en dernier lieu, dans des cas beaucoup plus particuliers et plus rares, la série des sels potassiques et magnésiens.

Les lois bien connues de ce dépôt font que le sel gemme est accompagné ordinairement, dans ses gisements naturels, par un certain nombre de substances, telles que l'anhydrite ou le gypse, avec des proportions variables de chlorures et sulfates divers, des bromures, des traces d'acide borique, etc.

On constate, dans ces gisements mêmes, que, suivant les cas et pour des raisons parfois très complexes, dans l'étude desquelles il serait trop long d'entrer ici, certains dépôts salins se trouvent renfermer des proportions exceptionnelles de certaines substances, ordinairement rares : ainsi les sels potassiques et magnésiens (polyhalite, kiésérite, etc.) à Stassfurt³, et à Kalusz ; le sulfate de soude dans diverses régions désertiques (au Chili, au Pérou, au Colorado) ; le sulfate double de soude et de chaux (glaubérite), à Cien-Pozuelos en Espagne⁴ ; les sulfates de soude, chaux et magnésie, dans les marnes gypseuses des environs de Birmenstorff (Argovie), de Sedlitz et Pullna, en Bohême, etc.⁵ ; les borates (sou-

¹ A Balaruc (Hérault), la source est à 1 m. environ au-dessus du niveau de la mer. Elle contient, sur 9,08 gr. de matière fixe, 6,80 gr. de chlorure de sodium, 1,07 de chlorure de magnésium et 0,80 de sulfate de chaux.

² *Traité des gîtes minéraux et métallifères*, t. I, chapitres du chlorure de sodium, du potassium, du gypse, etc., et *Formation des gîtes métallifères*, ch. III, p. 45.

³ *Gîtes minéraux et métallifères*, I, 129 à 162.

⁴ *Ibid.*, I, p. 521.

⁵ SEUDER, *Geologie der Schweiz*, t. II, p. 229 ; EM, REUSS, *Umgebung von Teplitz*, p. 161.

vent associés au gypse), à Sultan-Tchair en Turquie d'Asie, ou en Californie¹; les nitrates, dans la zone désertique du Chili². etc.

De semblables phénomènes se retrouvent évidemment dans les eaux, qui se minéralisent au contact de ces sels.

Un élément à peu près constant dans les gîtes de sel et dans les sources salées, dont la présence, très intéressante pour la théorie de ces dépôts, est plus difficile à expliquer, ce sont les hydrocarbures, gaz combustibles et pétroles³.

Nous avons déjà fait remarquer⁴ que cette association naturelle existe jusque dans les fumerolles volcaniques, dont l'acide carbonique paraît bien être produit par la combustion d'hydrocarbures, constatés directement dans des cas favorables; et, dès lors, pour l'école géologique qui fait volontiers intervenir les actions éruptives internes, l'explication de ce rapprochement est toute trouvée: il tient à ce que le chlorure de sodium et les hydrocarbures associés sont arrivés ensemble de la profondeur. On voit alors une preuve de cette hypothèse dans les dégagements, à la fois salés et hydrocarbonés, des volcans de boue, macalubes, etc., que l'on envisage, dans ce cas, comme une continuation atténuée du même phénomène. Nous croyons, pour notre part, que l'explication des faits observés peut être plus complexe.

Tout d'abord, il nous semble vraisemblable que les organismes, animaux ou plantes, tombés dans ces grands bains de saumure, que représentaient les lagunes en évaporation, ont dû s'y conserver, sans oxydation, ni départ à l'état d'acide carbonique, dans des conditions spéciales et contribuer à la formation de ces hydrocarbures; d'autant plus que, comme on l'a remarqué, les dépôts d'évaporation tranquille sont, par leur nature même, accompagnés seulement de sédiments très fins, surtout d'argiles, qui ont étendu ensuite, par-dessus le sel et les hydrocarbures, un manteau imperméable aux actions oxydantes superficielles⁵.

¹ *Gîtes min. et mét.*, I, 252 à 256.

² *Ibid.*, I, 419 à 424.

³ 1891, S. CALDERON, *Sur la concomitance du sel gemme et de la matière organique dans les mêmes gisements* (B. S. G. F. 3^e, t. XIX, p. 914 à 917).

⁴ Page 105.

⁵ M. LODIN a fait d'intéressantes observations sur la présence de gaz hydrocarbures combustibles dans certains filons métallifères (Pontpéan, Duncan Mine, Silver Islet, Morro Velho) et il est arrivé à la conclusion que ces gaz étaient contemporains de la formation du gisement (*Ann. d. M.*, 9^e sér., t. VIII, p. 40; 1895): ce qui les rapprocherait des gouttelettes de bitume que nous-même avons signalées dans divers filons (Kongsberg, Norberg, etc.).

Il n'est, d'ailleurs, pas absolument impossible que quelques phénomènes d'ordre interne soient parfois intervenus au milieu des évaporations lagunaires, soit pour produire un accroissement de température (nécessaire, semble-t-il, à certaines réactions chimiques), soit même pour dégager des bouffées d'hydrogène carburé¹; car il ne faut pas oublier que la constitution des grandes lagunes d'évaporation suppose, presque implicitement, des mouvements du sol, à la faveur desquels ont pu se manifester, dans la région, des actions éruptives.

Quoi qu'il en soit, pour la question spéciale qui nous occupe en ce moment, c'est-à-dire pour expliquer l'origine de la minéralisation des eaux thermales, il faut, outre les conditions de formation du gisement salin, envisager un second ordre d'idées : à savoir la solubilité relative, que présentent les divers sels accumulés dans ces dépôts en face des eaux souterraines, qui peuvent les rencontrer.

Ce second phénomène, qui concourt nécessairement, après le premier, à la constitution d'une eau minérale saline, est, on le remarquera, presque son inverse, puisque les sels ont eu d'autant plus de chances pour se déposer qu'ils sont moins solubles, tandis qu'ils vont, au contraire, se redissoudre en raison directe de leur solubilité.

Cette solubilité dépend de diverses circonstances accessoires, intéressantes à noter :

On sait, par exemple, que la solubilité du chlorure de sodium s'accroît lentement, mais régulièrement, avec la température; le gypse atteint un maximum de solubilité entre 32 et 40°; le sulfate de soude passe par des séries de maxima et de minima de solubilité, à mesure que la température s'élève. D'autre part, la présence de certains sels augmente ou diminue la solubilité des autres : ainsi les chlorures de calcium et de magnésium réduisent celle du chlorure de sodium², etc. Tous ces faits pourront avoir leur contre-coup dans la composition des eaux minérales salines.

Parmi les sources salées utilisées en thérapeutique, il en est de naturelles et il en est aussi, nous l'avons dit, d'artificielles, le mode

¹ On verra que, dans le cas des éruptions volcaniques, l'hydrogène est, de tous les corps chimiques apportés par les fumerolles, celui dont l'origine réellement interne nous paraît le plus vraisemblable.

² Cf. BERGERON, *Des eaux chlorurées sodiques dans leurs relations avec les terrains lagunaires*. (Clermont-Ferrand, Congrès d'hydrologie, 1896.)

de formation des secondes étant, d'ailleurs, tout à fait identique à celui des premières : c'est-à-dire que, par des puits et des sondages, on amène, en maint endroit, l'eau superficielle au contact des gîtes de sel, comme elle peut y arriver directement par des fissures du sol et c'est là un des modes d'exploitation le plus fréquemment employés pour le sel, l'eau salée étant pompée ensuite par le même trou de sonde.

Ailleurs encore, ayant reconnu l'existence en profondeur d'une nappe artésienne salifère, comme celle qui existe, par exemple, dans le Cheshire, autour de Northwich, on peut, par des sondages, lui procurer l'issue directe vers la surface. qu'elle trouverait en d'autres régions dans une faille ou dans un filon, et l'on obtient ainsi des sources salées, artésiennes : de toutes manières, la mise en valeur des eaux salées destinées à l'usage médical se relie très intimement à celle des eaux exploitées pour obtenir le sel gemme.

Enfin, il est même des cas, où l'eau employée en médecine est simplement l'eau-mère d'une saline, c'est-à-dire le résidu d'une concentration à feu nu, poussée jusqu'au moment où les frais de cuisson ne sont plus compensés par l'obtention de produits salins : ainsi à Salies (Basses-Pyrénées), à Salins (Jura), à Nauheim, Kreuznach, Wiesbaden, Kissingen, en Allemagne; à Bex, Schweizerhall, Rheinfelden, en Suisse, etc.¹

La plupart des gîtes de sel produisent, à leur voisinage, des sources salées et c'est souvent l'existence de ces sources salées, qui a amené la découverte, en profondeur, de masses de sel, exploitées par mines ultérieurement.

Passer en revue les diverses sources salées du monde serait donc entamer une description complète des gisements salifères. Nous nous contenterons de quelques indications générales.

Comme on peut le voir par un tableau précédent², la teneur en sel des eaux diffère très fortement d'une source à l'autre et atteint même parfois la limite de saturation. Notre tableau montre des cas, comme ceux de Salies-de-Béarn, de Hall et de Rheinfelden, où l'on a respectivement 245, 255 et 314 gr. de chlorure de sodium par litre d'eau.

A Salies, les eaux de la source Bayaa contiennent, d'après M. Willm, 245 gr. de chlorure de sodium contre 2,30 gr. de chlo-

¹ On emploie à Aix-en-Provence des eaux-mères de bassins salants.

rure de potassium et environ 7 gr. de sulfates divers. En les concentrant par la chaleur, jusqu'à ce que tout le sel industriellement séparable soit précipité, on obtient des eaux mères brunes et visqueuses, renfermant, par litre, 206 gr. de chlore à l'état de chlorures de magnésium, de calcium, de potassium, de sodium et de lithium.

Les sources les plus riches en chlorure de sodium sont toujours ainsi en relation très directe et incontestable avec des gîtes de sel (Lorraine, Franche-Comté, Suisse, Tyrol, Cheshire, bassin de l'Ebre, etc.); mais, lors même que cette relation n'est pas aussi nette, on peut encore presque toujours l'établir, ou du moins la présumer, par l'étude géologique de la contrée.

Ainsi, nous citerons, dans les Pyrénées, le rapprochement constant entre les sources salées (Salies, Dax, Pouillon, Gaujac, Briscous, Oraas, Aincille, Camarade, etc...) et les pointements d'ophites.

Or, on connaît la présence constante d'amas de gypse autour des ophites et M. Seunes nous paraît avoir bien prouvé¹ que ces ophites correspondent à des restes de voûtes anticlinales d'un terrain triasique, fortement plissé après le nummulitique.

Ailleurs, comme à Bourbon-l'Archambault, on ne connaît pas de gîte de sel; mais on est au milieu d'un bassin permien et triasique, renfermant des gisements de gypse, avec lesquels un peu de chlorure de sodium peut se trouver associé.

A Royat, le sel n'apparaît pas non plus; mais les terrains tertiaires de la Limagne renferment, en plusieurs points, du gypse² et les récents sondages des environs de Riom ont trouvé, en profondeur, des eaux salées, contenant des gouttelettes de pétrole.

Enfin, dans certains cas (et toujours pour des eaux salines à très faible minéralisation), il faut bien invoquer, tout simplement, l'existence, fréquemment constatée par l'analyse, de traces de chlorure de sodium dans les roches cristallines et volcaniques, où le sel paraît notamment accompagner le quartz.

Ainsi à Kreuznach (Prusse-Rhénane), les eaux sourdent sur des filons de porphyre feldspathique et l'on a admis que leur teneur en sel vient de ces roches, où l'on trouve 1 p. 1000 de chlorure de

Thèse sur les terr. second. et l'éocène de la région sous-pyrénéenne (Ann. d. M. 1890. — Cf. *Gîtes min. et métal.*, I, 362.

Nous en avons signalé notamment à Montpensier, Naves, etc. (*feuille de Gannat*).

sodium. Des mélaphyres, au voisinage, renferment jusqu'à 6 p. 1000 de chlorures solubles¹

Quand on fait le calcul de la quantité de sel apportée au jour par une source saline, à minéralisation même extrêmement faible, telle que celle de Bourbon-l'Archambault, on trouve 531 kg. par jour, ou 193 tonnes par an, c'est-à-dire un chiffre supérieur à ce qu'on pourrait concevoir à priori.

Pour des eaux réellement salines, ce sont des milliers de tonnes qui sont ainsi enlevés à la terre par cette sorte d'exploitation naturelle. Ainsi, pour la source de Salies-de-Béarn, qui produit chaque jour 46 000 litres d'eau tenant 245 gr. de sel, on arrive à 11 270 kg, par jour, ou plus de 4 000 tonnes par an.

On doit, dès lors, se demander si ce lessivage, prolongé pendant des siècles sur les mêmes circuits souterrains, ne peut pas avoir pour conséquence un appauvrissement progressif dans la salure des eaux et, finalement, leur épuisement.

C'est une question, qui se pose pour toutes les eaux thermo-minérales et dont la réponse théorique est évidente; car une richesse naturelle, dans laquelle on puise constamment sans jamais la renouveler, est nécessairement destinée à disparaître; mais, pour des eaux à faible minéralisation, telles que les eaux alpestres ou sulfurées sodiques, elle a peu d'importance pratique, tandis qu'elle en a une immédiate et qui saute aux yeux pour les eaux salines.

En fait, il suffit d'une observation, même peu prolongée, pour constater l'appauvrissement fréquent des sources salines, aussi bien que des sources pétrolifères, qui leur sont, à bien des égards, assimilables. L'épuisement est même souvent précipité par ce fait que les eaux dissolvantes creusent, dans le sol, peu à peu, de grandes cavités cachées, qui, un beau jour, s'effondrent, entraînant souvent des désastres à la superficie et amenant, on le conçoit, la disparition de la source.

Mais, par contre, on doit remarquer que l'abondance et le développement des gîtes salins à la surface de la terre sont extrêmes; en sorte que, presque toujours, on peut suppléer à la disparition d'une source salée, ainsi tarie, par la création d'une source voisine et identique dans la même station thermale. Souvent même, c'est la nature qui se charge de modifier progressivement

BONNARD et BERTHIER (*Ann. d. M.*, 1^{re} série, t. XIII, p. 222); — LASPEYRER (*Zeitschr. d. geol. Gesellsch.*, t. XIX, p. 854, et XX, p. 453).

les circuits souterrains, de manière à maintenir la minéralisation constante sur le même griffon.

En traitant la question de l'origine du sel dans les eaux, nous avons, du même coup, répondu au problème analogue, qui se pose pour les autres produits salins, tels que les autres chlorures, les sulfates de chaux ou de magnésie, etc. On peut seulement chercher à préciser un peu ce qui amène, suivant les cas, la prédominance de tel ou tel de ces éléments.

La présence des chlorures de potassium et de magnésium s'explique aisément, si le gîte salin, dissous par la source considérée, résulte d'une évaporation suffisamment avancée. On pourrait même avoir, si des eaux souterraines rencontraient un massif de sels potassiques semblable à ceux de Stassfurt, des eaux, où le chlorure de potassium dominerait.

Le chlorure de calcium doit être produit par une double réaction du chlorure de sodium sur le carbonate de chaux, résultant lui-même de l'intervention de l'acide carbonique.

Le brome est habituel dans les gîtes salés.

Quant à l'iode, qui y est plus rare, il se concentre aisément, même dans les eaux douces, où il n'existe qu'à l'état de traces imperceptibles, par l'influence de matières organiques, notamment de ces algues qu'on appelle les conferves.

Les sulfates de chaux, soude, magnésie, etc., font, nous l'avons vu, partie des sels précipités par l'évaporation de l'eau de mer et la très grande variété, qu'on observe dans les gisements naturels de ces substances, explique, tout naturellement, celle que l'on rencontre dans les eaux, où elle peut être encore accrue par de doubles réactions chimiques, telles que celles des sulfates sur les chlorures ou les carbonates.

Ainsi, l'on sait que, lorsque l'évaporation d'une lagune a été peu avancée, le sulfate de chaux prédomine, en général, dans les dépôts, où il peut même être seul, mais où, souvent aussi, il peut être accompagné par un peu de chlorure de sodium. Dans ce dernier cas, la solubilité plus grande du second sel tend à rétablir l'avantage à son profit dans les eaux souterraines ; mais il existe pourtant, dans les terrains gypseux, toute une série d'eaux, dites séléni-teuses, à sulfate de chaux prédominant, et Belgrand a fait remarquer, notamment, que, toutes les fois que l'on passait de la craie au tertiaire, autour de Paris, les sources se chargeaient de sulfate de chaux, jusqu'à devenir inbuables.

Nous rappellerons ici que ce sulfate peut être réduit en sulfure par des matières organiques, au voisinage de l'émergence et donner même de l'hydrogène sulfuré libre. C'est le cas de nombre de sources du bassin gypseux de Paris.

Quant aux sulfates de soude¹ et de magnésie, qui dominent dans la composition de certaines eaux minérales, comme dans les gisements salins dont elles proviennent, on explique moins aisément les conditions de leur dépôt; car le sulfate de soude ne paraît pas préexister dans l'eau de mer, et le sulfate de magnésie y reste de préférence avec les derniers sels déliquescents, c'est-à-dire avec les chlorures potassiques et magnésiens, dans les conditions qui ont produit à Stassfurt des masses de polyhalite (c'est-à-dire d'un sulfate complexe de chaux, potasse et magnésie), ainsi que de kiesérite (sulfate de magnésie hydraté); mais il est probable qu'il y a eu, dans le cas ordinaire, où on les rencontre seuls, double réaction des chlorures ou carbonates correspondants sur les sulfates de l'eau et, dans certains gisements spéciaux, on peut même admettre l'action directe de sulfates, résultant d'une oxydation des pyrites, sur les alcalis ou la magnésie des roches²

Pour la magnésie notamment, de pareils phénomènes jouent un rôle incontestable dans nombre de cas et nous avons montré ailleurs comment de grands gisements de carbonate ou de silicate de magnésie étaient évidemment dus à l'attaque de roches magnésiennes, serpentine, basalte, ou, plus exceptionnellement, dolomie³.

Aux eaux minérales de Seidschütz, Sedlitz et Pullna en Bohême, on prend, en quelque sorte, la réaction sur le fait; car ces eaux, caractérisées par des sulfates de soude et de magnésie, sortent de marnes tertiaires, principalement formées par la décomposition des basaltes, roches essentiellement magnésiennes, et l'on a même cherché, dans les péridots de ces basaltes, l'origine des traces de cuivre et d'étain, reconnues par Berzelius dans l'eau de Seidschütz.

Dans tous les cas, le fait qu'il existe des gypses très riches en sulfates de soude et de magnésie⁴ est incontestable, et suffit pour

En Sibérie, il existe divers lacs sulfatés sodiques, tels que le lac *Oustiantzéwo* (Tomsk), le lac de *Chira* (Iénisseisk), le lac *Issyk-Koul*, dans la région de Sémirétchié, etc.

² Voir, sur ces questions, les théories d'OCHSÉNIUS : 1877, *Die Bildung der Steinsalzlager*, et de BISCHOF : 1876, *Die Steinsalzbergwerke von Stassfurt*.

³ *Ann. d. mines*, juin 1897.

M. Daubrée cite : les gypses de Montmirail (Vaucluse), riches en sulfate de

expliquer l'association des mêmes corps dans les eaux minérales correspondantes.

Ayant ainsi rappelé les conditions de dépôt de ces sulfates divers dans le terrain, il faut admettre alors que l'action lessivante des eaux souterraines s'est exercée, de préférence, sur les sels les plus solubles : ce dont il résulte un enrichissement forcé en sulfate de soude et sulfate de magnésie, par un phénomène analogue à celui qu'on utilise industriellement pour extraire le sulfate de soude de la glaubérite.

Ajoutons que le sulfate de soude existe parfois, à l'état de traces, dans des eaux très chaudes et très peu minéralisées, telles que celles d'Evau, dans la Creuse, où il a pu être introduit, comme nous le supposions plus haut, par une attaque des feldspaths, concordante avec une oxydation de pyrites.

Une double réaction de sulfates sur des carbonates alcalins peut également être invoquée pour des eaux, comme celles de Karlsbad, renfermant 2,5 gr. de sulfate de soude, contre 1,3 gr. de carbonate.

De même, quand on trouve, comme aux eaux de Gran en Hongrie, le sulfate de magnésie en très fortes proportions (104 gr. par litre) avec du carbonate de magnésie¹ il est possible que ces deux sels aient commencé par avoir une même origine, etc.

2° Sources carbonatées. Origine de l'acide carbonique libre². — Quand on examine la carte d'ensemble d'un pays, où les sources minérales ont été caractérisées chacune par un signe spécial, correspondant à leur nature chimique, on voit aussitôt apparaître un fait général, qui, dans le détail, pourrait échapper à des observations trop localisées, ou rester discutable, mais qui, dans l'ensemble, est d'une évidence manifeste : c'est la localisation presque absolue des sources carbonatées à acide carbonique libre dans les régions volcaniques tertiaires ou récentes, telles que l'Auvergne, la Bohême, les Carpathes, les Apennins, etc.

Il n'y a d'exceptions à cette règle que pour quelques sources rares et isolées, où l'acide carbonique, — par un phénomène que cer-

magnésie; ceux de Birmenstorff, contenant les deux sulfates de soude et de magnésie dans des proportions extrêmement variables en des points voisins.

DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, II, 54.

Nous avons donné une note, sur cette question, au *Congrès d'hydrologie de Clermont*, 1897, p. 471; cf. WARNSDORF (*Leoh. Jahrbuch*, 1840, p. 402).

tains géologues ont voulu beaucoup trop généraliser, selon nous, — résulte de la décomposition de carbonates calcaires, ou provient plus ou moins directement de l'air.

Il peut évidemment arriver, dans ces cas spéciaux, que des eaux, déjà chargées, pour une cause quelconque, de traces d'acides, par exemple d'acide sulfurique, agissent sur des calcaires, pour mettre en liberté une certaine quantité d'acide carbonique¹; d'autre part, l'eau superficielle, à la circulation souterraine de laquelle nous attribuons les sources minérales, entraîne, au moment de son infiltration, une certaine quantité d'acide carbonique de l'air² et le simple examen des phénomènes bien connus, qui se produisent dans les grottes, montre comment la dissolution du carbonate de chaux à l'état de bicarbonate, puis la remise en liberté de l'acide carbonique avec précipitation du carbonate, peuvent en résulter.

Néanmoins, quand on examine une région à sources carbonatées abondantes, comme l'Auvergne, on voit aussitôt qu'il faut faire intervenir d'autres phénomènes, beaucoup plus généraux et d'origine plus profonde.

Là, en effet, la grande majorité des sources carbonatées se trouvent en plein massif cristallin, sans trace de roches calcaires et, au contraire, dans un pays où les preuves d'une activité volcanique récente sont innombrables.

De tous les côtés, dans l'Auvergne, le sol apparaît imprégné, comme une éponge, de masses d'acide carbonique, qui, en raison de leur forte densité, restent dans les cavités et les pores du terrain, jusqu'au moment où une eau jaillissante vient les entraîner au dehors.

Cet acide carbonique, on en constate la présence, souvent d'une façon très fâcheuse, lorsque l'on fait, à travers les roches, des galeries de mine et chacun connaît le cas des mines de plomb de Pontgibaud (Pranal), où les travaux se remplissent souvent d'acide carbonique sous le basalte; on en retrouve dans des grottes analogues à la fameuse grotte du chien de Naples, à Royat, etc.; et, surtout, on peut dire que, dans la zone des volcans d'Auvergne, le long d'une vallée quelconque, il suffit de faire un forage pour

On a, dans les mines métalliques situées au milieu des calcaires, nombre d'occasions d'éprouver ce mode de formation de l'acide carbonique par réaction d'eaux sulfuriquées sur le carbonate de chaux.

² On sait, en outre, que les eaux superficielles se chargent d'acide carbonique provenant des matières organiques oxydées au contact de l'air.

avoir de très grandes chances de rencontrer de l'eau plus ou moins chargée d'acide carbonique. A Saint-Nectaire, le sol granitique donne, de tous côtés, degros bouillons d'acide carbonique, etc.

La même association de sources à acide carbonique abondant avec le volcanisme est également manifeste dans d'autres pays, en Bohême, à Naples, au Caucase, etc., et, si l'on ajoute que l'existence des dégagements carboniques sous forme de mofettes à la fin des éruptions est un fait incontestable, il ne nous paraît pas douteux que l'acide carbonique, dans la plupart des sources minérales qui en contiennent, provient de l'activité éruptive.

La forte densité de ce gaz, en empêchant son dégagement naturel, en favorise des accumulations plus ou moins profondes, qui ne parviennent ensuite jusqu'à nous qu'entraînées par les eaux souterraines ascendantes.

On peut seulement se demander comment cette provision d'acide carbonique, contenue dans les terrains relativement superficiels que traversent les eaux souterraines, ne s'épuise pas assez rapidement et l'on est conduit à imaginer qu'il peut y avoir parfois persistance des dégagements internes pendant des périodes d'années très longues après la fin de l'éruption : ce qui concorde, d'ailleurs, avec la chaleur plus grande observée dans les couches profondes du sol en ces mêmes points et avec l'observation que chacun peut faire sur une coulée de lave au jour, continuant à dégager très longtemps de l'acide carbonique.

Resterait à chercher, où l'activité volcanique elle-même a puisé cet acide carbonique ; là nous entrons dans une question d'autant plus discutée que les éléments sérieux d'appréciation font presque complètement défaut et que, par suite, chacun se laisse surtout entraîner à la résoudre par une sorte de goût personnel et de sentiment.

Quand nous avons parlé, plus haut, incidemment, du volcanisme, nous avons dit que, pour nous, le fait essentiel en est la pénétration d'eau superficielle jusqu'à des roches ignées internes, au contact desquelles elle amène des explosions et que les grands dégagements de vapeur d'eau, qui sont le trait capital d'une éruption, nous semblent être, avant tout, le retour au jour violent de cette eau, infiltrée profondément, qui ailleurs reparait simplement à l'état de source thermale.

Dans cette hypothèse, rien n'empêche de voir, dans une partie au moins de l'acide carbonique dégagé, un produit de la décompo-

sition des carbonates que contenaient les eaux d'infiltration (surtout dans le cas de l'eau de mer) et, si l'on objecte que l'eau a dû distiller et, par suite, perdre ses sels minéraux en même temps qu'elle se volatilisait en profondeur, il n'est pas difficile d'imaginer que les éléments, ainsi remis en liberté dans ces couches souterraines, aient été rencontrés et ressaisis par d'autres eaux, accomplissant un circuit un peu différent.

Mais, d'autre part, nous avons quelque propension à admettre que cet acide carbonique des régions volcaniques peut être le produit de la combustion directe d'éléments carburés, qui, d'après tout ce que nous présumons sur la nature des magmas ignés internes, doivent exister en profondeur avec les métaux fondus, constituant une sorte de fonte ferrugineuse et magnésienne¹.

Quoi qu'il en soit, une fois l'acide carbonique libre introduit dans les eaux souterraines, les réactions de ces eaux sur les roches raversées se trouvent, surtout quand les eaux sont échauffées par un parcours profond ou par un reste de l'activité volcanique elle-même, singulièrement facilitées.

On obtient aussitôt la dissolution des alcalis des roches² sous forme de carbonates alcalins et ces carbonates, à leur tour, doivent permettre nombre de réactions chimiques, comme dans toutes les opérations de synthèse minéralogique, où on les a fait agir sous pression.

Une première question intéressante se pose à ce propos : c'est la raison, pour laquelle, dans les eaux thermales carbonatées, la soude prédomine toujours de beaucoup sur la potasse, contrairement à ce qui existe dans les roches dont ces alcalis proviennent.

Struve a fait, à ce sujet, des expériences à Teplitz, qui lui ont montré que des eaux carbonatées, mises en présence de potasse et de soude en quantités égales, dissolvent six fois autant de soude que de potasse. On sait, d'ailleurs, que les sources ordinaires ren-

¹ L'origine interne nous paraît beaucoup plus souvent admissible pour le carbone que pour tout autre métalloïde, en raison du caractère réducteur que semblent présenter les magmas profonds ; il est évidemment possible qu'il vienne également, de la profondeur, du soufre et du chlore, qui seraient alors la source première et ancienne des sulfates et chlorures de l'eau de mer ; mais, pour ces derniers corps, il est bien tentant d'imaginer aujourd'hui un simple cycle d'éléments, venant d'infiltrations marines et remontant au jour par les volcans.

² Nous n'avons pas besoin de rappeler avec quelle facilité s'altèrent les feldspaths des roches, quand l'acide carbonique intervient, même à la température ordinaire. C'est l'origine bien connue de la formation des arènes granitiques et de la kaolinisation.

ferment très rarement de la potasse, alors que la soude y est fréquente.

En outre des alcalis, on trouve dans les sources carbonatées, comme l'indique un tableau précédent¹, d'autres carbonates, tels que ceux de chaux et de magnésie.

La proportion de carbonate de chaux peut être presque égale à celle de carbonate de soude, comme à Royat (Puy-de-Dôme). Celle de carbonate de magnésie reste généralement très inférieure : à Hauterive (Allier), elle est de 11 p. 100; à Montrond (Loire), de 5 p. 100, par rapport au carbonate de soude.

La présence de ces deux bases, si fréquentes dans les terrains sédimentaires et également bien représentées dans les roches cristallines (feldspaths calcaires, minéraux magnésiens des roches basiques, etc.) s'explique, tout naturellement, dans les eaux.

Enfin, nous avons déjà mentionné des cas, où le fer devenait abondant dans les sources carbonatées, comme à Orezza (Corse). Le fer est un produit trop abondant dans la nature pour qu'il y ait lieu de s'en étonner.

3° Sources sulfurées sodiques². — L'explication précise de l'origine du sulfure de sodium, dans toute une catégorie de sources chaudes, telles que celles des Pyrénées ou, accessoirement, du Caucase et des Alpes, constitue peut-être le problème le plus réellement obscur de tous ceux qui se rapportent aux eaux thermales.

Ce n'est pas que les explications aient fait défaut. Mais il est vraiment trop facile et surtout trop invraisemblable de supposer, dans les profondeurs de la terre, de grandes réserves de sulfure de sodium (Durocher), comme ailleurs on imaginait du sulfure de bore sous les soffioni de Toscane (Dumas), ou encore d'invoquer de prétendues émanations volcaniques sulfurées, dégagées des magmas en fusion sous forme d'hydrogène sulfuré ou de sulfure de carbone (Frémy). Là, comme dans toutes les questions qui concernent les eaux thermales, les phénomènes réels ont des chances pour venir de causes beaucoup moins exceptionnelles.

Dans cet ordre d'idées, on s'est demandé si ce sulfure, et l'hydrogène sulfuré qui l'accompagne ordinairement, ne provenaient pas d'une réduction opérée par des matières organiques, ou par des

végétaux, comme la glairine, la barégine ¹, sur le sulfate de soude, tiré lui-même de gîtes salins (Bayen, Ossian Henry, Filhol, etc.), c'est-à-dire qu'on étendrait au sulfure de sodium l'explication admise par tout le monde pour le sulfure de calcium.

Une pareille théorie, très séduisante en ce qui concerne la réduction, peut également expliquer l'origine du sulfate de soude pour certaines eaux sulfurées sodiques, en relation avec des terrains contenant des gîtes d'évaporation saline et qui semblent, en effet, avoir emprunté leur sulfate de soude à ces dépôts. Elle nous paraît beaucoup moins vraisemblable, dans sa seconde partie, pour toutes ces eaux sulfureuses des Pyrénées, qui sourdent généralement au contact des roches cristallines et des terrains primaires et semblent provenir de ces roches cristallines, sans avoir eu aucune chance de rencontrer souterrainement des gîtes salins.

Dans ce cas, qui est de beaucoup le plus intéressant, on doit remarquer, d'abord, combien est faible, en somme, cette proportion de sulfure de sodium, à laquelle on attache une si grande importance spécifique : au maximum, 0,07 gr. par litre dans les eaux de Bagnères-de-Luchon, où le chlorure de sodium atteint 0,09 gr. et seulement 0,009 gr. aux Eaux-Chaudes, où il entre 0,069 gr. de sulfate de soude et 0,08 gr. de chlorure de sodium.

Ce sulfure de sodium est, dans ces eaux, constamment accompagné de sulfate de soude, qui a bien des chances, comme nous venons de le dire, pour être son origine première, surtout si l'on remarque que, dans le griffon de ces eaux à forte température, existent, en abondance toute spéciale, des algues, conferves et matières organiques susceptibles de produire cette réduction et si l'on observe, en outre, qu'avant d'arriver à ce griffon, ces eaux thermales traversent, presque toutes, des schistes primaires plus ou moins chargés de matières organiques réductrices.

En dehors du sulfate de soude, les sels qui accompagnent le sulfure de sodium sont, sans doute, si on se borne à en consulter la liste, ceux d'un gisement salifère, et notamment le chlorure de sodium, presque aussi abondant que le sulfure ²; mais ils se pré-

¹ ETARD et OLIVIER. *De la réduction des sulfates par les êtres vivants* (C. R., 6 novembre 1882). — WINOGRADSKY. *Zur Morphologie und Physiologie der Schwefel bacterien* (Leipzig, 1888).

On désigne nombre de ces eaux sous le nom de chloro-sulfurées sodiques. Aux Eaux-Bonnes, la proportion de chlorure de sodium atteint 0,26 contre 0,009 de sulfure et 0,03 de sulfate; mais, dans ce cas spécial, on l'explique par la proximité d'un petit bassin triasique,

sentent en proportions extrêmement réduites ; car le total des sels dissous par litre oscille, pour les Pyrénées, entre 0,23 gr. et 0,37 gr. : ce qui est quatre à cinq fois moins que dans les eaux de Nérís et d'EvauX, déjà si peu minéralisées et correspond à peu près à la composition du Rhin à Strasbourg (0,23 gr. par litre).

Il y a, dans la faiblesse réelle de ces teneurs, un point capital, qu'on est un peu porté à laisser passer inaperçu, quand on examine ces analyses sans chercher de points de rapprochement.

Si l'on compare, au contraire, cette teneur en sulfate de soude et chlorure de sodium des eaux sulfurées sodiques à celle d'une eau saline quelconque, minéralisée par le contact d'un dépôt salin, où il y a toujours au moins 8 ou 10 gr. et parfois 250 à 300 gr. de résidu fixe, et qu'on tienne compte de la température plus élevée des premières, qui aurait dû faciliter la dissolution, on a peine à croire que ces eaux sulfurées sodiques des Pyrénées aient été, sauf dans quelques cas particuliers, réellement minéralisées par des sels directement solubles et l'on est plutôt porté à penser que ces très légères traces d'éléments sulfatés et chlorurés ont été enlevées aux roches cristallines et terrains anciens traversés.

Pourquoi ce sulfate de soude ne viendrait-il pas surtout de l'attaque des feldspaths sodiques par des eaux sulfuriquées, ayant puisé elles-mêmes cet acide sulfurique au contact des pyrites, fréquentes dans les roches et les terrains anciens, ou même des gîtes métallifères sulfurés, dont on a remarqué, depuis longtemps, le rapprochement avec elles¹ (en voulant conclure, de là, par une déduction un peu aventureuse, que les eaux sulfureuses actuelles sont la continuation du même phénomène profond, auquel on doit le dépôt ancien de ces métaux²).

Il est à remarquer que la plupart de ces eaux contiennent des quantités, d'ailleurs très faibles, d'acide carbonique libre et, par suite, de carbonate alcalins, en sorte que leur degré d'alcalinité est, comme nous l'avons vu³, un des éléments de leur appréciation. Dans la théorie que nous venons d'émettre, la présence de cet acide carbonique s'explique très aisément par l'attaque des eaux sulfuriquées sur des terrains légèrement calcaires.

Une fois la présence du sulfate de soude expliquée, celle du

JACQUOT et WILLM. *Eaux minérales de la France*, p. 338.

A moins de supposer un mode de dissolution directe du sulfure de fer, que nous ne connaissons pas.

sulfure de sodium, de l'hyposulfite de soude et de l'hydrogène sulfuré se conçoit par des réactions chimiques très élémentaires, fondées sur des phénomènes de réduction.

Notons seulement que cette formation superficielle d'hyposulfite, et parfois de soufre libre, arrive, dans certaines stations thermales, à constituer des sources ayant des applications particulières. C'est ce que l'on appelle les *eaux dégénérées*, dont Aix-les-Bains est un type connu.

4° Sources alpestres ou indifférentes (Wildbæder, Akrothermen). — La caractéristique des eaux thermales, que nous avons qualifiées d'alpestres, est précisément de ne renfermer qu'une très faible minéralisation, avec une haute température. Il est donc très facile d'expliquer la présence des traces tout à fait insignifiantes de substances diverses que l'on rencontre dans ces eaux et l'on peut, tout au contraire, rechercher pourquoi leur minéralisation n'est pas plus forte.

Cela tient, croyons-nous, à la rapidité avec laquelle s'accomplit leur trajet, au milieu de régions très disloquées, offrant à la circulation des eaux souterraines de larges fractures et dans des terrains ne contenant pas de grandes masses solubles.

On s'est quelquefois demandé si une véritable distillation n'interviendrait pas pour ces sources, tant elles sont exemptes de sels; mais cette distillation, qui n'est nullement invraisemblable dans certains cas, ne peut guère avoir lieu, comme nous l'avons vu¹, que dans la partie profonde du circuit et c'est surtout à la remontée, c'est-à-dire postérieurement, que les eaux thermalisées doivent exercer toute leur action dissolvante sur les terrains traversés. Le fait essentiel pour les sources indifférentes est que cette action n'a pas le temps ni la possibilité de se produire.

5° Sources des régions volcaniques. — Les régions volcaniques présentent, on le sait, une abondance toute spéciale de sources thermales, qui s'explique aisément par la température élevée des terrains, même superficiels, peut-être aussi par une sorte de rochage aqueux, en relation avec celui qui produit les dégagements d'eau des éruptions.

La minéralisation de ces sources a toutes les raisons pour être

Voir plus haut p. 23.

particulièrement abondante et pour présenter quelques caractères spéciaux. En effet, la thermalité de ces eaux est souvent exceptionnellement forte et, de plus, elles se trouvent en contact avec des roches encore chaudes, gardant elles-mêmes, dans leurs interstices et leurs géodes, les sels cristallisés qui ont pu disparaître à la longue des roches anciennes ; enfin, elles ont des chances pour rencontrer des fumerolles dégagées de ces roches : ce qui les rend tout à fait comparables à celles, auxquelles nous attribuons, dans les temps anciens, l'incrustation des filons métallifères.

Le métal proprement dit, dont la présence, dans cette catégorie de sources, est la plus nette, est, comme nous l'avons vu, le mercure, déposé avec de la silice par diverses eaux geysériennes. Si l'on remarque la localisation très fréquente des gisements de mercure sur les dernières grandes lignes de plissement terrestre, on peut se demander si l'on n'est pas là réellement en présence d'un reste affaibli d'émanations mercurielles internes.

L'abondance de l'acide carbonique dans ce genre de sources volcaniques est un phénomène prévu et constant ; celle du bore et de l'arsenic peut également avoir, en majeure partie, une cause interne.

Il est un peu moins naturel, au premier abord, de remarquer combien les sources volcaniques sont souvent riches en chlorure de sodium ; le même fait, on le sait, se reproduit pour les dégagements d'eau des volcans et peut avoir la même cause : une introduction d'eau de mer, par des fissures, jusqu'au voisinage des roches fondues et sa remontée, par suite de sa densité plus faible à haute température, ainsi que de la pression des gaz ou de la vapeur d'eau.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, une eau, même très chaude, peut conserver ses principes salins dans tout ce circuit souterrain, si la pression, à laquelle elle est soumise, l'empêche de se volatiliser et, d'autre part, comme les réseaux de fissures descendantes et ascendantes doivent probablement présenter des zones communes dans la partie la plus profonde, les sels, un moment déposés, peuvent être repris par l'eau ascendante. Enfin, même en supposant que l'eau thermale remonte au jour complètement purifiée, elle doit rencontrer, au voisinage de la surface, des infiltrations qui la minéralisent.

Néanmoins, pour le chlore comme pour l'arsenic, le bore et le soufre, on peut se demander, en principe, s'il ne peut pas y avoir, aujourd'hui encore, en outre de l'emprunt aux eaux de la mer, un

apport direct de la profondeur, analogue à celui qui, dans les époques géologiques tout à fait primitives, a dû minéraliser les bassins marins eux-mêmes.

Résumé. — D'après tout ce qui précède, on voit ce qu'il peut y avoir de juste dans l'idée de classer les sources d'après leur terrain d'émergence. Ce n'est pas seulement ce terrain d'émergence qui influe ; mais, avant tout, les terrains ou les roches rencontrés par le circuit souterrain, dont il est souvent bien difficile de préciser la direction.

Il serait évidemment des plus intéressants de multiplier les examens de détail sur un certain nombre de sources thermales, comme l'ont fait Reuss pour Tepliz, Hochstetter pour Karlsbad, etc., et c'est dans cet ordre d'idées, que nous avons tenté ailleurs nous-même quelques efforts pour étudier diverses eaux du Plateau Central, Bourbon-l'Archambault, Néris, Evaux, Vichy, Chatelguyon, etc., où celles de Pfæfers dans les Grisons. Nous donnerons, plus loin, des exemples des résultats obtenus en décrivant les grandes régions de sources thermales. C'est seulement par une série de monographies semblables qu'on pourra un jour arriver à préciser ce qu'il reste encore d'obscur dans le régime souterrain des eaux.

§ 3. — *Dépôts formés par les sources thermales. Incrustation des griffons. Pétrifications. Boues, etc. Corrosions produites sur les chenaux souterrains.*

Si l'on se reporte à l'assimilation connue entre les remplissages de filons métallifères et des dépôts de sources thermales anciennes et si l'on remarque, notamment, qu'un grand nombre de principes minéraux filoniens se retrouvent aujourd'hui en dissolution dans les eaux thermales, on peut prévoir que les dépôts de ces sources actuelles seront, dans une certaine mesure, analogues à des filons. Il ne faudrait cependant pas, nous l'avons déjà dit, se laisser abuser par la longue liste des métaux, que l'on indique souvent comme dissous dans les eaux thermales et en conclure qu'il se forme aujourd'hui de véritables filons de galène, blende, etc... En réalité, dans la plupart des cas où l'on a retrouvé des traces de métaux lourds dans une eau thermale, c'est, à notre avis, non pas parce que cette eau continue à former un filon métallifère, mais, au contraire, parce qu'elle circule dans un filon métallifère déjà formé.

dont elle dissout des parcelles et tout ce qui peut se produire alors est une simple remise en mouvement, pour laquelle la thermalité des eaux intervenantes n'est même pas nécessaire et dont nous avons exposé ailleurs les caractères essentiels¹

L'immense majorité des dépôts de sources thermales actuelles est constituée, au contraire, par ce que l'on appelle, dans les filons, des gangues, c'est-à-dire par les éléments ordinaires des roches et des terrains sédimentaires, tels que le carbonate de chaux, l'oxyde de fer ou de manganèse, provenant des carbonates, le sulfure de fer, produit par la réduction des sulfates, plus rarement la silice, etc... Et c'est même un fait assez caractéristique de voir, dans nombre de stations thermales, où les eaux suivent d'anciens filons siliceux, Karlsbad, Evaux, etc., les dépôts actuels être presque exclusivement calcaires, bien que la cristallisation contemporaine de la silice soit, de son côté, un fait connu : ce qui montre la différence entre les deux phénomènes, filonien ancien et hydrothermal contemporain.

Nous allons revenir sur l'étude de ces dépôts ; mais nous voulons aussitôt indiquer leur influence pratique sur le régime des sources². Les incrustations se produisent souvent sur les conduites artificielles, tubes de sondage, etc., et, dans ce cas, il faut être en mesure de les curer, de temps à autre, si l'on ne veut arriver à des engorgements. Ils ont lieu également dans les griffons mêmes ; les eaux, peu à peu, remplissent les fissures, par lesquelles elles s'élevaient à la surface, recouvrent leur émergence d'une couche de travertin ou de silice, qui leur barre ensuite le passage³ ; et il en résulte, pour beaucoup de sources, notamment pour les sources carbonatées calciques, laissées à elles-mêmes, un déplacement progressif des griffons, auquel il peut être très simple de remédier en rouvrant, avec quelques coups de barre à mine, la fissure incrustée⁴, ou perçant, par un petit sondage, la couche de travertin.

Nous avons déjà cité de beaux exemples de ces incrustations calcaires ou siliceuses à Hammam-Meskoutine, au Yellowstone-park, etc. ; nous avons mentionné également encore, parmi les

Ann. des Mines, juin 1897.

² Voir plus haut, p. 73.

³ Voir DRU (mém. de 1884 sur les *eaux minérales du Caucase*, p. 20 et 57); travertins de Piatigorsk, etc.

⁴ C'est ce qui a été fait, en 1858, pour la source Eugénie de Royat ; en 1878 pour les sources hautes de Karlsbad (voir plus loin, p. 298).

fontaines incrustantes les plus fameuses, celles de Tambouk (Hiéropolis) sur le Méandre, en Asie Mineure, qui forment d'extraordinaires cascades pétrifiées¹

De semblables travertins existent dans plusieurs des sources du Caucase, à Géleznovodsk, à Piatigorsk, etc., et y influent notablement sur le régime des eaux; nous verrons notamment² qu'à Géleznovodsk une partie des eaux, en circulant sous le travertin, se refroidit et donne lieu à des eaux froides, de même minéralisation que les eaux chaudes, utilisées pour les refroidir par mélange.

On en trouve près de toutes les sources fortement chargées d'acide carbonique, en Auvergne, en Bohême, etc.

A Karlsbad, l'incrustation d'anciens griffons est manifeste dans le haut de la ville et l'on a pu, en les rouvrant artificiellement, retrouver des sources perdues.

A Chatelguyon et dans les sources du voisinage, Gimeaux, Saint-Myon, etc., on voit, sur 15 à 20 m. au-dessus de l'émergence actuelle, des fissures remplies de zones d'aragonite, avec souvent encore un vide central, ou des veines d'ocre ferrugineuse.

A Plombières³ bien que les eaux soient à peu près absolument pures (0,36 gr. par litre), il se produit quelques dépôts, intéressants pour nous parce qu'ils sont siliceux et non calcaires. Ainsi, à l'extrémité d'un tube de métal où s'échappe l'eau, il s'est formé, dans l'intérieur, un anneau de 7 à 8 mm. d'épaisseur, composé d'une substance blanche dure et légèrement translucide, à surface mamelonnée, avec parfois de petites stalactites. Un dépôt semblable a lieu sur les parois de grès des enchambremens et, par transsudation, à l'extérieur du canal d'amenée des eaux chaudes.

La composition est :

SiO ²	SO ² H	CO ²	Na ² O	CaO	Al ² O ³	H ² O
60,28	7,87	0,95	16,73	7,61	1,01	5,55

Voir RECLUS, *Géogr. univers.*, t. IX, p. 511, une vue de ces cascades pétrifiées. Celles d'Hamam-Meskoutine et du Parc National sont reproduites dans Daubrée (*loc. cit.*, II, 23). — On peut, en outre, pour le Yellowstone-park (Parc National), consulter l'atlas publié en 1897 par le Geological Survey des États-Unis.

² Chapitre du Captage, sur le refroidissement des eaux minérales.

³ 1862. JUTIER. *Étude sur Plombières*, p. 232.

Quelques sources thermales, telles que celles d'Hammam-Meskoutine (Constantine), de Karlsbad en Bohême, etc., produisent, en outre de leurs travertins, des pisolithes, résultant de l'accumulation de couches calcaires concentriques autour de petits fragments de quartz, feldspath, etc., en suspension.

A San Giovanni, en Sardaigne, nous avons trouvé des pisolithes d'aragonite semblables, formant des billes d'un centimètre et plus de diamètre, dans une faille, venant recouper en profondeur des gisements de plomb et zinc encaissés par les calcaires et parcourue par les eaux.

Les pisolithes d'Hammam-Meskoutine sont réunies par un ciment d'aragonite, dans lequel elles sont englobées et serrées, en s'impressionnant mutuellement à la façon des grains d'une grenade : ce qui prouve qu'elles avaient, au moment de leur dépôt, une plasticité assez grande.

M. Lacroix, qui a récemment étudié des pisolithes de diverses provenances, a reconnu que, si beaucoup d'entre elles (Vichy, San Giovanni, etc.) sont constituées par de l'aragonite fibreuse, quelques-unes d'entre elles sont composées par une forme nouvelle de carbonate de calcium, ayant subi une sorte de trempe, qu'il a appelée la ktypéite ¹

C'est peut-être ici le lieu de signaler la petite application que l'on fait parfois de ces propriétés incrustantes des eaux pour obtenir des pétrifications, vendues ensuite comme curiosités, à Saint-Alyre, Saint-Nectaire, Gimeaux en Auvergne, en Bohême, en Toscane, etc.

Pour cela, on commence par épurer l'eau en la dirigeant dans des canaux plus ou moins longs, garnis de copeaux de bois, puis de cailloux anguleux, où l'eau se débarrasse de la plus grande partie de son fer et de ses carbonates terreux.

Au sortir de ces épurateurs, l'eau incrustante (qui est une eau bicarbonatée calcique) arrive dans une construction spéciale, où est établi un escalier de bois, sur les marches duquel l'eau tombe en couches minces et en petites cascades ; c'est sur ces degrés que sont déposés les divers objets que l'on veut pétrifier : moules de médailles ou de bas-reliefs, nids d'oiseaux, fruits, animaux divers, etc., qui se recouvrent de calcaire dans un espace de temps pouvant aller de huit jours à deux mois. Les pièces placées

LACROIX. (C. R., 21 février 1898, t. CXXVI.)

en haut de l'escalier sont encore jaunies par du fer ; celles du bas sont, au contraire, tout à fait blanches.

A côté de ces produits d'incrustation, tout à fait ordinaires dans les eaux thermales, on peut en citer d'un peu plus rares, tels que la barytine, l'orpiment, etc. On a cru constater l'existence de dépôts de barytine récents à Lamalou, où se fait également un dépôt de matières ocreuses, en dissolution dans l'acide carbonique et dont la précipitation entraîne celle de l'arsenic.

A Karlsbad, M. Zepharowich a trouvé de même des cristaux microscopiques de barytine dans des dépôts récents.

La strontiane se concentre aussi dans les dépôts de certaines sources : 0,20 p. 100 à Saint-Allyre ; 0,24 à Hammam Meskoutine ; 0,32 à Karlsbad.

L'orpiment, associé à de l'opale riche en diatomées, se dépose à Saint-Nectaire (Puy-de-Dôme) au Yellowstone-park, etc.

A Saint-Nectaire, il se produit, en outre de l'opale avec diatomées et débris de roseaux, de l'orpiment, de la calcite contenant 4,57 p. 100 d'arséniate¹ ferrique et de la pyrite de fer.

De même, les traces de plomb ou de zinc, que peuvent renfermer exceptionnellement quelques eaux, se montrent tout naturellement dans leurs dépôts.

Enfin, en dehors des produits d'incrustation proprement dits, il y a lieu de signaler les dépôts boueux laissés par certaines eaux et quelquefois utilisés médicalement, comme à Saint-Amand (Nord), bien que ces boues soient, en réalité, le produit d'une réaction des eaux sur les terrains traversés et se rattachent ainsi au sujet que nous allons traiter dans le paragraphe suivant.

Ces boues de Saint-Amand sont le simple produit du suintement de sources sulfatées calciques, à travers des dépôts superficiels, marneux ou bourbeux, qu'elles délayent.

Mais, dans nombre d'autres sources, les eaux apportent de la profondeur et déposent dans leurs bassins de captage, de très fines particules en suspension, arrachées aux terrains traversés et qui, en s'accumulant, forment un véritable précipité limoneux. On en a constaté, mainte fois, des exemples en curant d'anciens réservoirs, notamment à Bourbon-l'Archambault.

En même temps qu'elles laissent des dépôts au voisinage de la surface, les eaux thermales produisent des corrosions dans la pro-

fondeur; car leur rôle se borne, en somme, à transporter, d'un point à l'autre de leur circuit, des éléments chimiques, qu'elles commencent par dissoudre, pour les reprécipiter un peu plus loin.

Ces corrosions, nous l'avons déjà dit, sont particulièrement actives au milieu de substances, très solubles comme le sel, et il se forme ainsi, parfois, sur le trajet des sources salines, d'immenses chambres souterraines, qui, un beau jour, peuvent s'effondrer en propageant les éboulements jusqu'à la surface. Dans la ville de Northwich, en Angleterre, on en a vu des exemples mémorables.

Au milieu de calcaires, le phénomène, moins intense, moins facile à constater aussi par suite de la résistance plus grande des terrains encaissants, n'en est pas moins réel, s'il s'agit d'eaux carbonatées, susceptibles de dissoudre le carbonate de chaux.

Par exemple, à *Pougues* dans la Nièvre, on a reconnu, récemment, l'existence de véritables cavités souterraines, par un procédé ingénieux, qui a consisté à descendre dans le griffon un ballon de caoutchouc, susceptible d'être gonflé d'en haut, au moyen d'un tube en fer. Là où le forage avait les dimensions normales, le gonflement du ballon arrêtait l'écoulement de l'eau thermale; mais, en arrivant à la cavité, il est devenu impuissant à obstruer l'ouverture¹.

M. Friedel a remarqué, à ce propos, que la nouvelle source de *Pougues* (source Alice) amenait au jour près de 10 tonnes de carbonate de chaux par mois, quand elle s'écoulait lentement; l'ancienne source (source Saint-Léger) en débite ordinairement une tonne par an.

Dans un autre cas, où des sources thermales sortent de calcaires dévoniens, à *Burtscheid*, près *Aix-la-Chapelle*, J. Nöggerath² a, dès 1845, reconnu, à environ 4 ou 5 m. au-dessus des griffons actuels, la présence dans le calcaire d'une série de conduits tubulaires de 0,20 à 0,90 de diamètre, par lesquels l'eau a évidemment circulé à une époque ancienne, où son émergence était plus élevée qu'aujourd'hui.

Tout autour de ces tubulures, sur environ 0,15 d'épaisseur, le calcaire est corrodé, décomposé en une masse terreuse, grise,

¹ 1897 FRIEDEL. *Sur les sources minérales de Pougues*. (Ann. d. M., 9^e, t. XII, p. 609 et 631.) — Voir p. 36, 52, 180, 184, 269.

² 1845. *Über die sogenannten natürlichen Schächte, oder geologische Orgeln in verschiedenen Kalksteinbildungen* (Karsten's Arch., 1845, p. 513). — Cette catégorie de phénomènes a dû jouer un rôle dans certaines cavités superficielles des plateaux calcaires.

presque plastique et il est visible que l'eau minérale a, elle-même, progressivement élargi les fissures, dans lesquelles elle circulait, en exerçant sur le calcaire voisin son action corrosive.

Quand il s'agit d'éléments moins solubles, comme ceux des roches cristallines et des terrains métamorphiques, en relation avec des sources alpestres, le phénomène diminue évidemment d'intensité et n'a plus d'intérêt pratique ; mais il doit cependant, nécessairement, à la longue, se traduire de proche en proche par une désagrégation lente de la roche et un élargissement des fissures.

§ 6. — *Réactions exercées par les eaux thermales sur les roches ou les objets en contact. Production de minéraux divers.*

Les réactions diverses, exercées par les eaux thermales sur les terrains, ou les objets quelconques, avec lesquels elles peuvent se trouver en contact, pendant des périodes de temps quelquefois très prolongées, présentent un intérêt de premier ordre pour le minéralogiste ; car elles permettent de saisir, en quelque sorte, sur le vif, la production de certains minéraux, dont, en d'autres gisements, on serait souvent fort embarrassé d'expliquer la provenance ; aussi ont-elles été fort étudiées et Daubrée, notamment, leur a consacré des travaux, qui sont connus de tous. Nous ne ferons que résumer, à ce sujet, les notions essentielles, en laissant de côté ce qui s'est déjà trouvé dit¹ sur les altérations produisant la minéralisation des eaux et sur les incrustations habituelles, déposées par celles-ci.

Les principales réactions sont évidemment celles causées par les acides des eaux thermales, notamment l'acide carbonique ou l'acide sulfurique, et par les carbonates alcalins.

A la faveur de l'acide carbonique ou des carbonates alcalins, les silicates, tels que les feldspaths, sont attaqués, perdent leurs alcalis, parfois aussi une partie de leur silice et se transforment en argile, ou se kaolinisent, ainsi qu'on peut l'observer constamment à la surface.

Les calcaires peuvent se dissoudre à l'état de bicarbonates dans un excès d'acide carbonique.

L'intervention de l'acide sulfurique a d'autres effets, qui varient

¹ Voir p. 119 et suiv.

suivant les circonstances, où cet acide sulfurique a lui-même été introduit dans les eaux.

Habituellement, il est le produit d'une oxydation, portant sur des sulfures métalliques et particulièrement sur la pyrite de fer, si abondante dans les terrains anciens métamorphiques et dans nombre de roches basiques.

L'oxydation des pyrites peut alors donner, comme on l'observe à Luchon, du sulfate de fer, dont la simple décomposition à l'air en un sous-sel précipite du fer hydroxydé.

La réduction du même sulfate par des matières organiques forme de l'hydrogène sulfuré, qui, avec l'oxygène de l'air, engendre de l'acide sulfurique. Les eaux, ainsi chargées d'acide sulfurique donnent, avec les éléments des roches schisteuses, du sulfate double de fer et d'alumine et un précipité noir de fer sulfuré, qui régénère, par suite, la pyrite primitive.

Ailleurs, l'acide sulfurique est un produit de combustion des solfatares, ou provient du soufre, qui accompagne certaines roches éruptives.

Agissant sur des feldspaths, cet acide sulfurique détermine, constamment, dans les roches éruptives tertiaires, la formation de sulfates multiples, dont les principaux sont l'alunite et l'alun.

Parfois encore, l'acide sulfurique est en relation avec un gisement sulfuré de plomb, zinc, etc. Quand ce gîte se trouve dans les calcaires, on peut avoir, même à la température ordinaire, du gypse, ou, plus rarement, de l'anhydrite.

D'ailleurs, comme l'a bien remarqué Daubrée, nous ne voyons, à la surface, que des réactions relativement très faibles, tandis que, dans la profondeur des filons hydrothermaux, sous de hautes pressions, les phénomènes prennent peut-être une intensité plus grande.

Il ne faut pas oublier cette considération, quand on étudie les filons métallifères, qui sont toujours, au point où nous les abordons (ne fût-ce que par l'érosion superficielle depuis leur dépôt), des formations de profondeur et quand on les compare aux incrustations superficielles des eaux thermales. Peut-être même éclaircirait-on nombre de points obscurs dans la genèse des gîtes métallifères et des roches associées, — en particulier, le contraste entre les gîtes reliés aux anciennes chaînes de plissement du globe en Norvège, en Écosse, au Canada, et ceux rattachés aux plissements récents des Alpes et des Pyrénées, — si l'on réfléchissait que, dans le premier cas, l'érosion a raboté la surface pendant

de longues périodes géologiques, jusqu'à en faire disparaître toute la partie haute faillée, disloquée, en sorte qu'on se trouve y observer la racine profonde de formations, que l'on aborde ailleurs encore dans leur zone la plus élevée.

A côté des réactions produites sur les roches naturelles, on a eu l'occasion, dans nombre de sources anciennement connues, d'étudier l'effet d'un contact très prolongé entre l'eau thermale et des substances artificielles, telles que des maçonneries romaines, ou des objets métalliques de diverses natures, restés dans les captages antiques.

Les travaux de Daubrée à Bourbonne et à Plombières, ceux de M. de Gouvenain à Bourbon-l'Archambault, etc., ont montré qu'il se formait, dans ces conditions, les minéraux suivants ¹ :

1° Dans les maçonneries romaines, il s'était développé une série de zéolithes : chabasie, harmotome, christianite, mésotype, apophyllite, avec du silicate de chaux hydraté (plombiérite), de l'opale, de la calcédoine, de la calcite, et de l'aragonite ; enfin de la fluorine (Plombières) ;

2° Des monnaies ou des tuyaux de bronze romains, s'étaient couverts de chalcosine, chalcopyrite, phillipsite, tétraédrite, avec atacamite, oxyde de cuivre, chrysocolle, carbonate de cuivre hydraté, tandis que l'étain donnait de l'oxyde d'étain blanchâtre.

Des tuyaux de plomb présentaient des enduits de galène, avec litharge, cérusite, phosgénite, anglésite.

Enfin, il s'était formé de la pyrite de fer, de la sidérose, de la vivianite et du silicate de fer hydraté.

§ 7. — *Variations avec le temps dans la composition des eaux.* *Altération à l'air.*

Lorsqu'on examine deux analyses de la même source faites, sur la même prise d'essai, dans des conditions identiques, par deux chimistes différents, on ne les trouve jamais absolument concordantes. C'est là l'effet naturel et prévu des causes d'erreur, que présente toute analyse chimique, surtout lorsqu'elle porte sur des traces aussi faibles que cela a lieu généralement dans les eaux.

¹ DAUBRÉE, *Géologie expérimentale*. — Cf. LACROIX, *Minéralogie de la France*, articles chabasie, fluorine, etc. — DE GOUVENAIN (*C. R.*, 24 mai 1873).

Mais il doit se présenter, en outre, dans cette composition, des variations d'ordre théorique, que l'on peut tout au moins prévoir, sinon généralement constater :

1° Le mélange plus ou moins prononcé avec les eaux superficielles donne, évidemment, des variations, qu'un bon captage peut amoindrir, ou même faire disparaître totalement, mais qui, bien souvent, doivent accuser une relation sensible avec l'abondance plus ou moins grande des pluies; le régime des eaux d'infiltration, qui produisent l'eau thermale, doit également influencer, surtout dans les sources à prompt circulation souterraine, comme les sources alpestres.

2° Il ne peut manquer de se produire des variations progressives, tenant au lessivage continu des éléments solubles contenus dans les roches sur le circuit des eaux et, par suite, dans certains cas, un changement continu de la minéralisation. Ces actions seraient particulièrement intéressantes à vérifier; mais elles sont trop lentes à se réaliser, et les analyses, relativement exactes, des eaux sont de date trop récente, pour qu'on ait pu faire, jusqu'ici, des observations précises à ce sujet.

Du reste, il convient de remarquer que l'action dissolvante, exercée par les eaux thermales sur leur circuit souterrain, doit, en général, se traduire par la désagrégation progressive des éléments insolubles, que ces eaux peuvent alors finir par entraîner mécaniquement; la conséquence définitive est donc, comme nous le remarquons précédemment, un élargissement, ou même un déplacement de la fissure hydrothermale.

Dans le cas ordinaire, ces eaux continueront alors à se trouver en contact avec d'autres parties intactes des mêmes roches, ou des mêmes terrains, ayant à peu près la même composition chimique, et la minéralisation des eaux ne s'en trouvera pas sensiblement altérée.

Dans un autre ordre d'idées, la composition d'une eau minérale peut se modifier au contact de l'air ou, après embouteillage, sous l'action de la chaleur et de la lumière, dans des conditions qui offrent évidemment une grande importance pour leur emploi médical.

Pour une raison ou pour une autre, les médecins sont unanimes à déclarer que l'action physiologique d'une eau thermo-minérale n'est jamais la même, lorsqu'on l'utilise sur le griffon même, ou après transport à distance; c'est surtout pour les sources

carbonatées et sulfurées que de pareils effets sont manifestes et aisément explicables.

Pour les sources carbonatées, le dégagement d'acide carbonique, résultant de la diminution de pression qu'éprouve l'eau en arrivant à l'air, amène la précipitation de certains éléments et, en particulier, du sesquioxyde de fer, venant du bicarbonate du même métal, ainsi que du carbonate de chaux. C'est même ce genre de phénomènes, qui détermine surtout l'incrustation superficielle des filons hydrothermaux.

Pour les sources sulfurées, l'oxygène de l'air, enfermé dans la bouteille avec l'eau, intervient dans un sens et détruit le principe sulfuré en donnant de l'acide sulfureux, tandis que les matières organiques, dont le contact est difficile à éviter absolument, peuvent amener inversement une réduction des sulfates.

En dehors de cette action chimique, on a admis (Lefort) que le seul effet de la lumière pouvait détruire le sulfure des eaux sulfurées calciques, tandis qu'il serait sans action sur les eaux sulfurées sodiques.

BIBLIOGRAPHIE SUR LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX THERMALES

1818. J. MURRAY. *Formule générale pour l'analyse des eaux minérales* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. III, p. 173).
1822. J. ANGLADA. *Sur le dégagement du gaz azote du sein des eaux minérales sulfureuses* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VII, p. 195).
1823. P. BERTHIER. *Sur les dépôts ferrugineux que forment les eaux minérales* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VIII, p. 356).
1827. LIEBIG. *Note sur la présence de l'iode dans les eaux minérales* (Ann. d. M., 2^e sér., t. I, p. 229).
1827. LIEBIG. *Cause qui tient la silice en dissolution dans les eaux minérales* (Ann. d. M., 2^e sér., t. I, p. 126).
1827. LONGCHAMP. *Sur une formation de pyrite dans une eau thermale*, (Ann. d. M., 2^e sér., t. I, p. 277).
1828. HENRY fils. *Sur la formation d'une eau sulfureuse* (Ann. d. M., 2^e sér., t. III, p. 202).
1829. G. GMELIN. *Sur la production du sulfate de magnésie dans les eaux minérales* (Ann. d. M., 2^e sér., t. V, p. 286).
1832. HENRY fils. *Essais pour servir à l'analyse des eaux minérales en général* (Ann. d. M., 3^e sér., t. II, p. 401).
1834. BERZELIUS. *Sur deux acides organiques qu'on trouve dans les eaux minérales* (Ann. d. M., 3^e sér., t. V, p. 399).
1838. ABICH. *Appareils pour trouver et déterminer l'acide carbonique dans les eaux minérales* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIII, p. 332).
1840. O. HENRY. *Résumé des travaux sur plusieurs analyses d'eaux minérales* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XVII, p. 584).
1841. FR. WOHLER. *Sur le dosage de l'acide carbonique et de l'hydrogène sulfuré dans les eaux minérales* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIX, p. 475).

1841. DUPASQUIER. *Nouvelle méthode d'analyse des eaux sulfureuses* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIX, p. 494).
1843. BONJEAN. *Sur la recherche de l'iode dans les eaux minérales* (Ann. d. M., 4^e sér., t. III, p. 439).
1843. DUPASQUIER. *Soufre dans les eaux sulfureuses dégénérées au contact de l'air* (Ann. d. M., 4^e sér., t. III, p. 422).
1884. A. INOSTRAZEFF. *Sur la variabilité de la concentration et de la composition des sources minérales* (C. R., t. XCVIII, p. 452).
1885. Dr LABAT. *Du degré de certitude de l'analyse des eaux*, in-8^o, 10 p., Paris.
1885. Ad. CARNOT. *Analyse des eaux minérales françaises exécutées au bureau d'essai de l'école nationale supérieure des mines* (Ann. d. M., 8^e sér., t. VII, p. 79).
1888. STEINER (A.). *Mineralwasser-Analysen*.
1893. GOLDBERG (Alwin). *Ueber Entstehung der Mineralquellen, insbesondere über die dabei stattfindenden chemischen Prozesse* Zeitsch. f. prakt. Geol. 1893, p. 92.

CHAPITRE II

DE LA TEMPÉRATURE DES SOURCES THERMALES ET DE SON ORIGINE

§ 1. — *Mesure de la température des Sources thermales. Variations de la température d'une même source avec le temps, ou suivant les circonstances locales.*

Avant d'aborder l'examen des diverses questions, qui se rapportent à la température des sources thermales, le premier point est évidemment d'apprendre à mesurer avec précision cette température. Outre l'intérêt général, qui s'attache en gros à ce genre de déterminations, il serait, en effet, bien précieux d'obtenir, sur les diverses sources d'un bassin hydrologique à un même moment, ou sur une même source à des époques successives, des observations rigoureusement comparables, qui permettraient de résoudre tel ou tel problème théorique, par exemple la loi de variation de la température d'une source thermale avec le temps.

L'exécution d'un pareil programme comporte, il ne faut pas se le dissimuler, des difficultés nombreuses ; car, d'une part les thermomètres sont toujours des instruments imparfaits, dont il est délicat d'éliminer toutes les causes d'erreur ; de l'autre, les circonstances extérieures, dans lesquelles on opère la mesure, telles que la température au dehors et la rapidité de la lecture (si l'on ne se sert pas d'un thermomètre à maxima), la profondeur à laquelle on plonge, les circonstances météorologiques amenant des infiltrations froides superficielles plus ou moins fortes, la pression barométrique pouvant modifier le débit, etc., etc., viennent, chacune de son côté, exercer leur influence. Il y aurait donc un intérêt sérieux à placer, pendant un certain nombre d'années, en des points fixes du bassin de captage de quelques sources thermales importantes, des appareils enregistreurs, dont il ne serait pas bien

difficile de contrôler les modifications propres. Mais, en dehors de ces observations continues, il est au moins nécessaire, toutes les fois que l'on prend la température d'une source thermale, d'opérer avec certaines précautions et en notant soigneusement toutes les circonstances extérieures, qui peuvent de près ou de loin influencer. Faute de ces précautions élémentaires, on se trouve, chaque fois qu'on étudie une source thermale, en face de séries de mesures présentant des divergences inacceptables.

Le premier soin est, on le conçoit, d'opérer avec un bon instrument, dont on ait étudié les erreurs à l'avance, comme tous les traités de physique apprennent à le faire.

Dans une observation thermométrique quelconque, on sait qu'il est deux causes d'erreur principales, dont il est bon de tenir compte : 1° le déplacement, avec le temps, du zéro tracé sur le verre ; 2° la variation de la capacité du réservoir sous l'action de la pression. La seconde influence, qui se fait très légèrement sentir sous les seules variations de la pression atmosphérique, pourra devenir notable, quand on opérera, sous une pression de plusieurs mètres d'eau, dans un puisard. Cette augmentation de pression agit, en effet, dans le même sens qu'une élévation de température, pour chasser le mercure du réservoir dans la tige et une partie des différences qu'on a cru observer à divers niveaux d'un puisard provient, sans doute, de cette cause d'erreur. Les deux corrections se font au moyen de tables dressées pour l'instrument : la première obtenue expérimentalement ; la seconde calculée en enfermant le réservoir du thermomètre dans un bain de mercure, soumis à des pressions variables mesurées sur un manomètre.

Mais, quand on veut opérer à une profondeur un peu forte (comme nous verrons qu'on y a intérêt), et qu'on désire une précision réelle, il est préférable d'employer un thermomètre à maxima, enfermé dans un tube rempli d'eau et hermétiquement fermé, pour éviter l'influence déformante de la pression sur le réservoir du mercure.

Il faut ensuite enfoncez son instrument très profondément dans le griffon de la source (en notant cette profondeur), de manière à échapper, autant que possible, aux influences refroidissantes de l'air et des infiltrations superficielles.

Cette question de la profondeur a une influence qu'on ne soupçonne pas toujours. Dans la plupart des sources où on a

fait des observations méthodiques, on a constaté une augmentation progressive de la température jusqu'à un certain maximum, à mesure qu'on enfonce l'instrument dans le griffon.

Quand on observe ainsi à une certaine profondeur dans le griffon, si l'on remonte le thermomètre à la surface pour faire la lecture et surtout si on le sort de l'eau, on a une cause d'erreur évidente. Il convient donc d'opérer avec un thermomètre à maxima; tout au moins doit-on se servir d'un thermomètre à mercure et chercher à faire les lectures rapidement et dans l'eau.

Le choix de l'instrument employé est d'une importance capitale et, dans les conditions où se font trop souvent les observations thermométriques sur les sources, avec des thermomètres qui peuvent donner tout au moins des erreurs de 1/2 degré, il est évident qu'on ne peut comparer les observations entre elles, pour en déduire l'existence de faibles variations continues ou périodiques, notamment d'un refroidissement lent avec le temps, qui pourrait, à la rigueur, exister, ne fût-ce que par une modification dans le circuit souterrain.

Nous ajouterons, d'ailleurs, que tant de causes, échappant nécessairement à nos investigations, peuvent agir sur la température des sources thermales, que, même avec des observations bien faites, il faudrait, croyons nous, une période d'observations très longue et une modification bien des fois constatée dans la température pour pouvoir essayer d'en déduire une conséquence théorique.

Nous citerons seulement, — ne fût-ce que pour attirer l'attention sur ce problème — quelques exemples, entre bien d'autres, de ces variations de température, qui, nous le répétons, ont été jusqu'ici fort mal étudiées et dont la plupart des cas reconnus doivent être attribués à de simples actions superficielles sans intérêt :

A *Bourbonne* (Haute-Marne), M. Drouot, en 1859, a constaté, dans le puisard civil, une température de 57° à la surface, de 58° à 2^m,50. Pendant un curage en 1855, la température y était descendue à 40°, par suite sans doute d'un drainage opéré sur les eaux froides des terrains voisins par l'épuisement du puisard nécessaire pour le curage et, toutes les fois qu'on pompe pour le service de l'établissement, la température diminue de même, par l'effet d'un drainage analogue.

Lorsqu'un semblable abaissement de température est accompagné d'une diminution dans la minéralisation, la cause en devient manifeste et ne peut être due qu'à un mélange d'eau froide.

Ainsi l'eau de la fontaine chaude de Bourbonne a passé, en 1858, de 52° à 49°,5 à la suite d'une pluie abondante et, en même temps, le débit s'est fortement accru. Même lorsqu'on observe, au même instant, à des profondeurs variables dans le puisard, les différences de température peuvent être attribuées, au moins partiellement, à cette influence des eaux froides. M. Drouot remarque, en effet, que l'eau froide, n'étant pas minéralisée, est moins dense et doit tendre aussitôt à se porter vers le haut¹.

A Bourbon l'Archambault (Allier), la température, qui n'est que de 52°,5 dans les puits de captage, est montée à 53° quand, en 1860, on a pu l'observer sur le griffon même. M. de Gouvenain, qui a fait, pendant des années, des observations sur cette source, a constaté, en outre, que la température variait d'un point à l'autre de la fissure qui donne issue aux eaux, et se modifiait également, en un même point, d'un jour à l'autre, sans cause bien déterminée, etc.

Sur toutes les sources qui sortent par plusieurs griffons, on observe des variations comparables d'un point à l'autre : ainsi, à *Cauterets*, au puits César, au puits du Pré, etc., où les températures mesurées par des observateurs différents peuvent varier de 4°. etc.

Là, comme pour tant d'autres propriétés des sources thermales, les interprétations les plus fantaisistes ont été données.

Ainsi l'on a soutenu (Guersant, en 1823, etc.) que ce calorique des eaux minérales était différent de celui produit par la chaleur des foyers : en particulier, que l'eau minérale s'échauffait et se refroidissait plus difficilement, qu'elle laissait vivre des plantes qui seraient mortes dans l'eau douce à la même température, etc. Il est à peine besoin de dire que des observations plus précises ont immédiatement montré l'inexactitude de semblables observations².

§ 2. — Causes de la température des sources thermales.

La température d'une source thermale dépend d'un certain nombre d'éléments, parmi lesquels les deux plus importants sont

M. Drouot a également observé les variations de température, qui se sont produites dans les sondages de Bourbonne, soit avec le temps, soit à la suite d'un tubage, soit après le forage de trous de sonde voisins.

Sur les idées anciennes relatives au calorique des eaux thermales, on peut consulter le dictionnaire de Durand-Fardel.

la profondeur maxima à laquelle sont descendues les infiltrations superficielles, qui lui donnent naissance et le degré géothermique en ce point, c'est-à-dire le nombre de mètres dont il faut s'enfoncer dans le sol, pour observer un accroissement d'un degré.

Il convient, en outre, de tenir compte, au moins théoriquement, de diverses actions secondaires, telles que : la chaleur résultant des phénomènes volcaniques, qui se traduit, en somme, par une diminution du degré géothermique ; l'action refroidissante des parois rocheuses, entre lesquelles l'eau thermale circule avant d'arriver au jour : la possibilité d'une vaporisation partielle et d'une condensation de la vapeur d'eau en profondeur, absorbant ou dégageant de la chaleur ; l'intervention des réactions chimiques ; le refroidissement, au voisinage de la surface, par des infiltrations froides, etc.

En raison de certaines de ces influences, et surtout de la dernière, qui a seule une importance très notable, la température d'une source thermale ne peut présenter, nous le remarquons tout à l'heure, la constance absolue qu'on lui a parfois attribuée par une conception à priori.

Accessoirement, nous examinerons une question, qui peut avoir un certain intérêt général : le calcul de la quantité de chaleur empruntée aux couches profondes par les eaux souterraines et apportée constamment à l'atmosphère terrestre.

1° Influence de la profondeur atteinte et du degré géothermique au point considéré. — Le point de départ de toute notre théorie des eaux thermales, c'est, nous l'avons vu, la constatation classique — et renouvelée, à chaque instant, par de nouvelles expériences — de l'accroissement de température du sol en profondeur. Il s'agit là d'un fait tellement connu, et étudié avec tant de détails dans les traités de géologie, qu'il nous paraît inutile d'y insister et nous retiendrons seulement la conclusion, qui résulte des observations faites dans les sondages, les puits, les galeries de mines, les tunnels de chemin de fer, etc.

En laissant de côté les très grandes profondeurs, sur lesquelles nous manquons de données précises et qui, de plus, ne paraissent pas avoir à intervenir dans notre sujet, on sait que le degré géothermique moyen de 30 à 35 m., donné par le tunnel du mont Cenis, les sondages du puits de Grenelle et de Sperenberg (au sud de Berlin). etc., paraît devoir se prolonger, avec une tendance

légère à la diminution progressive, au moins jusqu'à 5000 m.

Ce degré géothermique est, il est vrai, variable avec des circonstances locales, notamment avec l'éloignement plus ou moins grand d'un foyer volcanique ancien ou récent, et même avec la nature des roches¹; mais, comme notre but ne peut être de faire des calculs précis en des questions nécessairement aussi obscures et complexes, nous admettrons, pour fixer les idées, un degré géothermique moyen de 35 m.

Ceci posé, nous allons essayer d'appliquer le calcul à l'échauffement d'un filet d'eau, suivant un circuit souterrain pareil à celui que nous attribuons aux sources thermales, ou plutôt d'indiquer les conditions analytiques dans lesquelles se pose le problème. Bien que certaines données expérimentales nous fassent défaut pour en tirer une conclusion numérique, cela nous permettra peut-être de serrer d'un peu plus près des questions, que l'on traite généralement en quelques phrases vagues et d'arriver à mieux comprendre les conditions dans lesquelles s'effectue ce circuit.

Le premier point à examiner sera la loi d'échauffement de l'eau dans son trajet descendant, la proportion dans laquelle sa température s'équilibre avec celle des terrains traversés et les conséquences que cette absorption continue de chaleur peut avoir sur les parois mises en contact avec elle; après quoi, nous aurons à étudier le refroidissement, qui doit s'opérer pour l'eau, en remontant, par suite du réchauffement inverse des parois. On remarquera, immédiatement, que tenir compte de cette action des parois rocheuses équivaut seulement à dire qu'une source thermique à une température θ provient d'une profondeur supérieure à celle que ferait présumer l'application brutale de la règle géothermique.

Cela revient à dire que les isothermes sont très irrégulières dans l'intérieur de la terre, comme cela doit évidemment résulter des différences de conductibilité et de l'existence de foyers spéciaux volcaniques. En général, le degré géothermique est plus faible dans les terrains stratifiés (cas des mines de houille) que dans les roches cristallines (cas des mines métalliques).

On a trouvé : à Grenelle, 31,90 m.; à Mondorf (Luxembourg), 29,60 m.; à Louisville (Kentucky), 30 m.; à Oeyenhausen, 33 m. : ces divers cas dans des terrains sédimentaires sans action volcanique. Au contraire, on a eu : aux mines de Monte-Massi en Toscane, 13 m.; à Budapesth, 12,61 m.; au Comstock, 16 m. Enfin, tout récemment (*C. R.*, 22 juin 1896) dans le sondage de Macholles, près Riom (Puy-de-Dôme), en pleine Limagne, M. Michel Lévy a constaté, à 1005 m. de profondeur, une température de 79°,4 : ce qui correspond à un degré géothermique de 14,16 m. Le chiffre de 30 m., adopté dans nos calculs, paraît être, en général, dans les régions disloquées où se trouvent les sources thermales, un maximum; mais, dans la plupart des applications, ce maximum nous suffira.

L'action des parois doit, d'ailleurs, être faible, puisque les roches sont fort peu conductrices de la chaleur¹ et qu'une fois le régime permanent établi, la source thermique n'a plus qu'à y compenser, à chaque instant, une perte de calories restreinte.

Soit $A M B$ (fig. 19), un circuit hydrothermal souterrain, que nous supposons, d'abord, pour plus de simplicité, unique et soustrait à toute autre influence que celle des roches encaissantes, considérées elles-mêmes comme d'épaisseur indéfinie. Les deux portions $A M$ et $M B$ du trajet sont évidemment tout à fait différentes l'une de l'autre. Entre A et M , l'eau, circulant avec une faible vitesse dans une multitude de fissures très étroites, comparables

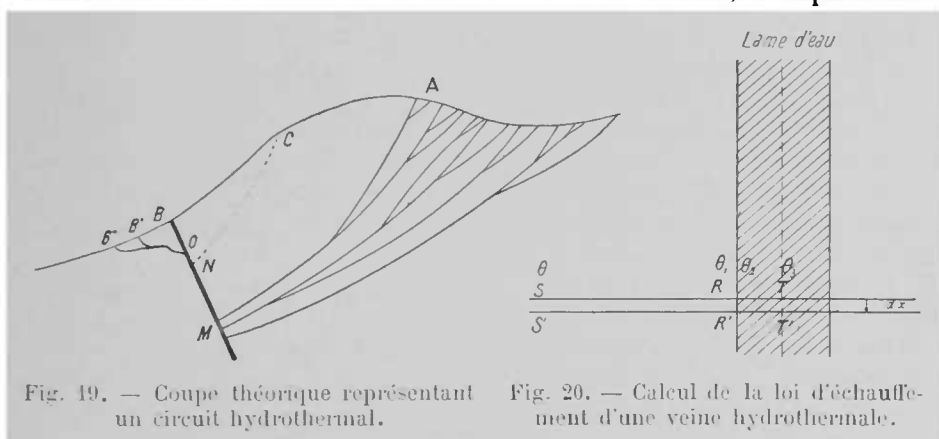


Fig. 19. — Coupe théorique représentant un circuit hydrothermal.

Fig. 20. — Calcul de la loi d'échauffement d'une veine hydrothermale.

à des tubes capillaires, s'échauffe progressivement au contact de la roche et arrive au point le plus chaud (qui, à moins de phénomènes anormaux, est aussi le plus bas M), avec une température peu différente de celle de la roche en ce point. Au contraire, dans une remontée plus rapide par une large fissure $M B$, elle parvient bientôt au jour, après avoir cédé à la roche une certaine portion de la chaleur acquise.

En dehors de tout calcul, on conçoit aussitôt, que, si les conditions étaient renversées et si l'eau arrivait en profondeur rapidement par une fissure large, c'est-à-dire sur une forte épaisseur, elle

¹ Les coefficients de conductibilité des solides n'ont donné lieu qu'à des mesures assez contradictoires.

Le coefficient de conductibilité absolue dans le système C. G. S. est 0,0049 pour le marbre (d'après Despretz); 0,0037 pour l'argile humide; 0,0034 pour l'argile et sable. Dans la houille, d'après Newman, il n'est que de 0,0003, tandis qu'il atteint 0,115, pour le plomb, 0,164 pour le fer. — Un schiste conduit beaucoup mieux la chaleur suivant le plan de ses feuilletés que perpendiculairement. (Cf. de LAPPARENT, *Géologie*, p. 486 et 496.)

pourrait ne pas avoir le temps de s'échauffer dans toute sa masse ; de même, si elle remontait lentement par un réseau de veinules capillaires, elle se mettrait, en chaque point, en équilibre de température avec la roche encaissante et déboucherait à la surface sans aucune thermalité spéciale.

L'existence d'une source thermique nécessite donc un circuit tel que nous venons de le supposer et c'est là une confirmation indirecte des idées que nous nous sommes faites antérieurement sur l'allure de ce conduit souterrain ¹

Loi d'échauffement théorique d'un circuit hydrothermal. — Essayons maintenant de montrer comment on pourrait mettre en équation les conditions, parfaitement déterminées mais singulièrement complexes, de notre problème, dans le cas le plus général.

Nous devons, tout d'abord, supposer que la circulation hydrothermale a duré assez longtemps pour qu'un régime permanent se soit établi : c'est-à-dire que les températures, en un point quelconque de la roche ou des filets d'eau, sont, par hypothèse, indépendantes du temps. Mais, bien entendu, si l'on suit une même molécule d'eau dans son trajet, sa température est, au contraire, incessamment variable avec le temps.

Cette première hypothèse n'est pas évidente ; car il pourrait arriver, par exemple, que la roche se refroidisse peu à peu, entraînant des modifications de température correspondantes dans la veine hydrostatique en contact (ou réciproquement) ; elle n'est même pas absolument exacte, puisque l'expérience constate de légères modifications, périodiques ou accidentelles, dans la température d'une source à son émergence ; néanmoins, elle nous paraît très suffisamment d'accord avec les faits pour être admise.

Nous supposons également, afin d'éviter un surcroît de complication, que l'eau circule entre des parois équidistantes, sous forme d'une lame, dont l'épaisseur est $2e$ à la descente AM, $2e$ à la remontée MB, par conséquent avec une vitesse constante pour chacun des filets d'eau considérés dans l'une ou l'autre des deux parties du trajet.

Cela posé, la loi cherchée des variations de la température avec la profondeur prendra trois formes distinctes, suivant que l'on considère l'une ou l'autre des trois régions suivantes (fig. 20) :

1^o Supposons que l'on soit dans une portion S de la roche, assez éloignée du filet hydrothermal pour être pratiquement soustraite à son influence, ou refroidissante, ou réchauffante, c'est-à-dire pour que celle-ci n'y modifie pas la température d'une fraction de degré appréciable ; cette température θ sera régie par la loi géothermique ordinaire :

$$\theta = 10 + \frac{x}{33}$$

10° étant la température à la surface et x la profondeur en mètres.

2^o Prenons un point dans la zone RS influencée par la circulation de l'eau ;

Voir p. 31.

la température doit y être fonction de deux variables, la profondeur x et la distance à la lame d'eau. En nous bornant au point R en contact avec l'eau, sa température θ_1 doit être une fonction de x , $\varphi(x)$, dans laquelle doivent évidemment intervenir, comme constantes, la vitesse et l'épaisseur de la lame d'eau, les conductibilités et chaleurs spécifiques de la roche et de l'eau.

Cette fonction doit, en outre, être solidaire de celle qui régit la température dans la troisième zone à laquelle nous arriverons bientôt, c'est-à-dire dans la lame d'eau et nous ne pouvons donc la définir encore plus complètement.

Mais nous remarquerons, dès à présent, que les conditions, pour ce point R, sont pratiquement très différentes, suivant qu'il se trouve à la descente ou à la remontée.

A la descente, un filet d'eau capillaire circule lentement, le long d'une paroi, formant une source indéfinie de chaleur croissante, avec laquelle il était au début en équilibre de température; tout fait donc présumer que sa température propre offre constamment une différence minime avec celle de la roche et que, par suite, son action refroidissante sur cette roche (très peu conductrice) ne s'étend qu'à une faible distance. On pourrait presque, dans une première approximation, supposer RS égal à zéro, c'est-à-dire $\theta^1 = 0$.

En tout cas, en admettant que l'eau prend, au point le plus profond de son circuit, la température de la roche encaissante, on ne doit risquer de se tromper que d'une fraction minime de degré, ou, pour la profondeur calculée en conséquence, de quelques mètres.

A la remontée, au contraire, une lame d'eau, relativement épaisse, peut offrir, avec la portion de la roche S non influencée par elle, des différences de température, qui, au griffon, atteignent, dans nombre de cas connus, 90° et, bien que sa vitesse plus rapide tende à restreindre son action, on peut constater pratiquement que la roche encaissante est sensiblement échauffée au voisinage de sources chaudes. Celles-ci rayonnent donc dans la roche une quantité de chaleur (tendant à refroidir la source), qu'on ne saurait négliger à priori et il en résulte, pour l'eau, une diminution de température à étudier.

Enfin, 3°, considérons un point quelconque à l'intérieur de la lame d'eau; là encore, la température θ_3 doit être une certaine fonction de la profondeur x et de la distance y à la paroi, qu'on peut se proposer de déterminer.

Malheureusement le problème d'analyse est d'une complication inextricable; car, d'une part, nous avons à considérer des molécules d'eau en mouvement, douées de vitesses variables avec y^1 et, d'autre part, un flux de chaleur, pour lequel on sait qu'il ne peut être question à proprement parler de vitesse²,

La vitesse des divers filets élémentaires, qui constituent une veine liquide, est très variable de l'un à l'autre. Ainsi les expériences de Poiseuille sur les tubes capillaires (soit à l'état statique, soit à l'état dynamique), celles de Dulong et celles de Pécelet sur la conductibilité des métaux montrent que, sur les parois de la veine, une première pellicule d'eau est absolument immobile et empêche la transmission de la chaleur, si on ne l'enlève pas mécaniquement. Cette pellicule prend, par suite, la température de la paroi : ce qui permet d'égaliser les deux températures θ_1 et θ_2 de la roche et de l'eau au contact. Cette constatation expérimentale suffit à nous prouver que l'influence refroidissante des parois sur la veine hydrothermale doit être très faible.

La chaleur n'a pas de vitesse comme la lumière ou le son. L'hypothèse fondamentale de Fourier, sur laquelle reposent toutes ces études de conductibilité, est, au

mais qui se traduit néanmoins par le déplacement d'une onde vibratoire calorifique. Ce sont ces deux mouvements qu'il s'agirait, d'abord, de combiner pour savoir suivant quelle courbe se fait, à partir d'un point T, la propagation de la chaleur dans l'eau.

Après quoi, on pourrait calculer, en utilisant la formule de Fourier, quelle quantité de chaleur rayonne, le long de courbes semblables, pendant un temps infiniment petit, une molécule d'eau, située en T, vers les divers points de la paroi et égaler la diminution de température, qui en résulte, à la différentielle $d\theta_3$ de la température θ_3 , le temps étant pris pour variable.

On obtiendrait ainsi la relation cherchée entre θ_3 et x ; mais cette relation se présente sous une forme tout à fait inutilisable; aussi, sans insister davantage, remarquerons-nous que la question réellement intéressante pour nous serait d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur de cette déperdition de chaleur à la remontée, afin de savoir de combien de mètres au maximum on risque de se tromper en calculant la profondeur atteinte par un circuit hydrothermal, d'après la simple formule géothermique.

Quand on se borne à chercher ce maximum de déperdition de température, on peut donner au problème une forme beaucoup plus simple et, comme nous allons le voir, en trouver la solution théorique, à un coefficient près, qui demanderait une détermination expérimentale.

Supposons, en effet, une barre TRS (fig. 20), de section égale à l'unité et absolument isolée, dont la portion TR, formée d'eau, possède, au début, une température t et est ensuite abandonnée à elle-même pendant un temps τ , tandis que la portion SR, formée de roche, est constamment portée à une température y , inférieure à t et décroissant avec le temps τ , suivant une loi : $y = a - b\tau$.

On se propose de chercher quelle sera, au bout du temps τ , la température aux différents points de R T.

En posant ainsi le problème, nous sommes amené à étudier un mouvement variable dans une barre immobile S T.

Tout se passe comme si nous avions deux sources de chaleur S et T, aux deux extrémités d'une barre, la température de la source S étant variable avec le temps suivant une loi connue, et celle de T variable suivant une loi à déterminer.

La température y , à un instant quelconque τ , en un point M distant de R d'une quantité x , est une certaine fonction de x et de τ :

$$y = f(x, \tau)$$

Or, la température, au même point, était t à l'origine du temps. Un élément de longueur dx , situé en M, a donc perdu, par conductibilité, une quantité de chaleur $\pi c dx (t - y)$, π étant le poids spécifique et c la chaleur spécifique.

contraire, que la diffusion d'une quantité infiniment petite de chaleur se fait instantanément à une distance quelconque. Mais le temps nécessaire à la propagation du sommet de l'onde calorifique paraît proportionnel au carré de la distance. (Voir, à ce sujet : A. CORNU. *Sur l'extension à la propagation de l'électricité des formules de Fourier relatives à la diffusion de la chaleur.* (C. R., 1878, t. LXXXVI, p. 1220.)

La section RT, de longueur e , a perdu, jusqu'au même moment z , une quantité de chaleur

$$\int_a^z \pi c dx [t - f(x, z)]$$

quantité de chaleur qui, au point R, a passé dans la roche.

Nous supposons que l'émission de chaleur de l'eau dans la roche par le point R, pendant un temps dz , est proportionnelle à la différence des deux températures de la roche et de l'eau et à un certain coefficient E, dont nous admettrons la constance, quelles que soient les deux températures.

C'est là une simple hypothèse; car nous sommes ici dans un cas tout à fait différent de celui du rayonnement, dont la loi, dite loi de Newton, a précisément la forme que nous supposons. Dans le rayonnement, les qualités physiques de la substance rayonnante influent seules, la chaleur étant émise dans un vide, que l'on suppose capable d'en absorber autant qu'on lui en donne. Ici, au contraire, c'est le milieu, vers lequel se fait le rayonnement, qui, par sa conductibilité, sa chaleur spécifique, etc., déterminera la quantité de chaleur qu'il est capable de recevoir dans un temps déterminé: quantité évidemment variable avec sa température y . E devrait donc être, en réalité, une fonction de y ¹. Mais on voit aussitôt qu'on pourrait répondre à cette objection, en considérant la valeur maxima de E, dans les limites assez étroites où varie y et en appliquant ce maximum à tous les cas. L'erreur commise ainsi n'aurait pour effet que d'exagérer la déperdition de chaleur, dont nous cherchons le maximum. De même, nous supposons constamment la température de l'eau égale à t (c'est-à-dire supérieure à sa température réelle) et celle de la roche égale à $a - bz$ (c'est-à-dire inférieure à sa température réelle).

Dans le temps z , l'émission de chaleur par R aura donc été :

$$\int_0^z E (t - a + bz) dz = \int_0^z \pi c dx (t - f(x, z)) \quad (1)$$

D'autre part, on peut écrire que, pour une section quelconque de longueur dx dans l'eau, la différence entre la chaleur entrée et la chaleur sortie correspond à la perte de calories résultant d'une diminution de température dy : soit, d'après la loi de Fourier :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{c\pi}{k} \frac{dy}{dz} \quad (2)$$

qui s'intègre :

$$y = \alpha e^{-\beta x} \sin 2\pi \left[\frac{z}{\delta} - \frac{x}{\varepsilon} \right] + \text{constante} \quad (3)$$

avec les conditions :

$$\beta = \pi \sqrt{\frac{c}{K\delta}} ; \varepsilon = 2 \sqrt{\frac{K\delta}{c}} \quad (4)$$

¹ Le coefficient E_{θ_1, θ_2} représente la quantité de chaleur passant, dans l'unité de temps, par l'unité de section, d'une eau à θ_2 degrés dans un granite à θ_1 degrés, avec lequel elle est en contact. Il est aisé d'imaginer un dispositif expérimental, qui permettrait, non seulement de mesurer E, mais de trouver pratiquement les résultats du problème que nous nous posons. On aurait, par exemple, un bloc de granite, maintenu à sa base à une température constante t et traversé par une tubulure, dans laquelle on ferait circuler de l'eau, portée d'abord à la température t , avec une vitesse assez

Nous ajouterons que, pour z et x égal à zéro, y doit être égal à t , d'où la valeur de la constante = t .

Les deux membres de l'équation sont alors intégrables, l'un par rapport à z , l'autre par rapport à x , et l'on obtient une équation, dans laquelle n'entrent que des termes en z , z^2 , $\sin z$ et $\cos z$. En développant ces deux derniers suivant les fonctions croissantes de z et égalant à zéro les coefficients de z et z^2 pour exprimer que l'équation doit être satisfaite quel que soit z , on a deux nouvelles relations entre les quatre constantes α , β , δ , ϵ , qui achèvent de les déterminer.

On peut donc arriver finalement à exprimer y dans l'équation 3, en fonction de z et de x et, par suite, en égalant z à 0, x à e dans cette équation, on obtiendrait la déperdition de température pendant le trajet, en fonction du coefficient E . Mais comme ce dernier, bien que susceptible d'une détermination physique, n'a pas encore été mesuré à notre connaissance, nous croyons inutile de développer les calculs et nous nous bornerons, pour préciser complètement les conditions du problème (ce qui pourra nous être utile dans d'autres parties de ce travail), à indiquer quelle pourrait être, dans un cas connu (celui de Bourbon-l'Archambault), la valeur des principales constantes numériques.

Nous avons là une source produisant 3 000 m³ d'eau par seconde, par une fissure de 2 centimètres de large sur 1,5 m. de long, c'est-à-dire de 300 c² de section; la vitesse à l'émergence est donc de 0,1 m. par seconde.

Or, dans toute la partie remontante du trajet MB, l'expérience acquise dans les filons métallifères nous conduit à penser que les dimensions de la fracture doivent rester, sinon tout à fait constantes, au moins de grandeur comparable, comme nous l'avons d'ailleurs supposé au début de notre calcul.

Dès lors, pour remonter de 1 503 m. (profondeur correspondant à une source de 53°, avec un degré géothermique de 35 m.), l'eau doit mettre environ 1 500 secondes, ou quatre heures, valeur de τ dans notre formule.

Admettons maintenant que cette eau provienne d'une distance moyenne de 50 kilomètres et qu'elle ait mis, pour parcourir ce trajet AM, environ six mois : ce qui doit être un minimum d'après les observations faites, soit à Pfäfers en Suisse, soit sur les puits artésiens de Paris, elle aurait donc, à la descente, une vitesse moyenne de 0,32 c. par seconde, soit environ trente fois moindre que sa vitesse à la remontée.

Il résulterait, dès lors, de cette hypothèse sur la durée du trajet AM, que la somme des sections des fissures d'infiltration serait trente fois plus forte que la section du filon de remontée MB, c'est-à-dire un peu moins de 1 m².

Si l'épaisseur d'une des fissures minces par lesquelles se font les infiltrations est de 0,2 c., RT ou e est égal à 0,1 c.

2° Influence possible d'une volatilisation. — Nous avons, dans un paragraphe précédent¹, envisagé les cas où pourrait se produire

lente pour que la durée du trajet à travers le bloc se rapproche de τ . Il suffirait alors de mesurer avec précision les températures de cette eau à divers niveaux et à son émergence.

une volatilisation et nous sommes arrivé à cette conclusion que, sauf dans les régions volcaniques, la volatilisation devait avoir lieu, presque exclusivement, dans la colonne remontante, soit en profondeur, soit à la surface même (steamboat springs, geysers, etc.).

La volatilisation en profondeur est généralement suivie d'une recondensation un peu plus haut, et il en résulte des absorptions, ou dégagements de chaleur, qui doivent finalement se compenser, lorsque l'eau remonte à l'état liquide ¹.

Au contraire, la volatilisation à la surface peut se produire pour des eaux surchauffées sous pression et qui, ramenées au jour à la pression atmosphérique, se vaporisent. Elle a pour conséquence de réduire, en définitive, à 100° la température superficielle de sources thermales, qui, prise plus profondément dans le griffon, pourrait être plus élevée.

3° Réactions chimiques. — Les sources thermales, dans leur remontée au jour, produisent un certain nombre de réactions chimiques, qui sont, avant tout, des dissolutions de minéraux et, par suite, doivent se traduire, en définitive, par une légère absorption de chaleur. Mais, d'autre part, les incrustations de la fracture filonienne, c'est-à-dire les dépôts de sels, surtout au voisinage de la surface, peuvent en dégager.

Notons encore les oxydations de pyrite, qui dégagent de la chaleur², les apports salins des fumerolles volcaniques, qui peuvent amener des doubles réactions, etc.

D'une façon générale, nous croyons que cet ordre de phénomènes n'a qu'une influence négligeable.

4° Influence des infiltrations froides. — Nous n'avons évidemment à considérer que les infiltrations qui peuvent se produire dans la colonne ascensionnelle ; car une eau froide, rejoignant le circuit hydrothermal avant le point le plus bas, participerait aux conditions générales d'échauffement des eaux, qui produisent la source. Au contraire, dans la remontée, toute rencontre d'eau froide ajoutée à la quantité d'eau Q , portée à la température t , des venues q' , q , q'' , etc., qui n'ont que les températures t' , t'' , t''' correspondant au point le

Berzelius comparait certaines eaux thermales très pures, comme l'eau de Gastein, à de l'eau distillée (Constantin James).

VOIR BEAUGEY. *Mém. sur Cautelets* (Ann. d. M., 1888, p. 23, en note) : cas des sources de Labassère de Gazost (Hautes-Pyrénées).

plus bas de leur propre circuit, et il en résulte un refroidissement évident de toute la masse.

Si l'on se reporte à la figure 19, on peut prévoir que le filon d'eau B M drainera, non seulement les eaux A M, mais une série de filets d'eau plus froids CN, en sorte que la température, finalement constatée, est, à coup sur, très notablement inférieure (et cela dans des proportions impossibles à calculer) à celle qui correspondrait à la profondeur réelle du point M. La profondeur atteinte par un circuit hydrothermal doit toujours être plus grande que celle résultant du calcul élémentaire donné plus haut.

C'est surtout vers la surface, et notamment au-dessus du niveau hydrostatique, que ces infiltrations froides prennent une intensité toute spéciale, les travaux mêmes que l'on fait pour augmenter le débit de la source thermique, tranchées, galeries, adaptation de pompes, etc..., ayant pour effet de les attirer en même temps : et l'un des buts essentiels d'un captage soigné doit être d'aller chercher le filon thermal assez profondément pour le mettre à couvert de cette influence fâcheuse.

La plupart des différences qu'on observe entre les sources d'un même groupe et provenant d'une même fracture ascensionnelle ne doivent pas avoir d'autre cause.

5° Action de l'air. — L'action refroidissante de l'air ne s'exerce, en raison du peu de conductibilité de l'eau, que sur une faible épaisseur de la nappe hydrothermale : néanmoins, ne fût-ce que pour prendre des mesures de température correctes, il est bon de ne pas oublier cette influence, qui est sensible dans la partie abordable du griffon.

§ 3. — *Température des principales sources thermales.*

On admet, généralement, que la température moyenne des sources ordinaires, à réservoir peu profond, est voisine de la température moyenne du lieu, ou lui est légèrement supérieure. Cette équivalence présente, dans les terrains calcaires fissurés, où la circulation ne se fait pas par nappes, mais par ruisseaux souterrains, de nombreuses exceptions, sur lesquelles l'attention a été appelée par M. Martel. Elle peut, néanmoins, nous servir de base approximative pour distinguer, dans une région donnée, une source thermique d'une source ordinaire ; car ce n'est pas la température absolue,

mais la température relative, qu'il faut considérer à ce propos. Une source, située à 900 mètres d'altitude, sera, par exemple, une source thermale, sous nos latitudes, si elle atteint 8° tandis qu'une source à 26° serait une source ordinaire, au niveau de la mer, sur l'Équateur.

On a, en moyenne, une diminution de température de 1° quand l'altitude s'élève de 150 à 300 mètres, suivant le pays. Ainsi, dans le bassin du Rhin, les sources présentent comme température : à 200 m., 10°,7; à 250 m., 16°,3; à 300 m., 9°,5; à 600 m., 7°,5; à 900 m., 6°.

Voici un tableau des principales eaux thermales françaises par ordre de température décroissante. En vertu des remarques précédentes, il est logique de prendre, pour apprécier la température du filon hydrothermal dans chaque station, la source la plus chaude :

Chaudes-Aigues (Cantal).	81°,5
Ax (Ariège).	77°
Plombières (Vosges)	71°
Bourbonne (Haute-Marne).	68°
Bagnères-de-Luchon (Haute-Garonne)	66°
Amélie-les-Bains (Pyrénées-Orientales)	61°
Dax (Landes).	61°
Cauterets (Hautes Pyrénées)	60°
Bourbon-Lancy (Saône-et-Loire)	56°
Luxeuil (Haute-Saône).	56°
Evaux (Creuse).	56°
Bourbon-l'Archambault (Allier)	55°
Néris (Allier).	52°,8
La Bourboule (Puy-de-Dôme)	52°
Bagnères-de-Bigorre (Hautes-Pyrénées)	51°
Balaruc (Hérault).	47°,5
Mont-Dore (Puy-de-Dôme).	45°,5
Aix-les-Bains (Savoie).	45°
Barèges (Hautes-Pyrénées).	44°,2
Vichy (Allier) ¹	43°,6
Saint-Gervais (Haute-Savoie).	42°
Ussat (Ariège)	40°,2
Châteauneuf (Puy-de-Dôme).	37°
Eaux-Chaudes (Basses-Pyrénées).	36°,4
Royat (Puy-de-Dôme)	35°,5
Châtelguyon (Puy-de-Dôme).	35°
Lamalou (Hérault)	35°
Eaux-Bonnes (Basses-Pyrénées).	32°
Saint-Honoré (Nièvre).	31°
Uriage (Isère)	27°

¹ Un sondage récent, près de Vichy, a trouvé, en profondeur, de l'eau à 61°.

Un semblable tableau, étendu aux autres contrées, nous entraînerait trop loin et ne présenterait qu'une sorte d'intérêt statistique¹. Voici des exemples de sources très connues, particulièrement chaudes :

Grand geyser d'Islande, en profondeur	127°
Soffioni de Toscane et Etuves de Lipari ; Thousand Springs Valley (Nevada) ; ile d'Unimak (Alaska) ; Dipso à Négrepont, etc.	100°
Hammam Meskoutine (Constantine).	95°
Albano (Italie).	84°,5
Brousse (Anatolie).	84°
Karlsbad (Bohême)	74°
Gastein (Tyrol) .	71°,5
Bade (duché de Bade)	67°

Un fait curieux à signaler, c'est l'existence des sources très chaudes à de hautes altitudes : 84° à 4700 m. au Thibet (84° étant la température d'ébullition à cette altitude) ; 52° à 4877 m., au sud de Tanla, etc.

§ 4. — *Quantité de chaleur apportée à la surface par les sources thermales.*

Les sources thermales empruntent constamment, aux profondeurs terrestres, des quantités de chaleur notables, qu'elles apportent à la surface et perdent dans l'atmosphère. Il nous a paru intéressant de calculer approximativement ces quantités de chaleur, sur lesquelles on ne se fait, en général, aucune idée nette et de voir combien il faudrait brûler de tonnes de houille pour obtenir un résultat comparable.

A *Bourbon-l'Archambault* (Allier), le débit, à 0,70 m. de l'orifice, est de 3 133 cm³ par seconde à 53°, c'est-à-dire que la source produit 166 050 calories par seconde : ce qui équivaut à 70 322 kgm., c'est-à-dire la chaleur produite par environ 0,027 kg. de houille, en prenant 6 000 pour la puissance calorifique de la houille². En un an, cela représente 873 tonnes de houille.

Voir, à ce sujet, tout un chapitre dans DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, t. I, p. 434 à 446.

Nous prenons pour l'équivalent mécanique de la chaleur E, correspondant à une grande calorie (1000 calories) : 423,5 kilogrammètres, suivant la détermination de Joule et nous admettons, comme chiffre moyen, que la combustion d'un kilogramme de houille dégage 6 000 grandes calories.

Les sources de *Néris* en donneraient 3 167 tonnes, et celles de *Vichy* 652 : en tout, pour l'Allier, 4 692 tonnes de houille.

A *Cauterets*, les sources du groupe de César produisent 470 m³ à 43° par 24 heures : ce qui correspond à 3,43 tonnes de houille par jour et 1 254 tonnes par an.

Chaque source pourrait être ainsi représentée par un nombre thermique caractéristique, produit de sa température par son débit, et nombre d'entre elles nous donneraient des chiffres considérables. Nous donnons, d'ailleurs, plus loin (p. 168 et 169), un tableau par départements, correspondant aux diverses sources françaises, dont la température dépasse 20°. On voit qu'il faudrait brûler une quantité importante de charbon pour réaliser artificiellement la température de nos principales stations thermales.

Le total de 1 168 455 grandes calories par minute correspond, en effet, à plus de 100 000 tonnes de houille par an, soit à peu près le trentième de l'extraction du bassin de la Loire, le trois centième de l'extraction totale de la France.

C'est là un résultat qui nous paraît intéressant à deux titres :

D'une part, si l'on étend la conclusion à l'ensemble du globe, il en résulte évidemment une cause de déperdition continue de la chaleur interne, qui n'est point négligeable.

D'autre part, on voit que les sources thermales représenteraient, par leur seul calorique et indépendamment de tout rôle thérapeutique, une certaine richesse, qui, en fait, est presque complètement perdue aujourd'hui.

Peut-être, un jour, quand la houille commencera à manquer, trouvera-t-on quelques moyens d'utiliser cette source de chaleur, pratiquement inépuisable, que renferment les couches profondes de l'écorce terrestre, non seulement (ce qui semblerait, dès à présent, bien indiqué) en employant les eaux thermales pendant la saison d'hiver, où les stations thermales ne fonctionnent pas, aux usages domestiques des habitants du pays, mais surtout en allant chercher artificiellement l'eau chaude de certaines régions favorables, par des puits, qui pourraient avoir, en même temps, d'autres applications.

DÉPARTEMENTS	STATIONS THERMALES	TEMPÉ- RATURE	LITRES par minute.	GRANDES CALORIES (de 1000 calories) par minute.	
Allier	Lucas . . .	30	14,4	423	
	Vichy .	Grande-Grille .	44	28,5	1 254
		Puits Carré .	45	80,5	3 624
		L'Hôpital .	34	34	1 156
		Hauterive .	23	28	644
		Vesse .	28	14	392
				7 493	
Basses-Alpes	Néris .	52	700	36 400	
	Bourbon-l'Archambault .	53	188	9 964	
	Digne .	40	150	6 000	
Hautes-Alpes	Gréoulx .	35	1 200	42 000	
	Risoul .	29	170	4 930	
Alpes-Maritimes .	Monestier de Briançon .	36	150	5 400	
	Roquebillière .	29	88	2 532	
Ardèche .	St-Martin de Lantosque .	24	80	1 920	
	Meyras .	20	328	6 560	
	Colles (puits artésien) .	25	69	1 725	
	Saint-Laurent-les-Bains .	53	225	11 925	
Ariège		73,5	105	7 717	
	Ax .	Le Teich .	65,8	48	3 158
			69	120	8 280
	Modèle .		70	170	11 900
			68	26	1 768
		Le Couloubret .	77,5	40	3 100
	Ussat .	30	570	17 100	
Bouches-du-Rhône .	Rennes-les-Bains .	40	1 350	54 000	
	Alét .	26	400	10 400	
Cantal	Le Roucas Blanc .	21	3 000	63 000	
	Chaudesaigues .	81	260	21 060	
Corse .	Guagno .	56	56	3 136	
	Baracci .	45	50	2 250	
Creuse	Pietrapola .	58	45	2 610	
	Evaux .	47	133	6 251	
Haute-Garonne		52	46	2 392	
	Bagnères-de-Luchon .		50	30	1 500
			41	60	2 460
			56	45	2 520
			32	300	9 600
Hérault .	Avène .	27	330	9 450	
	Balaruc .	48	215	10 320	
Isère	Uriage .	26	288	7 488	
	La Motte-les-Bains .	60	260	15 600	
Landes .	Dax .	59	400	23 600	
	Tercis .	37	68	2 516	
	Préchaq .	51,7	50	2 585	
Loire .	Sail-les-Bains .	30	800	24 000	
Lozère	Montrond .	27,5	260	7 150	
	Bagnols .	41	150	6 150	
Haute-Marne		60	240	12 600	
	Bourbonne .		56	17	932
			42	43	1 806
			44	17	748
Nièvre	Saint-Honoré .	29	120	3 480	
Nord	Saint-Amand .	23	300	6 900	
	Meurchin .	42	1 100	46 200	
Pas-de-Calais	La Bourboule .	54	350	29 700	
	Royat .	30	300	9 000	
	Mont-Dore (moyenne) .	44	320	14 080	
Puy-de-Dôme	Châteauneuf .	35	500	17 500	
<i>A reporter.</i>			16 633	622 896	

DÉPARTEMENTS	STATIONS THERMALES	TEMPÉ- RATURE	LITRES par minute.	GRANDES CALORIES par minute.	
	<i>Report</i>		16 633	622 896	
Puy-de-Dôme .	Rouzat	30	208	6 240	
	Saint-Nectaire	41	50	2 050	
	Chamalières	30	60	1 800	
Basses-Pyrénées.	Châtelguyon	34	500	17 000	
	Eaux-Bonnes	28	30	840	
	Eaux-Chaudes (moyenne)	34	100	3 400	
	Cauterets (moyenne)	45	900	40 500	
Hautes-Pyrénées.		50	133	6 650	
		48	120	5 760	
		44	486	21 384	
	Bagnères-de-Bigorre.	46	259	11 915	
		33,5	100	3 350	
		32,8	125	4 100	
		46	97	4 271	
		50	33,5	1 665	
		Capvern	23	1 600	3 680
		Barèges (moyenne).	35	100	3 500
Pyrénées-Orient.	Saint-Sauveur	34	120	4 080	
	Amélie-les-Bains (moy.)	58	800	46 400	
	Molitg (moyenne).	37	200	7 400	
	Dorres	42	800	33 600	
	Olette (moyenne).	60	800	48 000	
Haute-Saône	Luxeuil (moyenne)	35	350	12 250	
Saône-et-Loire	Bourbon-Lancy (moy.)	80	200	10 000	
Savoie	Aix	45	2 100	94 500	
	Salins	36	2 431	87 516	
	Brides	35	208	7 280	
Haute-Savoie	L'Echaillon.	32	354	11 328	
	Bonneval.	38	700	26 600	
	Saint-Gervais.	40	120	4 800	
Vosges		68	25	1 700	
	Plombières (moyenne)	30	250	7 500	
	Bains.	45	100	4 500	
			31 092	1 168 455	

CHAPITRE III

DÉBIT DES SOURCES THERMO-MINÉRALES

§ 1. — *Mesure du débit* ¹.

Le débit d'une source thermale est (comme celui d'un cours d'eau) l'expression du volume d'eau fourni par elle, pendant un temps déterminé, généralement par seconde ou par vingt-quatre heures : la seconde expression s'obtenant en multipliant la première par 86 400.

Ce débit variant, ainsi que nous le verrons, dans une très forte proportion, suivant le niveau auquel on fait les observations, il importe essentiellement, pour que celles-ci soient comparables, de noter ce niveau avec exactitude. Il est également nécessaire d'inscrire la pression barométrique, qui peut avoir une certaine influence.

Ainsi que nous le faisons remarquer précédemment pour la température, il est logique, avant de discuter les problèmes relatifs aux débits des sources, d'indiquer d'abord par quels moyens on arrive à la connaissance de ce débit.

Ces mesures de débit, auxquelles on procède maintenant dans toutes les stations thermales, ne sont pas sans présenter souvent certaines difficultés pratiques et théoriques, tenant : soit à l'impossibilité fréquente de recueillir, à l'émergence même, toute l'eau produite (surtout quand on est gêné par des installations de captage

Voir 1861. JUIER. *Jaugeage des sources minérales* (Ann. d. Mines, 5^e série, t. XIX, p. 473).

Les anciennes mesures sont souvent évaluées en *muids*, qu'on peut estimer à 0^m3,26822. D'après Devaraigne, 725 muids correspondent à 10 pouces 10 lignes suivant l'expression des fontainiers, c'est-à-dire que le muid correspond à 2 lignes, à raison de 144 lignes par pouce. D'autre part, d'après le *Traité d'hydraulique* de d'Aubuisson (1^{re} éd., p. 194), le pouce d'eau des fontainiers, c'est-à-dire le volume d'eau qui, en 24 heures, sort d'un orifice ayant un pouce de diamètre et percé sur la paroi mince d'un bassin, contre laquelle le fluide se tient à une ligne au-dessus du sommet de cet orifice, correspond à 19^m3,190 par 24 heures (DROCOT. *Mém. sur Bourbonne*, 1863, p. 98).

et de tuyauterie); soit à la difficulté d'avoir l'eau thermale exempte d'infiltrations superficielles en proportions inconnues; soit encore aux modifications imprévues que peuvent amener, pour ce débit, les circonstances diverses dans lesquelles on opère, etc.

Il est rare, en effet, qu'on se trouve en présence d'une source, débordant spontanément d'une vasque naturelle ou artificielle, à un niveau constant et qu'on puisse prendre des mesures sur le griffon même. Souvent l'eau est puisée par des pompes à un niveau variable suivant les nécessités du service balnéaire. Et, quand ce niveau s'abaisse, le débit augmente, dans bien des cas, non seulement par la raison théorique que nous donnerons bientôt, mais aussi parce que l'on opère un drainage sur les eaux froides des terrains voisins.

Cette difficulté devient tout à fait grave quand la source, pour une raison ou pour une autre (modification du captage, perturbation au voisinage, etc...), n'a pas encore pris un régime permanent¹ et il faut alors recourir à des artifices (notamment à des séries de mesures, représentées graphiquement), dont nous donnerons plus loin des exemples.

Si nous nous plaçons, d'abord, dans le cas simple d'une eau en régime permanent, qu'on a amenée à s'écouler à la surface par un canal unique², l'écoulement de ce canal peut se jauger par deux moyens, dont le premier consiste à la recueillir, pendant un temps déterminé, dans des vases gradués³ et le second à appliquer la formule des déversoirs.

Quand on veut appliquer la formule des déversoirs, on fait passer l'eau qui s'écoule, sur un déversoir en tôle de 0,10 m. de large,

Lorsqu'on fait des mesures de débit à des niveaux variables, il faudrait, pour avoir réellement le débit de régime à un niveau déterminé, attendre un temps suffisamment long pour que l'équilibre se fût absolument rétabli : ce qui, comme nous le verrons bientôt, peut demander parfois jusqu'à des années. Dans le cas contraire, le régime provisoire dépend du temps pendant lequel la source a été maintenue à un niveau inférieur à celui où l'on opère et les mesures de débit, que l'on peut faire à divers moments à un niveau supérieur, tandis que le régime permanent se reconstitue, accusent des variations, dont la loi même est essentiellement changeante avec les diverses conditions du problème.

¹ On trouvera, dans le mémoire de M. Drouot sur Bourbonne (*Ann. d. M.*, 1863, p. 113 à 123), le détail des jaugeages faits sur cette source en 1860.

A Bourbonne, dans les installations faites en 1875 par M. Rigaud, on a placé, pour faciliter les jaugeages, des robinets-vannes fixés sur les tuyaux qui conduisent des sondages à la chambre centrale de distribution. Au moyen de ces robinets, on peut faire écouler toute l'eau de chaque sondage isolé par un orifice unique, au-dessous duquel il suffit de placer un seau pour mesurer aisément le débit. (Voir, plus loin, le chapitre relatif aux installations extérieures du captage.)

adapté à son canal de fuite et l'on attend que le mouvement soit devenu permanent, c'est-à-dire que la hauteur de la lame d'eau sur le déversoir soit bien constante.

On peut alors employer la formule :

$$Q = 0,385 LH \sqrt{2gH},$$

dans laquelle Q est le débit en mètres cubes par seconde, L la largeur du déversoir, H la hauteur en mètres de la lame d'eau et $g = 9,81$.

Considérons maintenant le cas plus difficile et très fréquent, où la source, captée au fond d'un puits, est épuisée au moyen de

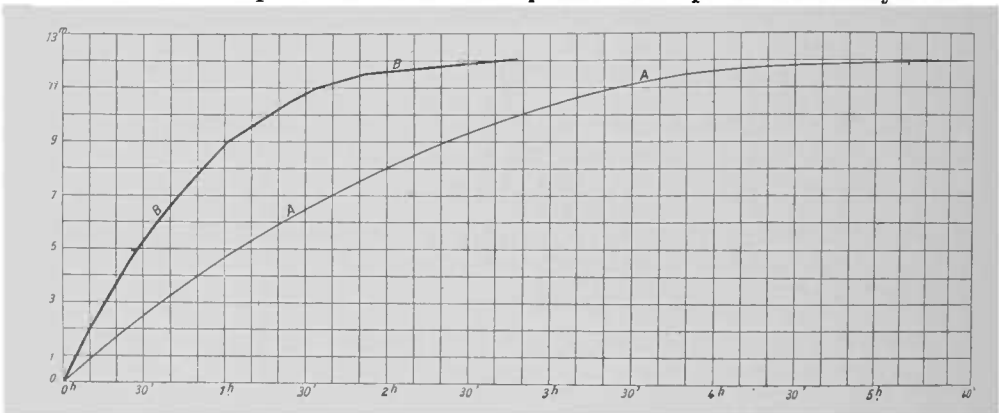


Fig. 21. — Graphique représentant les variations du débit avec la profondeur à la source de Lavey (mars et avril 1882), d'après M. Forel.

Les ordonnées représentent la hauteur d'eau dans les puits (au-dessus du niveau d'épuisement).

Les abscisses : $\left\{ \begin{array}{l} \text{Courbe A. — Le débit total de la source principale sans les eaux latérales (expérience du 30 mars 1882).} \\ \text{Courbe B. — Le débit total de la source principale et des eaux latérales (3 avril 1882).} \end{array} \right.$

pompes et où l'on veut déterminer la loi de son débit sous des charges d'eau croissantes.

On a pu quelquefois, dans ce cas, obtenir la loi cherchée en observant le temps que l'eau mettait à remonter dans le puits, tout d'abord mis à sec.

C'est ce que M. Forel a fait, en 1882, à la source de Lavey, en notant l'heure exacte où la nappe d'eau arrivait à des hauteurs équidistantes de 25 en 25 cm.

Les courbes ci-jointes (fig. 21) permettent d'apprécier, pour une hauteur d'eau quelconque, le temps que met la source à débiter une quantité d'eau déterminée, c'est-à-dire qu'elles donnent une expression de ce débit, et, en même temps, elles mettent bien

en évidence sa loi générale de décroissance à mesure que le niveau s'élève.

Les sources latérales, dont il est question dans l'expérience du 3 avril 1882, courbe B, avaient été d'abord captées en 1856, à côté de la principale fissure thermique ; puis, comme leur température s'abaissait, on avait fermé leur orifice dans le puits par un fort tampon en bois dur, que l'on pouvait ouvrir à volonté. La comparaison des deux courbes A et B montre comment le débit s'accroît lorsqu'on fait écouler la source latérale par ce tampon ; mais le niveau final est le même, c'est-à-dire que ces eaux ont, comme on pouvait le prévoir, la même pression hydrostatique et la même origine.

Le tracé de courbes semblables peut, dans bien des occasions, être utile pour étudier certaines anomalies apparentes du débit d'une source thermique.

Dans le même ordre d'idées, on peut, lorsqu'il s'agit d'un puits de captage nouveau, se proposer de prévoir, au moyen d'elles (ce qui, dans bien des cas, présente une réelle importance pratique), quel devra être, dans la suite, le débit normal et permanent.

Pour résoudre un tel problème, il ne suffit pas, en effet, comme on pourrait le croire tout d'abord, d'apprécier, par un moyen quelconque (notamment par une mesure directe sur notre courbe), la quantité d'eau que débite le puits au niveau d'émergence choisi ; car il faut souvent des semaines ou même des années d'attente avant que l'équilibre soit établi : semaines ou années, pendant lesquelles le puits peut, d'une part, ne pas recueillir tous les filets thermaux et, d'autre part, recevoir, en même temps, une proportion variable d'infiltrations froides. On est alors conduit à employer des artifices, qui consistent essentiellement dans la comparaison d'une série de courbes analogues à celles de la figure 21, obtenues pour la même source en faisant varier rationnellement les conditions de l'expérience.

M. Heim, qui a publié sur cette question un mémoire fort intéressant¹ a distingué deux cas :

1° Celui où l'eau afflue au puits de captage par un terrain perméable sans fissures définies, comme cela se passe surtout pour les eaux douces et aussi pour certaines nappes d'imprégnation hydrothermales ;

¹ *Quellerträge in Schächten und deren Bestimmung (Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft zu Zürich, 1897, p. 112 à 128).*

2° Celui, au contraire, où le système des fissures aquifères dans des roches compactes est bien défini, comme cela se produit pour les sources thermales filoniennes. Les résultats constatés, dans les deux cas et les interprétations qu'on en peut donner, sont très différents :

1° Un puits nouveau, que l'on fonce dans un terrain perméable, commence par attirer successivement toutes les eaux des terrains avoisinants : d'où débit croissant, jusqu'au moment où, en s'enfonçant, on atteint à une nappe imperméable. Le puits une fois terminé et constamment épuisé par des pompes, l'imprégnation ancienne de ces terrains s'épuise peu à peu, tantôt après quelques jours, tantôt (si le terrain est très compact) au bout d'années¹ ; le débit baisse alors et tombe à un minimum, ou il se maintient (sauf les variations météorologiques), le puits n'étant plus alimenté que par les infiltrations de la zone d'alimentation dans le temps correspondant, jusqu'à ce qu'il se crée, par un effet de drainage, un appel sur une zone plus étendue : d'où un certain accroissement (par rapport au minimum), qui peut atteindre 10 à 20 p. 100.

Si, quand une source est en service depuis plusieurs années, on recommence l'opération, on observe que l'assèchement des terrains se fait beaucoup plus vite, sans doute parce qu'il s'est créé, par l'écoulement même de l'eau, un système de chenaux souterrains plus faciles et mieux ouverts.

Quelques courbes, tracées à la suite d'observations prolongées sur des sources de ce genre, permettront donc de prévoir assez aisément quelle pourra être l'allure de la courbe pour une source nouvelle.

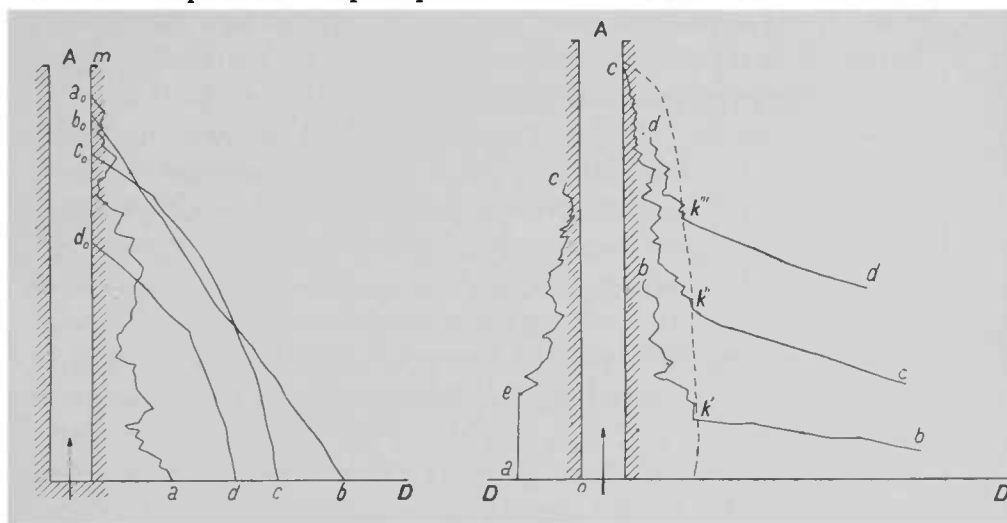
2° Le second cas, où l'eau arrive au puits par des fissures bien définies, est spécialement intéressant pour nous. Nous n'avons pas à examiner ici ce que nous dirons plus loin et ce que nous avons déjà annoncé à diverses reprises, au sujet des variations permanentes du débit avec la profondeur de captage (en raison du simple changement produit dans la pression hydrostatique) et nous voulons seulement chercher un moyen de prévoir quel sera le débit permanent, pour un niveau de pompage déterminé, dans un puits de captage nouveau.

On peut commencer par épuiser le puits jusqu'au fond et arrêter

M. Heim cite le cas du tunnel de Dettenberg, et celui des tranchées du chemin de fer badois près des sources de Laufenburg, où il a fallu trente ans pour rétablir un régime permanent.

les pompes en laissant remonter l'eau. Si l'on observe, comme dans l'expérience de Lavey précédemment citée, le temps que met l'eau à atteindre les divisions successives d'une échelle métrique placée dans le puits et si l'on reporte en abscisses les débits résultants, les divisions correspondantes de l'échelle étant en ordonnées, on obtient des courbes telles que celles de la figure 22.

Une courbe zigzagante a_0 indique évidemment l'existence, dans les terrains entourant le puits, de vides irréguliers, qui mettent un certain temps à se remplir quand on laisse le niveau remonter; si



A—Puits de captage.

D—Débits en litres par minute

a_0, b_0, c_0, d_0 —Niveaux hydrostatiques des diverses sources.

Fig. 22 et 23. — Graphiques représentant diverses lois de variation du débit d'une source (abscisses) avec le niveau de l'eau (ordonnées), d'après M. Heim.

le puits traverse des terrains imperméables et d'autres perméables et fissurés, la courbe, régulière dans les premiers, est sinueuse dans les seconds : c'est un cas qui ne se présente guère pour les sources chaudes, à larges fissures bien définies.

Une ligne régulière bb_0 (source de Schinznach, en Argovie) représente un phénomène plus normal¹.

Il s'agissait là d'un puits, où arrivait autrefois un mélange de veines chaudes et de veines froides. M. Heim, en 1802, commença par capter également toutes les veines par des tuyaux, qu'on laissa débiter quelque temps; puis on boucha l'orifice des veines froides

¹ Voir plus loin, sur cette source, p. 337.

et l'on obtint la source permanente, dont bb_0 donne la loi de débit.

Le cas de la courbe cc_0 , assez régulière, est celui de Lavey précédemment étudié¹. Des courbes de ce genre ont parfois une brisure, comme dd_0 : ce qui dénote une irrégularité dans les veines aquifères.

Si l'on a affaire à une courbe irrégulière comme a_0 , il faut, pour résoudre le problème, que nous nous sommes posé, des précautions spéciales. De semblables sources (dont Pougues est un exemple en France) peuvent être extrêmement longues à prendre leur régime.

M. Heim a proposé alors d'employer une pompe énergique à abaisser très rapidement, et comme par surprise, le niveau de l'eau ; puis de laisser remonter, comme précédemment : ce qui donne une courbe bb (fig. 23), ayant une première partie bk' régulière, pendant laquelle le débit s'accroît, de moins en moins vite, par le simple fait du drainage des terrains avoisinants, qui n'avaient pas eu le temps de s'assécher pendant cet épuisement rapide. Après quoi, une fois arrivé à la zone asséchée, il faut, au contraire, que l'eau thermale, venant du fond, remplisse les vides de ces terrains : d'où une courbe irrégulière pareille à a_0 sur la figure 22. L'abscisse, au point de brisure k' , paraît donner, pour le niveau correspondant, le débit permanent.

En variant les conditions (par des expériences qu'on doit, bien entendu, espacer le plus possible), on obtient divers points analogues $k''k'''$ qui permettent en définitive de tracer la courbe $k'k''k'''$ de débit normal et permanent aux divers niveaux.

Ici, comme dans le premier cas considéré, on remarque, d'ailleurs, que, si on recommence des expériences semblables au bout de plusieurs années, les phases de l'opération deviennent de plus en plus rapides, les régimes s'étant établis d'une manière permanente et les fissures, qui conduisent à la source, s'étant élargies, tandis que les autres s'obstruaient. Tout se passe, comme si les eaux prenaient l'*habitude* d'aller dans un certain sens.

Comme conséquence pratique, M. Heim a fait remarquer l'inconvénient qu'il y a, dans les stations thermales, à laisser, pendant tout l'hiver, la source à un niveau différent de celui de l'été : ce qui, pour continuer la comparaison précédente, lui fait prendre des habitudes mauvaises. Il est souvent alors nécessaire, pour les sources un peu fugitives et difficiles à bien capter, de continuer

¹ Page 172 et figure 21.

en hiver un épuisement à un niveau réglé par l'expérimentation.

En second lieu, pour les sources situées dans des terrains inhomogènes et sujettes à se troubler, on doit avoir un pompage extrêmement régulier, sous une pression hydrostatique bien constante.

§ 2. — *Loi mathématique du débit d'une source thermale. Variations de ce débit avec le niveau de captage. Possibilité d'augmenter le débit en abaissant le plan d'eau. Inconvénients. Mélange d'eaux froides avec l'eau thermale.*

Si l'on surmonte le griffon d'une source thermale d'un tuyau vertical, dans lequel l'eau est forcée de s'élever, on la voit s'arrêter à un certain niveau, qui est son *niveau statique* et, si on ne lui donne pas d'issue au-dessous de ce niveau, son débit est nul.

C'est ce qui se réalise parfois naturellement, comme nous l'avons vu¹ pour certaines eaux incrustantes ou geysériennes, sur l'émergence desquelles se construisent, peu à peu, des cheminées de travertin ou de silice, dans lesquelles, à partir d'une certaine hauteur, l'eau reste stagnante et sans écoulement.

Ce niveau statique, qui est le niveau naturel de l'eau, dépend de sa force ascensionnelle, produite elle-même par la pression hydrostatique, la force expansive des gaz, etc., et varie avec diverses circonstances, notamment avec la pression barométrique.

Il n'est pas nécessairement au-dessus du sol, lorsqu'il s'agit d'une source obtenue artificiellement par un sondage, allant recouper une nappe artésienne profonde, comme dans le cas des nappes hydrothermales de Vichy et Vals, des nappes pétrolifères de Pensylvanie, etc., et, quand il se trouve ainsi dominé par les terrains voisins, le niveau statique est influencé, dans une certaine mesure, par l'afflux des eaux douces, à pression hydrostatique supérieure, qui ne peut manquer de se produire vers le tube de forage.

Lorsque le niveau statique est, ainsi que nous l'avons supposé d'abord, au-dessus du sol et qu'on l'a mis en évidence par ce tuyau vertical formant tube piézométrique, si l'on provoque l'écoulement, hors de ce tube, par des orifices percés à des hauteurs variables, on constate, très nettement, que le débit s'accroît à mesure que l'on s'abaisse et le même phénomène se reproduit également (avec

Voir p. 78.

quelques complications dont nous reparlerons), quand on continue, par exemple au moyen de pompes, à déprimer le « plan d'eau », le plan d'émergence (c'est-à-dire le plan où la force ascensionnelle de l'eau doit simplement équilibrer la pression atmosphérique), de plus en plus profondément au-dessous du sol.

Il y a là un fait bien connu, que l'on explique généralement, en deux mots, en disant que, lorsqu'on s'abaisse, on réduit la charge.

Ce phénomène est, on le conçoit aussitôt, d'une extrême importance pratique, puisqu'il donne un moyen immédiat d'augmenter, presque à volonté, le débit d'une source, qui ne suffisait pas aux besoins médicaux; on a cependant été longtemps sans le reconnaître et nombre de divergences dans les mesures à diverses époques, tenant uniquement à cette cause, ont été attribuées jadis à des variations dans le régime naturel des eaux. Il est facile de montrer mathématiquement la raison qui modifie le débit avec le niveau d'épuisement et, par suite, de calculer la loi qui relie l'un des éléments à l'autre.

Le débit Q d'une source quelconque, de section ω et de vitesse d'écoulement v , s'écrit, en effet, par définition même :

$$Q = \omega v \quad (1)$$

Pour accroître Q , il faut donc agir, soit sur ω , en augmentant et élargissant les orifices d'écoulement, comme nous le verrons quand il s'agira du captage, soit sur v , comme nous allons l'expliquer ici.

La vitesse v est reliée aux autres éléments, qui définissent la source : la pression élémentaire P dans la section considérée, le poids spécifique π , la hauteur au-dessus d'un plan de comparaison z , le périmètre de l'orifice χ , la longueur suivant le circuit s , par la formule de Bernoulli, rappelée plus haut¹ :

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\pi} + z + \int_0^s \frac{\chi \varphi(v)}{\omega} ds = \text{const.} \quad (2)$$

Page 39. Si nous étions dans le cas de l'hydrostatique, on aurait, par le principe de Pascal : $\frac{P}{\pi} + z = \text{const.}$, pour une section quelconque du liquide. Du moment que nous passons à l'hydrodynamique, il faut faire intervenir la force vive et les frottements, de sorte que $\frac{P}{\pi} + z$ ne peut pas être constant. Remarquons, d'ailleurs, que, si on supprime toute la partie remontante du tube, c'est-à-dire si l'on n'a plus que de l'eau tombant en chute libre par un tuyau assimilable à un tube vertical, la formule doit exprimer, en faisant $P = 0$ et $z = 0$, que la vitesse en bas du tube est, aux frottements près, équivalente à $\sqrt{2gh}$ (h étant la hauteur de chute) : ce qui permet de déterminer la constante.

ou, approximativement, en supposant une section circulaire de rayon R , et, par suite, une vitesse constante dans toute la longueur du tuyau :

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\pi} + z + 0,00125 \frac{sv^2}{R} = \text{const.} \quad (3)$$

$0,00125 \frac{sv^2}{R}$ représentant le frottement, $\frac{P}{\pi} + z$ la charge.

Traduite en langage courant, cette formule signifie que la vitesse, donc le débit, croissent quand la charge et les frottements diminuent.

Elle montre, en effet immédiatement que, si on abaisse le plan d'émergence, on diminue, pour ce plan, z et s , en laissant $\frac{P}{\pi}$ également nul par définition¹ c'est-à-dire que l'on réduit : d'une part, le travail de la pesanteur z , puisque l'eau remonte à un niveau moindre et, de l'autre, les frottements, puisque l'on supprime une portion de la conduite. La formule fait voir, dès lors, que la vitesse v , par conséquent le débit ωv , augmentent.

Elle montre également entre quelles limites peut varier théoriquement le débit. Si le niveau d'émergence est le niveau piézométrique ($z = h$), v est nul et le débit aussi. Si, au contraire, l'écoulement se faisait au point le plus bas du trajet ($z = 0$), Q , d'après une remarque précédente, serait égal, aux frottements près, à $\omega \sqrt{2gh}$.

Nous venons de supposer là, qu'après avoir, par un moyen quelconque, déprimé le plan d'émergence, on laissait l'écoulement se faire librement, à ce niveau inférieur, sous une pression nulle.

En appliquant des pompes sur l'orifice, on pourra même, au lieu de cette pression nulle, créer une dépression : ce qui aura pour résultat d'accroître encore le débit.

Introduisons maintenant, pour préciser, quelques données numériques dans notre formule et supposons d'abord :

$$z = 1500 \text{ m.}; \quad s = 4000 \text{ m.}; \quad R = 0^m,4; \quad \omega = 0^m,03; \quad Q = 0^m,003$$

$$v = 0^m,1 \text{ par seconde.}$$

on en tire la valeur de la constante dans ce cas, 1500,00553.

Je fais maintenant $z = 1495$, c'est-à-dire que j'abaisse l'émergence de 5 mètres ; d'où $s = 3995$; j'ai :

$$v = 3,15 \text{ m.} \quad Q = 0^m,0945$$

¹ Il n'y a pas à tenir compte de la pression atmosphérique, qui s'équilibre aux deux bouts du tube. Dès lors, en considérant l'écoulement par un déversoir à un niveau quelconque, la pression sur la tranche supérieure du liquide est nécessairement nulle.

c'est-à-dire que, dans l'hypothèse précédente, en abaissant le plan d'eau de 5 mètres, on multiplierait théoriquement le débit par trente¹.

Les conditions, que nous avons supposées là, sont à peu près celles de la source de *Bourbon-l'Archambault* (Allier)², où l'eau ressort à 53°, après être descendue, par suite, à au moins 1500 m. : (ce qui suppose au moins 4000 m. de trajet souterrain) et où la fissure est nettement définie, dans une roche assez compacte pour que les infiltrations d'eau froide soient peu à craindre.

Or, on y observe, en réalité, pratiquement, les variations de débit suivantes :

à 0 ^m ,70 de l'orifice	0 ^m ³ ,00314 par seconde
à 5 ^m ,35 —	0 ^m ³ ,01091 —

On a fait également, à *Bourbonne*, des expériences sur l'augmentation du débit en profondeur, dans des conditions où les drainages d'eaux froides superficielles paraissent avoir joué un rôle trop important pour permettre de bien vérifier la théorie³.

On a trouvé là, pour le débit par vingt-quatre heures :

SOURCES	ÉMERGENCE ORDINAIRE Mètres cubes.	ÉMERGENCE ABAISSÉE de 2 mètres. Mètres cubes.	ÉMERGENCE ABAISSÉE de 3 ^m ,88. Mètres cubes.
Puisard civil . . .	25	50	95
Sondage n° 1 . . .	21,4	38	56
— n° 10 . . .	150	160	208
— n° 11 . . .	57,6	68	88
— n° 12 . . .	96	110	132
Sources militaires.	40	30	126
Total . . .	390	455	705

Les anomalies apparentes de ce tableau tiennent à ce que ces diverses sources communiquent entre elles et, en outre, à ce que, en abaissant le niveau du puisard civil, on y attirait des eaux superficielles. La température et la salure y diminuaient, en effet, tandis qu'elles augmentaient plutôt pour les autres sources.

Enfin, à *Pougues*, source Saint-Léger, en septembre 1897, on

¹ La vitesse maxima, au point le plus bas du circuit, pourrait atteindre 225 mètres à la seconde.

² Voir page 162.

³ RIGAUD. (*Ann. d. M.*, loc. cit., p. 498.)

a observé un débit de 1 à 2 litres par minute à la margelle, 7 à 8 litres à 60 centimètres plus bas, 50 litres environ à 3^m,20 de profondeur. Dans ce dernier cas, il y avait également intervention notable des eaux froides.

En résumé, l'on voit que, dans l'hypothèse faite implicitement par nous d'un réservoir d'eau illimité se vidant par un tuyau donné, on peut, en puisant suffisamment bas par des pompes de force croissante, augmenter très notablement le débit.

Le simple bon sens indique cependant, de suite, qu'il existe des limites pratiques à un pareil accroissement, en dehors même des frais d'épuisement, qui contre-balanceraient bientôt le bénéfice résultant d'un débit plus considérable; en effet, les réservoirs souterrains sont loin d'être illimités et, de plus, quand la vitesse augmente, les frottements sur cette longue et étroite conduite souterraine croissent comme son carré, de sorte que la résistance à vaincre deviendrait bientôt énorme. Mais il n'en est pas moins vrai — et c'est le point important en pratique — qu'on peut, très souvent, tripler ou quadrupler le débit d'une source thermale, en abaissant convenablement le plan d'eau : soit par des travaux de captage, quand ils sont possibles; soit, tout au moins, par l'installation de pompes.

Dans ce que nous venons de dire, il est un élément que nous avons supposé constant et sur lequel l'abaissement artificiel du plan d'eau se trouve, en réalité, agir indirectement, c'est la section des filets liquides souterrains.

En effet, l'eau, dans sa circulation interne, est loin d'être constamment comprise dans un tuyau, dont elle ne peut s'échapper; elle rencontre, au contraire, nombre de points, surtout à son entrée et à sa sortie, où son circuit se bifurque, de telle sorte qu'une partie de l'eau peut se diriger, à son gré, dans un sens ou dans l'autre et alimenter d'autres nappes, ou d'autres sources. En diminuant la pression sur un point, on y attire aussitôt un plus grand nombre de filets liquides, qui autrement se disperseraient; et l'on augmente le débit en conséquence¹. C'est là un des buts qu'on se propose dans un captage soigné.

Si l'on se reporte à la figure 19 (p. 157), on verra aussitôt qu'il y a lieu d'établir des distinctions dans cette augmentation de débit.

¹ La loi d'accroissement du débit avec la profondeur est donc, en pratique, différente de celle que nous avons mathématiquement calculée, toutes les fois qu'on a affaire à un terrain fissuré d'une façon un peu complexe et que le niveau de captage est au-dessous du niveau hydrostatique des eaux froides.

En effet, je suppose d'abord que l'on arrive à attirer, au point le plus profond M, des filets d'eau d'origine diverse : du moment qu'ils ont passé par ce point M, ils en ont pris la température; leur minéralisation, dans le circuit de retour MB, est la même; c'est donc un accroissement absolu dans le débit de la source, sans modification de ses qualités.

De même, si l'on concentre en un seul griffon B des filets chauds, qui, à partir d'un point O voisin de la surface, divergeaient vers B', B'', etc., c'est encore tout bénéfice.

Au contraire, il est à craindre d'attirer en B des infiltrations, relativement superficielles, telles que CN, tout à fait indépendantes de la source thermale réelle et dont le drainage diminuera la température et la minéralisation de l'eau¹. C'est un effet qu'il est presque impossible d'empêcher quand on commence à installer des pompes sur une source et qui amène à ne pas accroître démesurément le débit. Cependant il est à remarquer que, lorsque ces pompes ont fonctionné quelque temps d'une façon continue, elles arrivent parfois, assez vite, à assécher ces infiltrations superficielles : dès lors, dans ce cas-là, on peut retrouver ensuite la source thermale avec ses qualités premières, bien qu'avec un débit accru.

Ces questions d'infiltrations froides sont très délicates et complexes, elles se présentent très diversement d'une source à l'autre; mais, comme leur importance pratique est extrême, nous croyons devoir y insister, dès à présent, sans attendre le moment où il en sera question de nouveau à propos du captage.

Le choix et l'établissement judicieux du plan d'eau dans une source thermale sont, en effet, le premier point à étudier pour un projet d'aménagement, et la décision prise à cet égard peut influencer considérablement sur le débit, la température et la minéralisation de la source. Quand nous traiterons, plus tard, de la méthode de captage, dite des pressions hydrostatiques réciproques, nous verrons combien l'on arrive à améliorer une source thermale en répartissant convenablement les pressions autour du griffon, de manière à amener, vers celui-ci (ce qui est, en somme, tout le problème) le maximum d'eau thermale et le minimum d'eau douce superficielle.

En général, on peut dire que, lorsqu'on élève trop le niveau de

¹ Voir plus haut, p. 172 à 176, ce que nous avons dit des mesures de débit dans les sources sujettes à infiltrations froides.

captage, on diminue le débit ; lorsqu'on l'abaisse trop, on voit décroître la température et la minéralisation. Mais ce n'est là qu'une première approximation, à laquelle nous ne pouvons pas nous en tenir.

Les principaux éléments à considérer, si l'on veut pousser l'analyse plus loin, sont, pour la source thermale, comme pour les eaux douces, dont il s'agit d'empêcher le mélange, la pression hydrostatique propre au point où elles se trouvent en contact et — ce que l'on a parfois tendance à oublier — la facilité relative d'accès vers ce point de contact, c'est-à-dire la largeur plus ou moins grande des fissures qui y conduisent.

Dans ce dernier ordre d'idées, il faut observer, avec soin, quand on le peut, la position des fentes ou des nappes perméables, qui amènent, tant l'eau douce que l'eau thermale, et se garder d'envisager trop théoriquement leur circulation, comme se faisant, également et librement, dans une zone quelconque du terrain considéré, ainsi que dans un récipient vide.

Lorsque la source thermale arrive à la surface avec une force ascensionnelle notable, le danger d'infiltrations froides est restreint ; car, généralement, ces infiltrations, venant de points tout à fait contigus au griffon, n'ont, à la profondeur quelconque, où elles rencontrent la fissure hydrothermale, qu'une pression représentée par la différence de niveau entre ce point et la surface, c'est-à-dire inférieure à celle de l'eau thermale, qui les refoule.

Les choses se présentent, au contraire, tout différemment : 1° lorsque le niveau d'infiltration de l'eau froide s'élève, accroissant d'autant sa pression en profondeur ; 2° quand le niveau statique de l'eau thermale s'abaisse, puisque alors l'eau froide peut, au contraire, se faire place dans la fissure hydrothermale et même refouler complètement l'eau chaude, de manière qu'au niveau statique de débit nul, on n'ait plus qu'une source froide.

Dans ce cas, le remède à employer dépend absolument de la largeur relative des fissures, qui amènent : d'une part, l'eau douce ; de l'autre, l'eau thermale.

Si les premières sont, de beaucoup, plus larges que les secondes ; s'il s'agit, par exemple, d'un mince filon hydrothermal situé dans les alluvions d'une rivière, comme nous en verrons un exemple à Ussat, un moyen qui réussit parfois, consiste à agir, non sur l'eau thermale, mais sur l'eau douce et à maintenir celle-ci à un niveau, reconnu empiriquement comme le plus favorable pour la composition de la source chaude.

Si, au contraire, l'eau thermale a, vers le griffon, un accès notablement plus aisé que l'eau douce, on peut essayer de gagner celle-ci de vitesse en établissant sur la source une pompe puissante, qui enlèvera l'eau chaude, avant que l'eau froide n'ait eu le temps d'arriver.

Quand cette pénétration d'eau froide se fait par une nappe perméable bien reconnue et voisine de la surface, on peut même essayer d'abaisser le niveau d'émergence au-dessous de cette nappe, dont on dérive alors, d'autre part, les eaux froides par un moyen quelconque ; ou bien l'on peut, par le captage, empêcher l'accès direct de cette nappe d'infiltration dans la colonne hydrothermale.

Ces idées seront précisées ultérieurement, lorsque nous étudierons les captages savants d'Ussat, de Bagnères de Luchon, etc. Nous voudrions seulement ici les compléter par l'examen d'un cas intéressant, sur lequel nous n'aurons pas l'occasion de revenir et que de nombreuses observations, nécessitées par des litiges judiciaires, ont permis de bien élucider : celui des eaux carbonatées de *Pougues*, dans la Nièvre ¹.

Ces eaux, arrivant, près de la surface, par une faille, s'épanchent dans les fissures d'un calcaire bajocien et s'y mélangent avec une proportion variable d'eau froide, introduite superficiellement au voisinage, avant d'arriver à leurs griffons.

L'ancienne source naturelle de Pougues, dont l'émergence était au niveau du sol, se nommait la source Saint-Léger. Un forage concurrent, situé à environ 750 m. et nommé la source Alice, vint, en 1891, recouper une fissure hydrothermale et il s'y produisit, d'abord, un jaillissement jusqu'à plus de 5 m. au-dessus du sol, avec un débit de près de 2 m³ à la minute, puis, après rétablissement de l'équilibre, un débit constant d'environ 250 litres. Du coup, les eaux thermales ayant ainsi trouvé une issue plus facile que l'ancienne, le niveau statique baissa de 4 m. dans l'ancienne source Saint-Léger et il résulta, de cet abaissement, une diminution d'un tiers dans la minéralisation, par suite du drainage qu'opéra, dès lors, la fosse de captage sur les eaux superficielles.

Pour remédier à ce dernier inconvénient, qui était grave, on essaya d'abord de faire l'embouteillage sur la source Saint-Léger,

FRIEDEL (*Ann. d. M.*, déc. 1897). Voir plus loin, p. 269, et fig. 38 et 39.

très doucement, en laissant l'eau à son niveau maximum. On pensait ainsi, à tort, exercer, par le moyen de la colonne hydrothermale, une charge refoulante sur les filets d'eau douce : ce qui aurait pu être exact, en effet, si le plan de captage avait été, non au-dessous, mais au-dessus du sol et si l'eau thermale y était montée directement de la profondeur, avec une force ascensionnelle supérieure à la pression hydrostatique des eaux froides.

Mais, dans ce cas, tout au contraire, en gardant l'eau à son niveau statique, à 4 m. au-dessous du sol, on laissait à tous les filets d'eau froide le temps d'arriver au griffon, avec une pression supérieure à celle de l'eau thermale et, par suite, la possibilité de refouler celle-ci.

Le remède (ou plutôt le palliatif provisoire) à cet état de chose fut, inversement, de pomper assez énergiquement pour enlever l'eau thermale plus vite que l'eau froide, le trajet plus compliqué et plus étroit de celle-ci ne lui permettant pas d'accéder aussi rapidement jusqu'au griffon.

Pour arriver à un résultat plus complet, on s'est enfin résolu à rétablir, autant que possible, les choses dans leur état primitif, en recréant, au-dessus de la source Alice, dont le forage avait causé le trouble, la charge primitive, qui refoulait toute l'eau thermale, avec la pression de ses gaz, vers la source Saint-Léger et lui donnait alors, en ce point, une forme ascensionnelle suffisante pour repousser les eaux froides. On a réalisé ce programme, sinon en bouchant la source Alice (ce qui eût paru un moyen trop radical), du moins en la surmontant d'un tube piézométrique, où l'eau s'est élevée jusqu'à son niveau statique de débit nul, à 4 m. au-dessus du sol.

§ 3. — *Variations du débit tenant à la section d'écoulement. Engorgement des griffons. Cas des nappes artésiennes exploitées par sondages. Influence réciproque de plusieurs sondages voisins. Effets du tubage. Emploi de la dynamite au fond des trous de sonde.*

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé, en principe, que la section de la conduite souterraine hydrothermale était un élément constant, non susceptible de modifications avec le temps et nous n'avons fait, à cette hypothèse, qu'une restriction, pour étudier, au paragraphe précédent, les modifications de débit pro-

duites par des variations du niveau de la source. Cependant, même dans le cas des sources filoniennes laissées à leur émergence naturelle, cette hypothèse n'est pas tout à fait exacte ; car, d'un côté, les phénomènes d'incrustation naturels tendent à diminuer progressivement cette section au voisinage de la surface et à augmenter les frottements, en engorgeant les griffons : ce qui amène souvent l'arrêt, ou, du moins, le déplacement des sources thermales et, de l'autre, on peut souvent, par des moyens artificiels, agir sur cette section, dans la même zone superficielle, en élargissant un orifice ou débouchant un griffon obstrué. Quelques coups de barre à mine bien donnés peuvent augmenter, d'une façon très notable, le débit d'une source. Nous reviendrons sur ces questions dans le livre consacré au captage ; mais ici nous voudrions examiner un cas, où le problème se pose un peu différemment : celui où, au lieu d'un filon hydrothermal, on a affaire à une nappe artésienne (eau carbonatée, eau saline, pétrole, etc.), constituant le réservoir souterrain, que l'on vient atteindre par un puits ou par un sondage, dont la longueur est généralement courte et dont on est maître de modifier à son gré la section.

Dans ce cas, le débit croîtra à peu près proportionnellement à la section du tube de sondage, ou, s'il y a plusieurs puits voisins, à la somme de leurs sections.

Ce n'est là, toutefois, qu'une grossière approximation et, comme la question n'est pas sans intérêt pratique pour certains bassins hydrothermaux, où l'on multiplie les sondages au hasard, nous allons en dire un mot.

Si l'on considère d'abord le problème comme une simple question d'hydraulique, il faut, pour que le débit s'accroisse proportionnellement à la section, ainsi que nous venons de le supposer, que l'afflux d'eau à la base du puits par les mille filets souterrains de la nappe perméable artésienne suffise à alimenter ce débit croissant ; or, ces filets ayant, eux, une section constante, si nous forçons plus d'eau à en sortir, c'est que cette eau y circule avec plus de vitesse ; mais alors les pertes de charge dues au frottement (qui sont proportionnelles à v^2) augmentent aussi et interviennent, dans l'équation de Bernouilli¹ pour diminuer la vitesse à la base du puits, c'est-à-dire que le *débit augmente avec la section, mais moins vite qu'elle*.

Cette conséquence s'applique nécessairement, aussi bien à deux sondages contigus qu'à un seul sondage, dont on doublerait la section et, dans ce cas surtout, on a constamment l'occasion de vérifier pratiquement la théorie.

Presque toujours, un sondage nouveau, portant sur la même nappe qu'un sondage ancien, dans le voisinage de celui-ci, diminue le débit du premier, tout en accroissant le débit total et nous ne parlons pas ici du cas, d'ailleurs fréquent, où le dernier travail, créant aux eaux une issue plus facile que la précédente, les détourne à son profit¹ mais seulement du cas normal, où les deux forages sont placés côte à côte, dans des conditions identiques.

C'est, par exemple, ce qui s'est passé à Paris, quand l'ouverture du puits de Passy, puis celui de la raffinerie Say, ont diminué le débit du puits de Grenelle. Il est facile, en pareille circonstance, de prouver l'influence réciproque des deux sondages en obturant l'un d'eux et constatant, par un manomètre, le relèvement correspondant de la pression dans l'autre.

Mais il est, en outre de ces actions purement hydro-dynamiques, une autre influence, qui, dans les sources gazeuses, telles que les eaux carbonatées ou les pétroles, est bien plus considérable encore : c'est celle des gaz emprisonnés dans l'eau, qui agissent sur la pression, c'est-à-dire sur le terme P de la formule de Bernouilli, pour augmenter la vitesse et, par suite, le débit.

Il est évident, en effet, que les nappes profondes ne contiennent, ou ne reçoivent, de ces gaz qu'une quantité limitée, toujours prête à s'échapper à la surface, quand on leur ouvre des orifices et, dès lors, sujette à épuisement rapide.

Dans le cas de gaz, probablement emmagasinés de longue date et non renouvelés, comme cela paraît avoir lieu souvent pour les pétroles, l'effet est particulièrement net et grave. Une source, d'abord jaillissante, reste ensuite à un niveau de plus en plus profond, où il faut aller la chercher en pompant.

Et même un niveau entier arrive à s'épuiser de cette façon, non pas tant parce que le pétrole manque, que parce qu'il ne s'élève plus : ce qui force les sondages à descendre jusqu'à des nappes de plus en plus profondes. On l'a bien vu au Caucase et en Pensylvanie.

Dans les sources carbonatées, l'effet est beaucoup moins mani-

¹ Voir, plus haut, ce que nous avons dit de Pougues, p. 184.

festes et il semble que la proportion d'acide carbonique soit souvent renouvelée, au fur et à mesure, par des phénomènes internes. Mais on n'en observe pas moins qu'un sondage nouveau, venant se placer à côté d'un sondage ancien, diminue généralement le débit du premier : ce qui entraîne des difficultés juridiques et des compétitions sans nombre.

La question légale, qui se pose à ce propos, est, — si on la considère d'une façon absolument théorique et en faisant table rase des lois existantes, — assez délicate ; car, d'une part, il est évident que le second sondage nuit à la propriété légitimement acquise par le travail du premier et, par suite, que la faculté d'en forer de trop nombreux peut, poussée à l'extrême, décourager les chercheurs d'entreprendre de tels efforts ; d'autre part, cette propriété est d'une nature spéciale, puisqu'elle porte sur une nappe d'eau, alimentée par les terrains de toute une région et dépendant, par suite, du domaine public. Or, si l'on envisage simplement l'intérêt général, il est certain que, puisque deux sondages fournissent plus d'eau minérale que n'en donnait à lui seul le premier, il y a avantage, pour tous, à laisser faire le second, qui accroît la richesse publique, à la condition toutefois que le bénéfice de ces sondages ne se trouve pas par là réduit de manière à empêcher les uns et les autres d'en forer. Il se présente donc là une question d'appréciation très complexe, pour tenir compte, à la fois, de ces deux éléments contradictoires et servir, en somme, la communauté, en laissant au labeur de chaque individu un prix qui l'encourage, sans paralyser à jamais le labeur également méritant de ses voisins.

En dehors de cette façon d'agir sur le débit d'un forage artésien par l'augmentation de l'orifice d'écoulement, on peut encore obtenir le même résultat par deux procédés, souvent employés pour les puits artésiens d'eau douce et qui, l'un et l'autre, rentrent dans ce que nous aurons à dire ultérieurement du captage.

Le premier, que chacun connaît, consiste à tuber le trou de sonde.

Le tubage a, comme on le conçoit aisément, pour effet immédiat, une augmentation du débit. Cela tient : d'une part, à ce que l'on diminue la résistance produite par les frottements sur une conduite irrégulière et inégale ; de l'autre, à ce qu'on évite les pertes d'eau minérale pendant le trajet.

Le tubage a, d'ailleurs, un autre avantage, qui n'est pas moins grand, celui d'empêcher le mélange, avec l'eau thermale, des infil-

trations superficielles et notamment des nappes d'eau douce, qu'on rencontre presque toujours en profondeur, avant d'arriver à la nappe thermique. Cette dernière considération fait que, pour les sources thermales, le tubage est, on peut le dire, indispensable : au moins, à la traversée des nappes d'eau douce.

On a, d'autre part, mis à profit, en Amérique, pour des puits à pétrole, l'idée assez originale de tirer des coups de dynamite au fond d'un puits stérile, afin d'augmenter son rendement, en ouvrant l'accès du puits à tous les éléments liquides qui se trouvaient retenus dans la roche au voisinage, ou peut-être se dirigeaient d'un autre côté. L'effet du coup de dynamite, — qui pourrait, à l'occasion, être essayé aussi pour l'eau, — est de pulvériser la roche au bas du puits, de manière à y créer une sorte de chambre de drainage ; il est possible aussi que la décompression brusque, qui suit la pression résultante de l'explosion, détermine une aspiration vers le puits.

Le procédé, que nous avons signalé ailleurs¹, consiste à descendre, au fond du trou de sonde, un tube contenant de la dynamite, avec une amorce de fulminate, sur laquelle on laisse tomber d'en haut une masse métallique. Le résultat est souvent très avantageux.

§ 4. — *Influences naturelles amenant des modifications dans le débit d'une source thermique. Action de la pression atmosphérique, du régime météorologique, etc.*

C'est un axiome admis en hydrologie thermique que le débit des sources thermales est constant et les distingue donc aussitôt des sources ordinaires, à débit variable avec les saisons.

Tout en étant relativement exact, le fait ne l'est pourtant pas autant qu'on veut bien le supposer et, si les observations étaient plus multipliées et mieux faites en vue d'une comparaison précise, les exemples de variations dans le débit des sources thermales, dont nous allons citer quelques-uns, seraient certainement très nombreux.

Il suffit de se rapporter à l'équation d'équilibre (3) donnée plus haut² pour voir quels éléments naturels peuvent amener ces variations dans le débit d'une même source.

Gîtes minéraux et métallifères, I, 81.

² Page 179.

Le premier, dont l'influence puisse se faire sentir, c'est la pression P et nous en avons déjà donné un exemple précédemment, en parlant de l'appauvrissement en gaz, qui résulte de sondages multipliés portant sur la même nappe artésienne; nous aurons également l'occasion d'y revenir bientôt, quand nous examinerons, dans deux paragraphes spéciaux¹ le cas des sources intermittentes et des geysers et celui des pulsations terrestres produites par les tremblements de terre; nous ne voulons ici mentionner que l'effet possible, sur le débit, des modifications dans la pression atmosphérique à l'émergence et de celles du niveau hydrostatique au point d'infiltration, qui peuvent influer sur la charge.

Les variations dans la pression atmosphérique doivent avoir sur le débit une influence plus sensible qu'on ne le croirait tout d'abord; cette pression s'exprime, en effet, théoriquement par une colonne d'eau de hauteur variable appliquée sur le griffon; modifier les dimensions de cette colonne correspond à déplacer le niveau d'émergence et nous avons vu combien ces déplacements produisaient un résultat immédiat.

Prenons, en effet, le cas de Bourbon-l'Archambault examiné tout à l'heure² et supposons une dépression de 10 cm. de mercure, ou 1 m. 35 d'eau (ce qui est à peu près le maximum à moins de cyclones); le débit peut, du coup, passer de 3 litres à près de 4 litres.

A Pougues, l'influence des variations dans la pression atmosphérique a pu être mesurée directement et s'est trouvée d'accord avec la théorie.

Quand la source est fortement gazeuse, une semblable dépression a, en outre, un effet indirect, en amenant un dégagement plus ou moins tumultueux des gaz emprisonnés, dégagement qui peut amener un jaillissement de l'eau.

Ainsi, d'après M. Rotureau³, à Nauheim (Hesse-Électorale), à la suite d'un violent ouragan, accompagné d'une très forte dépression barométrique, le 22 décembre 1846, une source d'eau salée, saturée d'acide carbonique, envahit soudain un forage depuis longtemps abandonné et forma un jet de 2 m. de hauteur au-dessus du sol. En établissant à la hâte un tubage en tôle de 43 m., on put utiliser cette source pour les bains et les salines.

Pages 195 et 198.

Page 180.

Eaux minérales d'Allemagne et Hongrie, p. 127.

En outre de la pression atmosphérique, le régime météorologique peut exercer, sur le débit plus ou moins fort des sources thermales, une action lente, mais souvent incontestable.

Considérons, en effet, la hauteur de la colonne d'eau descendante depuis le niveau hydrostatique jusqu'au point le plus bas ; c'est en fonction de cette hauteur que s'exprime la charge. Si donc le niveau hydrostatique vient à se relever momentanément dans la zone d'infiltration, comme il le fera après de grandes pluies ou d'abondantes précipitations neigeuses, la charge s'accroissant, la vitesse des filets d'eau souterrains deviendra plus forte, et, par suite, le débit plus abondant¹

Ces variations du niveau hydrostatique devront être nécessairement d'autant plus fortes que les accidents du terrain sont plus nombreux et les bassins hydrographiques plus restreints, comme c'est le cas dans les montagnes, tandis qu'elles se réduisent à peu de chose dans des régions de plaine à régime plus stable, à circulation intérieure plus lente, par exemple pour les nappes artésiennes du bassin de Paris.

Cette action des pluies aura, d'autre part, pour effet de multiplier le nombre des filets d'eau, qui contribuent à la formation de la source, c'est-à-dire d'augmenter, dans cette partie du circuit, la section ω .

On a, pratiquement, des exemples manifestes de ces variations périodiques, en relation avec le régime météorologique, pour la plupart des sources alpestres : Pfaefers, Gastein, etc. Nous allons seulement résumer ici ce que nous avons dit ailleurs pour *Pfaefers* (dans les Grisons)².

Pendant une moyenne de seize années (1837-1853), on avait eu là, en moyenne, des débits proportionnels aux nombres suivants :

NOVEMBRE	DÉCEMBRE	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	SOMME des 6 mois.
11,8	10,3	12,7	11,0	12,7	13,1	71,6

Il est inutile de dire qu'il ne faut pas confondre cette influence avec celle qui, dans les sources mal captées, peut augmenter le débit, au détriment de la minéralisation, par introduction d'eaux froides au voisinage du griffon.

Ann. d. Min., fév. 1894 — cf. ZIEGLER. *Die Mineralquelle Pfaefers*, 1861.

Dans l'hiver 1855-1856, par suite d'une sécheresse remarquable, les débits tombèrent, comme suit :

NOVEMBRE	DÉCEMBRE	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	SOMME des 6 mois.
3	7	11	5	4	9	39

Nombre d'observations ont montré, de même, une diminution marquée toutes les fois que l'hiver avait été sans neige. En outre, chaque année, l'abondance des eaux s'accroît pendant l'été, à partir de juin, environ deux mois après que la fusion des neiges a commencé et descend, au contraire, à son minimum, pendant l'hiver, alors que les montagnes voisines sont gelées et que les infiltrations sont presque nulles.

Les observations suivies sur cette source thermale (à 38°), qui datent au moins de soixante ans, ne laissent aucun doute sur cette connexion entre le débit et les précipitations neigeuses.

C'est, d'ailleurs, pourquoi les partisans d'une origine interne pour les sources thermales ont toujours dû faire une catégorie à part pour certaines sources analogues, qu'ils ont qualifiées de géo-thermales.

Mais les faits de ce genre, bien que moins manifestes et moins caractérisés dans les autres sources thermales, s'y présentent cependant presque toujours, et on les a constatés, à l'intensité près, pour la plupart des sources, sur lesquelles avaient porté des expériences suffisamment multipliées et précises, bien qu'on ait eu souvent tendance à les confondre avec les erreurs d'observation, qui intervenaient de leur côté.

M. Peslin a observé, à *Bagnères-de-Luchon*, sur des sources bien captées dans la roche en place, des variations notables et M. Beaugéy en mentionne de semblables aux sources du Salut, à *Bagnères-de-Bigorre*, également captées en roche d'une manière irréprochable¹.

A *Cauterets*, M. Peslin a fait des expériences sur les sources du groupe de César, dont l'une au moins, celle de César proprement

¹ *Ann. d. Min.*, mars 1892, p. 25 du tirage à part.

dite, était parfaitement captée, et a obtenu les résultats suivants ¹ :

SOURCES DE CAUTERETS	22 MARS 1859	6 MAI 1859	23 JUIN 1859	2 AOÛT 1859	13 AOÛT 1859	6 JANVIER 1860	28 JANVIER 1860	14 MARS 1860
	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
César.	224,755	211,500	205,969	197,812	201,600	221,760	214,603	207,893
Les Espagnols . . .	92,390	83,100	88,205	84,125	84,000	85,300	85,291	85,291
Pause-Vieux . . .	55,152	48,500	50,030	47,604	48,600	42,875	60,480	59,400
Tempérées	41,160	10,500	10,593	8,280	8,100	25,010	7,516	6,912

A *Bourbonne*, des observations suivies, faites, en 1857, par M. Cabrol², ont montré que, du 1^{er} juillet au 1^{er} septembre, la source diminuait progressivement, jour par jour, sans doute par l'influence combinée de la sécheresse de l'été et de l'épuisement continu, qui se fait alors au moyen de pompes pour les besoins de la saison. En octobre 1862, on a trouvé, sur la même source, à deux jours d'intervalle, des variations allant de 315 000 à 282 000 m³ par vingt-quatre heures, à mesure que l'on prolongeait l'épuisement.

A *Plombières*, M. Jutier³ a fait, de 1858 à 1862, des observations très précises sur le débit des diverses sources et a obtenu les résultats suivants, pour quelques sources prises au hasard :

SOURCES DE L'AQUEDUC DU THALWEG A PLOMBIÈRES

		N° 1	N° 3	N° 5	TOTAUX
1859	8 juillet.	50,77	39,40	110,93	275,78
	5 août	46,80	38,20	107,53	268,76
	7 septembre.	42,72	36,20	109,71	259,43
	27 octobre	49	39,82	103,26	263,36
	24 décembre	46,42	42,80	104,48	261,65
1860	7 janvier	50,31	43,74	103,25	266,94
	18 avril	41,51	40	107,32	252,47
	18 juillet.	46,01	42,37	102,27	252,44
	2 octobre	46	40,45	104,89	254,82

BEAUGEY. *Études sur les sources de Cauterets* (Ann. d. Min. mars 1892).

² DROUOT. *Mémoire sur Bourbonne* (Ann. d. Min., 1863, p. 104 du tirage à part).
Études sur Plombières, 1863, p. 90, 95, 100.

Les sources de l'aqueduc sont captées dans les graviers et le résultats obtenus sont, par suite, sujets à discussion. Les sources, dites savonneuses, sont, au contraire, captées dans la roche. Là également les variations de débit et de température sont assez fortes, sans que la loi théorique apparaisse nettement. Ainsi la source n° 3 a donné, par minute :

21 JUILLET 1859	29 JUILLET 1859	7 SEPTEMBRE 1859	8 NOVEMBRE 1859	9 DÉCEMBRE 1859	24 DÉCEMBRE 1859	7 JANVIER 1860	18 FÉVRIER 1860	18 AVRIL 1860	26 MAI 1860	18 JUILLET 1860	28 AOUT 1860	2 OCTOBRE 1860	10 JANVIER 1861	9 FÉVRIER 1861
litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres	litres
6,98	9,09	7,31	6,97	7,14	9,09	10,40	8,57	8,11	8	7,50	8,28	8,21	8,22	7,80

avec des variations de température insignifiantes : ce qui prouve qu'il n'y a pas, dans ce cas, intervention d'eaux superficielles, mais modifications profondes du régime.

En résumé, on a eu là des débits minima au milieu de juillet, maxima vers le mois de janvier : ce qui correspond bien, *grosso modo*, avec l'abondance probable des infiltrations pluvieuses.

Nous remarquerons, par parenthèse, qu'à Pfäfers, en Suisse, où l'altitude est déjà élevée, et où surtout les neiges sont persistantes pendant l'hiver, l'hiver correspond à une période de débit minimum, les maxima survenant après la fonte des neiges, au printemps. Au contraire, à Plombières, où les neiges tiennent beaucoup moins longtemps, c'est moins l'influence des neiges que celle des pluies qui intervient : d'où, à la fois, une irrégularité plus grande et des maxima, non plus au printemps, mais à la fin de l'automne, vers décembre et janvier.

Il y a, d'ailleurs, lieu de tenir compte de la durée du parcours souterrain et d'une foule de circonstances accidentelles ou locales.

Nous ajouterons, seulement, pour terminer ce qui est relatif à ces variations de débit, une remarque qui nous paraît en faveur de l'origine artésienne, attribuée par nous, d'une façon générale, aux sources thermales, c'est que les sources à fort débit, dont quelques-unes, comme celle de Pfäfers, citée plus haut, donnent de véritables fleuves d'eau chaude (4 à 6 000 litres par minute), se trouvent toujours dans les pays de montagnes, où les dislocations ont des

chances pour être nombreuses et plus largement ouvertes, en même temps que les infiltrations, produites par l'abondance des précipitations neigeuses, sont plus considérables.

§ 5. — Sources intermittentes et geysers.

Parmi les variations de débit, que peuvent présenter les sources thermales, il n'en est pas, cela se conçoit, de plus nettes que celles qui caractérisent les sources dites intermittentes et les geysers et qui s'y traduisent parfois par de véritables jaillissements temporaires.

Le phénomène du jaillissement intermittent d'une source peut se produire dans des circonstances diverses, que nous allons indiquer, et, quelquefois même, on s'attache à le réaliser artificiellement (non sans inconvénient pour le régime de la source), afin d'en faire un objet de curiosité.

1° En premier lieu, l'intermittence peut, comme dans les geysers, résulter d'une vaporisation en profondeur. On sait que chaque couche d'eau d'un geyser se trouve habituellement, vu sa pression, à une température inférieure à celle de l'ébullition, mais que, si un dégagement de gaz ou de vapeur vient à la soulever seulement de deux mètres, la brusque vaporisation, qui résulte de cette diminution de pression, amène une sorte d'explosion.

Comme les geysers exhausent constamment leur orifice d'émergence par leurs dépôts siliceux, ils finissent par constituer, sur leur griffon, un véritable tube piézométrique (citerne, ou *Laug*), où la pression hydrostatique de l'eau est constamment suffisante pour empêcher ces vaporisations en profondeur ; et leurs jaillissements s'interrompent alors.

2° En second lieu, dans les sources gazeuses, où l'intermittence est particulièrement fréquente, elle résulte de ce que les eaux, en se rapprochant de la surface et diminuant par suite de pression, perdent leur excès d'acide carbonique. Cet acide carbonique commence par remplir toutes les cloches renversées, que peut présenter la fissure thermale ; il s'y accumule et finit par y acquérir une pression telle, que l'eau jaillit, entraînant avec elle tous les gaz et vidant ces cloches, où le gaz s'accumule alors de nouveau jusqu'à un jaillissement suivant. Tel est le cas d'Hauterive près Vichy, de Montrond dans la Loire, etc.

Au moyen d'une cloche artificielle, intercalée dans le tubage d'une source jaillissante et en amenant le haut du tube, où se produit l'émergence, à un niveau convenable, on peut reproduire aisément ce phénomène. Mais ce n'est jamais sans inconvénient pour la source, qu'on s'expose parfois à tarir ainsi au bout de peu de temps. Car, le dégagement des gaz étant ainsi irrégulier, la brusque arrivée de l'eau produit des coups de bélier, qui ébranlent toute la colonne et amènent des obstructions dans le circuit souterrain. Aussi cherche-t-on, tout au contraire, en général, à régulariser le débit des sources gazeuses : ce qu'on obtient au moyen d'un tube intérieur, déterminant un écoulement constant de l'acide carbonique ¹

Nous citerons quelques exemples de ce genre de sources intermittentes.

A la source d'*Hauterive*, près Vichy, M. Voisin a constaté que des arrêts irréguliers de la source venaient des relèvements brusques de la pression barométrique, relèvements accompagnés, presque toujours, d'une diminution de température.

Selon lui, ces deux phénomènes ont pour effet de diminuer le débit de la source, non seulement par leur action directe, mais aussi parce qu'ils arrêtent le dégagement d'acide carbonique, qui soulève l'eau à l'état d'émulsion mousseuse. On peut également faire intervenir les cloches d'éboulement, qui doivent exister à la base du sondage et qui se remplissent d'acide carbonique.

Du moment qu'un semblable arrêt se produit un instant, l'émulsion gazeuse est remplacée par de l'eau, traversée seulement de quelques bulles de gaz ; il en résulte un accroissement de densité et une compression, qui fait abaisser le niveau jusqu'à 2 ou 3 m. en contrebas de l'orifice, et cela dure tant que l'acide carbonique, de plus en plus comprimé dans ses cloches souterraines, n'a pas recommencé à se dissoudre dans l'eau et à la soulever en l'émulsionnant. L'eau remonte donc peu à peu et finit par couler doucement ; mais, dès qu'elle s'est mise à le faire, l'agitation du liquide détermine une émulsion légère, qui entraîne un jaillissement, et tout reprend comme auparavant.

Des intermittences du même genre s'observent dans nombre de sources chargées d'acide carbonique : ainsi, à la source de Jaude, à Clermont, où l'intermittence est de cinq minutes ; à la

¹ Voir, plus loin (livre II), ce qui est relatif à la régularisation du débit des sources gazeuses.

source de Saint-Nectaire-le-Haut, où elle est de quinze minutes, etc.

Un des exemples les plus remarquables des sources thermales devant leurs intermittences à la pression de l'acide carbonique a été donné par le sondage de Montrond (Loire), décrit en détail par M. Laur et M. Daubrée.

Ce forage, qui a rencontré deux nappes thermales à 180 m., et 502 m., fut tubé, comme cela se fait d'habitude, au moyen d'une série de tubes, de diamètre de plus en plus restreint. Pendant le forage, l'eau, d'une façon normale, était toujours dans l'espace annulaire compris entre les deux tubes extrêmes ; mais, quand on arriva à 473 m. de profondeur, il se produisit, dans le tube central qui venait d'être posé jusqu'à 473 m., une gerbe de 35 m. de haut, qui dura vingt minutes et se reproduisit plusieurs fois. Puis, une fois le captage terminé à 502 m. et tous les intervalles des tubes ayant été obturés, le jaillissement se fit uniquement par le dernier tube central, avec des périodes de paroxysme, suivies de dépressions. Le mécanisme, qui est exactement celui que nous avons étudié plus haut, a pu être reproduit artificiellement¹.

3° Un cas différent peut se présenter pour les sources thermales, dont le réservoir profond d'alimentation ne suffit pas à leur fournir de l'eau pendant toute la durée des saisons sèches, ou bien qui présentent des poches souterraines, avec des déversoirs à divers niveaux.

Nous avons vu que le débit d'une source thermale était, en général, loin d'être aussi constant qu'on le supposait volontiers, et cela bien que leur température restât constante (ce qui prouve que les variations ne proviennent pas d'infiltrations superficielles). Il peut arriver que la diminution de débit soit poussée jusqu'à un arrêt complet.

Nous citerons, tout d'abord, les sources chaudes de Pfäfers, dans le canton de Saint-Gall, en Suisse², où, comme nous l'avons dit, le débit diminue énormément pendant toute la période hivernale, alors que les montagnes voisines sont recouvertes d'une couche de neige solidifiée et ne reçoivent aucune infiltration. L'une des sources, dite le Kessel, y tarit chaque hiver, pour reparaitre à peu près à époque fixe. Une source plus élevée, la Herrenquelle, formait,

DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, I, p. 369 à 375.

² L. DE LAUNAY. *Mémoire sur Pfäfers*. (Ann. d. M., fév. 1894, p. 47 du tirage à part.) Voir, plus loin, la description du captage de ces sources (avec fig. corr.).

avant les travaux de captage, un véritable trop-plein intermittent, fonctionnant seulement après que s'était remplie d'eau une sorte de grotte, recoupée, plus tard, par une galerie.

On retrouverait des phénomènes analogues dans nombre de sources alpestres, ou wildbäder, où le trajet souterrain des eaux semble se faire très rapidement. En France, Plombières est le meilleur type de ce genre de sources chaudes et peu minéralisées¹. La source intermittente Simon y est peut-être comparable à un trop-plein, qui ne fonctionne que lorsque l'abondance des eaux internes devient trop grande. Elle s'est arrêtée du 30 août au 12 décembre 1859, du 28 août à octobre 1860 et de février à mars 1861, et, chaque fois qu'elle a recommencé à couler, elle a augmenté, peu à peu, son débit, jusqu'à un certain maximum de 43 à 44 litres par minute, puis a décré de même.

§ 6. — *Influence des tremblements de terre sur les Sources thermales*²

L'action des tremblements de terre sur les sources thermales, qui s'accuse surtout par de brusques modifications dans leur débit, parfois même par un déplacement des griffons, a été, maintes fois, constatée, souvent même avec quelque exagération.

Les effets d'un tremblement de terre peuvent être comparés à ceux de vibrations, qui se propageraient dans le sol, à la suite d'une explosion produite en un point donné, ou de l'affaissement d'un compartiment de l'écorce. Il en résulte, dans les conduits souterrains, des sortes de pulsations, qui doivent y accroître et y réduire alternativement la charge, en vertu de laquelle l'eau thermale afflue vers le griffon. C'est ainsi que l'on observe, parfois, une augmentation considérable dans le débit, suivie d'un arrêt presque complet ; puis, une ou deux fois, la répétition en plus petit des mêmes phénomènes. La première conséquence en est que les sources commencent par se troubler et, quand elles sont gazeuses, que la proportion des gaz est changée.

Il arrive également que des fissures et des mouvements de

JUTIER. *Etude sur Plombières*, 1862, p. 124.

² Voir, sur cette question, des études de M. GIROD et du D^r POSKIN au congrès d'hydrologie de Clermont, 1897, p. 449 et des observations du D^r PINILLA à Madrid dans la même année.

terrain plus ou moins superficiels se produisent, entraînant, comme conséquence naturelle, des déplacements momentanés ou définitifs dans les sources.

La modification du circuit souterrain et de ses rapports avec les eaux superficielles peut amener une augmentation ou une diminution de température et de minéralisation, rendre une source plus abondante ou la faire disparaître, etc.

D'une façon générale, la plupart des phénomènes produits sont, d'ailleurs, temporaires.

L'un des tremblements de terre, dont l'action a été la plus manifeste dans la plupart des sources d'Europe, est celui de Lisbonne qui eut lieu le 31 octobre et le 1^{er} novembre 1755¹

A Nérès, le 1^{er} novembre 1755, à onze heures du matin, une colonne d'eau s'éleva de la source jusqu'à 3 ou 4 m. de hauteur et s'y soutint quelques secondes. Le volume des sources dans le bassin thermal fut très augmenté et prit une couleur laiteuse ; les fondements du puits de César furent emportés et une source nouvelle se creusa, à ses pieds, un bassin plus vaste et plus profond. A Vichy, la source de la Grande Grille subit des intermittences². A Bourbon-l'Archambault, le même jour, des phénomènes tout à fait analogues se firent sentir entre trois et quatre heures du soir. A Teplitz, en Bohême, un spasme semblable se produisit entre onze heures et midi³ : la source s'interrompt une minute, puis jaillit toute trouble avec une violence extraordinaire. La source de Cannstadt apparut dans la vallée du Neckar. Au même moment, toutes les sources du Maroc et d'Algérie s'interrompaient. A Luchon, les sources augmentèrent de température, tandis que la Reine et Salies à Bagnères-de-Bigorre descendirent de 48° et 51° à 32°. A Aix-les-Bains, les sources perdirent, pendant quelques heures, plusieurs degrés de chaleur. A Castello Alfieri, près Casale Monferrato, dans la nuit du 30 au 31 octobre 1755, trois puits profonds, dans l'enceinte du château, qui avaient toujours donné de l'eau douce, se remplirent d'eau sulfureuse et cet état de choses se

VOIR BERGHAUS. *Geologischer Atlas*, 1892, pl. 3, la zone d'extension de ce tremblement de terre. On a évalué la vitesse de la propagation de l'onde sismique ce jour-là à 540 m. par seconde. De Lisbonne à Nérès, cela ferait 50 minutes.

VOIR : *Dictionnaire* DURAND-FARDEL (art. Tremblements de terre).

VOIR : JOSEPH STEPLING. *Meditatio de causa mutationis thermarum Teplicensium factæ*, nov. 1755 (Prague 1763) et REUSS : *die Bäder von Teplitz* (Prague, 1835, p. 120) — GARELLI : *delle acque minerali d'Italia* (Torino 1864, p. 36).

Dict. Durand-Fardel.

maintint jusqu'à un autre tremblement de terre en 1808, qui fit rentrer les sources dans leur état normal.

De même, la découverte de la source d'Allevard (Isère) se rapporte, paraît-il, au tremblement de terre de 1791.

On a, dans chaque station thermale, soigneusement noté l'influence de tremblements de terre divers. Nous n'en citerons que quelques cas.

A Bagnères-de-Bigorre, les sources de la Reine et de Salies diminuèrent de température et se troublèrent en janvier 1840, mars 1843, juillet 1854¹ ; ce dernier tremblement de terre fit passer l'une des sources de Barèges de 18 à 20° et son débit de 12 400 à 28 800 litres.

« A Plombières, il existe, écrivait Lemaire en 1748, une source d'eau chaude, qui était assez froide il y a environ soixante-quinze ans et qui n'est devenue chaude que depuis l'horrible tremblement de terre, arrivé à Plombières et à Remiremont le 12 mai 1682. » Ce tremblement de terre, qui faillit détruire complètement Remiremont et ensevelir un grand nombre de personnes sous les ruines, avait été précédé, pendant trois semaines, par des grondements souterrains. On prétendit même alors, non sans quelque imagination, avoir vu des flammes sortant du sein de la terre et voltigeant sur des crevasses².

Dans la même région, des tremblements de terre se sont produits à diverses reprises en 1853, 1854, le 7 avril 1859, en mai 1861. Ils n'ont, d'après M. Jutier, exercé aucune action à Plombières. Au contraire, à Bourbonne-les-Bains, qui est distant d'environ 50 km., les effets ont été assez sensibles en 1861³.

Après plusieurs des secousses, le débit des trop plein des sources thermales a augmenté momentanément de 1/6 à 1/12. Il est vrai que, dans ce cas particulier, on s'est demandé si la dissolution souterraine de masses salines triasiques par les sources n'avait pas pu, en amenant des vides et des éboulements, être la cause première du tremblement de terre, ou avoir contribué à ses conséquences.

La même action a été observée sur des forages sahariens. En juin 1863, le forage d'El-Annatt, dans le Hodna, a subi un arrêt

Dictionnaire Durand-Fardel (art. Tremblements de terre).

² JUTIER. *Étude sur Plombières*, 1862, p. 121.

³ CABROL. (*Ann. Soc. météor. de France*, t. IX, p. 143 ; 9 juillet 1861) : Cf. DROUOT sur Bourbonne, p. 121, avec un tableau, p. 128.

momentané, coïncidant avec des oscillations du sol au voisinage ¹.

En juillet 1881, la source de Brides, en Valais, a passé de 35° à 36° de température, en même temps que sa minéralisation s'augmentait un peu, à la suite de secousses de tremblement de terre.

Enfin, récemment, du 28 avril au 1^{er} mai 1894, un tremblement de terre, qui a causé de grands désastres en Grèce, dans le nord de l'île d'Eubée et sur la côte voisine de Locride, autour d'Atalanti, a eu également une influence manifeste sur les sources de la région.

Aux thermes d'Ædipsos, en Eubée, de nouvelles sources jaillirent, dont une à 40°; les anciennes augmentèrent. En même temps, il se forma, autour d'Atalanti, une crevasse superficielle de 30 km. de long, 1 m. à 1,50 m. de large, 1,50 m. de profondeur maxima ².

Il paraîtrait, d'après Strabon, que quelque chose d'analogue s'était déjà produit, dans l'antiquité, à Ædipsos et aux Thermopyles, où, à la suite d'un tremblement de terre, des sources thermales avaient jailli pendant quelque temps.

Tous ces phénomènes, que nous venons d'énumérer et dont nous pourrions donner bien d'autres exemples, s'expliquent aisément par des déplacements superficiels du sol, causés par le mouvement vibratoire. Il n'est nullement nécessaire d'y voir, comme on le faisait volontiers alors qu'on rattachait l'origine des sources thermales aux profondeurs du globe, l'action directe d'une même cause volcanique. Il n'y a aucune raison, non plus, pour supposer que les régions de sources thermales soient plus exposées que d'autres aux tremblements de terre, comme étant constamment le siège d'une activité interne. Tout au plus doit-on remarquer, à ce propos, que les sources thermales étant, ainsi que nous l'expliquerons bientôt en détail, localisées dans les régions où se sont produits les derniers plissements terrestres, c'est aussi dans ces régions que le sol est encore à l'état le moins stable : en sorte que des tremblements de terre peuvent s'y produire, sans avoir, avec les sources thermales, d'autre lien que ce rapprochement tout à fait indirect.

DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, I, 158.

² De semblables phénomènes sont fréquents dans les régions volcaniques de l'Archipel, constamment troublées par des mouvements sismiques. Nous en avons cité jadis d'autres exemples pour Mételin (*Arch. des miss. scientif.*, 1890, 3^e sér., t. XVI, p. 36). En 1855, un tremblement de terre, qui ruina Brousse, tarit, pour plusieurs jours, toutes les sources du pays.

§ 7. — *Débit de quelques sources thermales.*
Leur puissance balnéaire.

Le débit des sources thermales est, comme on peut s'y attendre, extrêmement variable d'une source à l'autre. Voici quelques chiffres, surtout relatifs à des sources françaises :

	Hectolitres par jour.
Louèche (Valais)	100 000
Pfaefers (Saint-Gall).	57 600
Gastein (Tyrol)	35 000
Salins-Moutiers (Savoie).	35 000
Aix (Savoie)	30 300
Bagnères-de-Bigorre (Hautes-Pyrénées)	22 700
Graus d'Olette (Pyrénées-Orientales)	22 000
Dax (Landes).	21 000
Capvern (Hautes-Pyrénées).	17 400
Rennes-les-Bains (Aude).	16 500
Ax (Ariège).	13 300
Cauterets (Hautes-Pyrénées)	13 000
Amélie-les-Bains (Pyrénées-Orientales).	12 000
Châteauneuf (Puy-de-Dôme)	11 200
Bourboule (Puy-de-Dôme).	10 600
Néris (Allier).	10 100
Chatelguyon (Puy-de-Dôme)	9 000
Ussat (Ariège)	8 200
Plombières (Vosges).	6 400
Chaudes-Aigues (Cantal).	6 300

Si l'on fait l'addition des débits relatifs aux principales sources thermales françaises, on arrive à un total de 47 000 litres à la minute, ou 680 000 hectolitres par vingt-quatre heures, soit à peu près la centième partie du débit de la Seine à l'étiage, dans la traversée de Paris.

On voit que, pour diverses sources des pays de montagnes, ce sont de véritables ruisseaux qui sortent de terre : ce qui explique aussi comment, dans certains établissements, où l'eau thermique surabonde, on n'a aucunement à se préoccuper d'augmenter le débit par des artifices de captage. Mais il est, au contraire, des catégories de sources, très précieuses en thérapeutique et, par là même, très utilisées, mais peu volumineuses, où il importe de recueillir entièrement la richesse thermique ; nous examinerons, dans la

seconde moitié de cet ouvrage. comment, en pareil cas, un captage soigné peut remédier à cette indigence.

Dans la pratique des eaux thermales on évalue parfois, non le débit, mais la puissance balnéaire.

L'*unité balnéaire* étant le bain de 333 litres à 35 degrés centigrades et V le débit total par vingt-quatre heures exprimé en litres, la *puissance balnéaire* sera $\frac{V}{333}$ si les bains sont faits sans addition d'eau douce.

Si l'on coupe avec de l'eau douce à t pour ramener de t (température de la source) à 35°, un bain de 333 litres comprendra x litres à t degrés, plus y à t' et y étant déterminés par les conditions :

$$xt + yt' = (x + y) 35$$

$$x + y = 333$$

soit :

$$x = \frac{333 \ 35 - t'}{t - t'}$$

en sorte que la puissance balnéaire deviendra :

$$\frac{V}{x} \text{ ou } \frac{V}{333} \left[1 + \frac{35 - t'}{t - 35} \right]$$

Si V était exprimé en mètres cubes, comme 333 est $\frac{1}{3}$ de m^3 $\frac{V}{333}$ deviendrait 3V et l'on aurait :

$$3V \left(1 + \frac{35 - t'}{t - 35} \right)$$

CHAPITRE IV

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DIVERSES DES EAUX THERMO-MINÉRALES, ÉLECTRICITÉ, PLANTES ET ANIMAUX, PRÉSENCE DES MICROBES, ETC.

Nous serons assez bref sur les propriétés physiques des eaux thermales, autres que la température et le débit, dont il a été déjà question. Bien qu'on ait essayé d'expliquer leurs vertus spéciales par certains états mystérieux et mal définis, — des influences électriques, qui échappent à tout appareil de mesure ; des vibrations moléculaires qu'il resterait à constater¹, etc., — les propriétés qu'on observe, en réalité, sont simplement la conséquence de la température et de la minéralisation de ces eaux, des substances qu'elles tiennent en suspension ou des organismes qui s'y développent et n'ont rien de mystérieux, ni même de singulier.

Limpidité. — La limpidité, plus ou moins grande, d'une eau thermo-minérale présente souvent une réelle importance, surtout si cette source est destinée à la boisson.

La plupart des eaux thermales, en raison même de la vitesse avec laquelle elles remontent à la surface, apportent en suspension des particules plus ou moins fines des roches traversées, poussière de schistes, grains de sable, parcelles d'argile, etc., qui, lorsqu'il existe un réservoir de captage d'une certaine étendue, s'accumulent en général sur le fond. C'est ainsi qu'à Bourbon-l'Archambault, dans un curage de 1860, on a trouvé, sur les parois, une matière brune et plastique, fortement chargée de manganèse. A Ax, des parcelles d'ardoise forment une terre bleuâtre dans le réservoir.

Dans les sources obtenues par sondage, on a, fréquemment, au

¹ D^r JAVS. *Sur une manière d'envisager l'action des eaux thermo-minérales* (Congrès d'hydrologie de Clermont, 1897, p. 283).

début, une eau très trouble, qui s'éclaircit peu à peu, mais pour se troubler de nouveau, toutes les fois que la source subit un changement dans son régime : après une forte poussée d'eau et de gaz, à la suite d'une obstruction momentanée, d'un tremblement de terre, etc. La chose ne présente d'inconvénients réels que lorsque l'eau doit ses propriétés à une grande abondance de gaz, en sorte qu'il y aurait avantage à l'embouteiller aussitôt, sans laisser le gaz se dégager. On est néanmoins, même dans ce cas, forcé parfois de faire passer l'eau dans un bassin de décantation, que l'on ferme hermétiquement de manière à éviter les pertes de gaz. Il est essentiel, pour augmenter la limpidité, de rendre la venue d'eau très régulière, d'éviter les jaillissements intermittents, coups de bélier, etc.

Onctuosité. — Les eaux thermales sont souvent légèrement grasses au toucher, onctueuses et comme savonneuses. Elles doivent, en partie, cette propriété à la présence de matières organiques, appelées conferves ; mais parfois aussi, comme c'est le cas pour certaines sources des Alpes (Pfaefers, Gastein, etc.), il semble que leur extrême pureté, l'absence notamment de sels de chaux, leur donnent cette douceur caractéristique. On cite le cas des sources des Pyrénées, très riches en matières organiques et aussi très onctueuses, comme un exemple de la première influence. A Plombières, il est un groupe de sources, que l'on appelle les savonneuses.

Odeur et saveur. — Il est rare de rencontrer une source thermale, qui ne présente pas une odeur et une saveur spéciales, facilement explicables par la composition chimique de l'eau.

C'est ainsi que les eaux sulfurées ou sulfatées manifestent souvent la présence de l'acide sulfhydrique ; les bicarbonatées, celle de l'acide carbonique ; les salines, celle du sel, etc. Les sources d'Euzet (Gard) répandent une odeur de bitume si prononcée qu'elles ont reçu l'épithète de bitumineuses.

Densité. — Toutes les eaux minérales, sans distinction, ramenées à la température ordinaire, possèdent une densité un peu plus forte que celle de l'eau distillée, avec laquelle on les compare.

Deux causes influent, en sens contraire, sur cette densité : d'une part, les sels minéraux dissous, qui chargent ; d'autre part, les gaz, qui allègent.

Les eaux les plus lourdes sont les eaux chlorurées; puis viennent les bicarbonatées et, en dernier lieu, les sulfurées sodiques :

	Principes fixes.	Densité.
Eaux chlorurées	Eaux de la mer Morte	1,1940
	Eaux de la mer Méditerranée.	38,62
	Source de Salzbrunnen, à Nauheim	25
	Wiesbaden	8,45
	Soden	2,25
Eaux bicarbonatées et sulfatées	1,001 à 1,005	
Eaux sulfurées calciques		1,0012
Eaux sulfurées sodiques.		1,0002

Couleur. — Les eaux minérales sont, en général, incolores en petites quantités; verdâtres par grandes masses, comme des eaux douces. Quelques-unes présentent des teintes spéciales¹.

Ainsi l'eau de certaines sources d'Ax (Ariège) présente une couleur bleue, que l'on a successivement attribuée : soit, avec Dispan, à une illusion d'optique; soit, avec Magne-Lahens et Durand-Fardel, à la présence de parcelles d'ardoises à un état de division extrême; soit enfin, avec Fontan et Garrigou², à la décomposition du sulfure alcalin au contact de l'air.

Cette dernière opinion se fonde sur ce que l'eau ne devient bleue qu'après s'être trouvée exposée à l'air (phénomène particulier, constaté à la source Hardy, du Breilh); en même temps, il se dépose un précipité de soufre, avec un peu de silice et de matière

Le passage suivant, extrait de *Pausanias* par le D^r LABAT, montrera que ces variations de teinte avaient déjà frappé les anciens :

L'eau la plus bleue est celle des *Thermopyles*.

Il y a aussi des eaux rouges de sang dans le pays des Hébreux, à *Joppé*.

J'en ai vu de noires à *Astyra*, bains d'eaux chaudes, vis-à-vis Lesbos.

Enfin les Romains ont des eaux blanches assez près de Rome, au delà de l'Anio. Quand on s'y baigne, on est d'abord saisi de froid, jusqu'à trembler. Au bout de quelque temps, on sent autant de chaleur que si l'on était dans l'eau chaude.

En Messénie, dans un temple de Diane, est un puits, dont l'eau, naturellement mêlée d'une espèce de résine, ressemble, pour la couleur et pour l'odeur, au baume de Cyzique.

Qu'il y ait des fontaines d'eaux salées ou âcres, cela n'est pas rare. Je ne dois pas en omettre deux : l'une dans une plaine de la Carie, nommée la *plaine blanche*, dont l'eau chaude est plus douce que du lait; l'autre, dont parle Hérodote, se jette dans le fleuve Hyspanis; ses eaux sont amères.

Nous voyons, à *Pouzzoles*, des eaux très chaudes, qui ont fondu des tuyaux de plomb.

Voir *Dictionnaire DURAND-FARDEL* (art. Bleuissement) et 1862, D^r GARRIGOU. *Les eaux d'Ax*, p. 77.

organique. D'après le D^r Garrigou, la production du soufre libre, bleuisant l'eau, a lieu : 1^o lorsqu'il existe dans l'eau de l'acide sulfhydrique libre, qui vient se mettre en contact avec l'oxygène de l'air; 2^o lorsqu'en présence d'une eau riche en sulfure, il y a de l'oxygène et de l'acide carbonique.

Les eaux sulfurées, lorsqu'elles ont reçu le contact de l'air, deviennent souvent opalines par la précipitation d'une partie du soufre, à un état de division extrême (Luchon, etc.) : on les appelle alors eaux blanchissantes. Quelquefois, le monosulfure se transforme partiellement en polysulfure jaune, par le phénomène connu sous le nom de dégénérescence : ainsi, à Barèges, etc.

Certaines eaux ferrugineuses sont rouges, etc.

Électricité des eaux. — Parmi toutes les propriétés merveilleuses, que l'on a attribuées aux eaux thermales, l'une des plus naturelles à supposer était un état électrique spécial¹. On devait y songer surtout pour les eaux, dites simples, indifférentes (wildbäder, thermes alpestres, etc.), dont la minéralisation, à peu près nulle, ne suffisait pas à expliquer les effets, comparables peut être à ceux d'une simple hydrothérapie. L'idée était, à coup sûr, séduisante, puisque de la vapeur d'eau, s'échappant par un ajutage étroit, s'électrise; puisque les fumerolles volcaniques, les nuages se chargent d'électricité, etc. : il n'y avait donc rien d'illogique a priori à ce qu'une eau thermale, chargée de sels minéraux, arrivant sous une forte pression par un griffon étroit, fût électrisée. Cependant, à la suite de nombreux essais contradictoires, — où il s'est malheureusement mêlé beaucoup d'inexpérience de la part des opérateurs, qui étaient moins des physiciens que des médecins, — l'hypothèse d'une action électrique des eaux thermales est aujourd'hui complètement abandonnée. Comme il est probable qu'on la verra renaître un jour ou l'autre, nous allons résumer les principaux travaux, qui ont été faits sur ce sujet.

Les résultats, que l'on a cru obtenir, sont de deux sortes :

1^o La proportion d'hydrogène et d'oxygène ne serait pas la même dans l'eau thermale que dans l'eau douce.

2^o L'eau thermale serait le siège de courants déviant l'aiguille du galvanomètre.

VOIR SCOUTETTEN. *De l'électricité considérée comme cause principale de l'action des eaux minérales.* (Metz, 1864.) — *Dictionnaire DURAND-FARDEL* (art. EAUX MINÉRALES) : I, 591.

1° *Proportion d'hydrogène et d'oxygène.* — MM. Baumgartner et M. Roller sont les premiers auteurs qui, en 1828, soumirent les eaux minérales à l'action d'un courant électrique; ils crurent alors reconnaître que, tandis que l'eau ordinaire se décompose en deux volumes d'hydrogène et un volume d'oxygène, les eaux de Gastein donnaient trois volumes d'hydrogène au pôle négatif et un volume d'oxygène au pôle positif. MM. Baumgartner et Roller ne rencontrèrent, d'ailleurs, cette singulière propriété qu'avec les eaux de Gastein.

Plus tard, M. Leconte, expérimentant, de la même manière, avec les eaux sulfurées d'Enghien, obtint : au pôle positif, 2,3 cm³ d'oxygène et, au pôle négatif, 15,6 cm.³ d'hydrogène : résultat qui semblait confirmer, en partie, celui indiqué avec l'eau de Gastein. Ce chimiste observa, en outre, que l'eau, soumise à l'action électrique, perdait bientôt son odeur, l'acide sulfhydrique libre contenu réagissant sur le bicarbonate de chaux pour former un monosulfure; après quoi, une partie du monosulfure va, avec l'hydrogène, au pôle négatif, tandis que l'autre portion, amenée au pôle positif, forme, sous l'influence de l'oxygène naissant, de l'hyposulfite.

Ces expériences furent reprises, vers 1858, par MM. Jutier et Lefort à Plombières.

Ils constatèrent, en effet, qu'en soumettant l'eau thermale à l'action d'un courant électrique formé par quatre éléments de Bunsen, le rapport des volumes d'hydrogène et d'oxygène était constamment plus grand que ce qu'il aurait dû être : 2 à 1. Mais ils en donnèrent aussi une explication rationnelle.

Si l'on réfléchit, en effet, que les eaux minérales ne sont jamais exactement saturées d'air, que l'intensité du courant électrique employé n'est pas assez grande pour réduire les oxydes et les acides minéraux et que l'hydrogène et l'oxygène, doués d'une solubilité très différente dans l'eau, se dégagent des conducteurs de platine à l'état de bulles très ténues et présentant, par cela même, une plus grande surface à l'action dissolvante de l'eau, on est amené à conclure que l'anomalie constatée tient simplement à ce qu'il est resté un peu plus d'oxygène que d'hydrogène en dissolution dans l'eau.

En résumé, pour MM. Justin et Lefort, l'eau thermale se comporte, en présence de l'électricité, comme une eau douce, sauf la décomposition possible de certains sels, tels que les bicarbonates.

2° *Courants supposés dans l'eau thermale.* — Les premières expériences ont également été faites à Gastein, où Baumgartner, Wolf, le professeur Buff, de Giessen, etc., constatèrent, successivement, que l'eau minérale déviait à 50 degrés l'aiguille magnétique du multiplicateur, tandis que l'effet était à peu près nul avec de l'eau distillée ; mais, comme l'action est aussi forte avec nombre d'eaux ordinaires et supérieure avec des dissolutions salines un peu concentrées, il faut simplement l'attribuer à la présence habituelle de sels en dissolution dans l'eau thermale.

Les principaux faits de ce genre ont été repris et groupés en 1864 dans un ouvrage publié par un médecin de Metz, le D^r Scoutetten : *de l'électricité considérée comme cause principale de l'action des eaux minérales.*

Suivant lui, une eau minérale forme, par suite des sels minéraux dissous, une véritable pile, qui doit, dans le bain, amener, au contact de la surface cutanée, des courants variables suivant la température, la minéralisation, peut-être même l'état du malade, etc.

Cette eau minérale atteint son maximum d'électricité, lorsqu'elle est chargée de sulfates, en présence d'acide sulfhydrique ; les monosulfures donnent une déviation de l'aiguille galvanométrique, supérieure à celle des autres bains¹

A la suite de discussions devant la Société d'hydrologie, le D^r Lambron à Bagnères-de-Luchon, le D^r Gigot-Suard, à Caunterets, firent des expériences nouvelles.

A Luchon, suivant le D^r Lambron, l'intensité du courant semble liée à la richesse sulfureuse et la rapidité de l'affaiblissement de ce courant est en raison directe de la rapidité d'altération de l'eau et de la proportion de son mélange avec des eaux étrangères. Il observa, en outre, que la partie du corps frappée par une douche se chargeait d'électricité négative, tandis que les autres régions se chargeaient d'électricité positive. Sous l'influence de deux douches simultanées de température différente, la région soumise à la douche la plus chaude devenait négative par rapport à la plus froide.

A Caunterets également, le D^r Gigot-Suard constata que l'eau sulfureuse avait une activité électrique, qui diminuait avec l'altération à l'air ; mais il se refusa, comme on le fait généralement aujourd'hui, à admettre une intervention quelconque de cette électricité dans la thérapeutique.

Cf. 1882. D^r DUHOURCAU. *Cauterets*, in-8°, chez Delahaye, p. 37.

Un des résultats physiques de ces expériences se trouve, d'ailleurs, confirmé par des travaux de A. Becquerel, qui ont montré que les monosulfures déterminaient une force électromotrice supérieure de plus d'un tiers de celle des persulfures.

On a rappelé encore les courants électriques, qui se produisent dans un tissu, une membrane endosmotique séparant deux dissolutions salines (Becquerel et Onimus), la combinaison que l'électricité peut amener entre l'azote dégagé par nombre de sources et les matières organiques, etc.

Plantes et animaux ¹ — Dans le griffon des sources thermales, la vie se développe souvent, sous ses deux formes, végétale et animale. Nous n'avons pas à entrer ici dans le détail de cette étude spéciale; nous en rappellerons seulement quelques résultats, qui ont une influence indirecte sur la composition chimique des eaux.

Les végétaux constituent un groupe particulier d'algues, vulgairement désignées sous le nom de *conferves*, quoiqu'en réalité les vraies conferves ne soient qu'une section plus restreinte des algues.

Ces conferves se développent, plus ou moins abondamment, dans tous les bassins d'eau chaude exposés à l'air et à la lumière; elles tapissent de leur végétation les parois des réservoirs thermaux, auxquels elles donnent généralement un aspect très caractéristique, avec une teinte blanchâtre ou verdâtre. On les a étudiées, dans la plupart des stations thermales, en leur donnant souvent un nom spécial, nérisine, pyrénéine, barégine, glairigène, etc.; quelquefois même, on leur a attribué, comme à Nérès, un rôle spécial dans le traitement, en sorte qu'on s'est attaché à les multiplier artificiellement.

Ces conferves, très poreuses, ont leurs touffes remplies des gaz de la source et l'analyse de ces gaz emprisonnés donne, fréquemment, des proportions un peu différentes de celles observées directement sur les gaz dégagés par la source.

Plusieurs d'entre elles, qu'on appelle les *sulfuraires*, décomposent les sulfates des eaux pour donner des sulfures et mettre en liberté de l'hydrogène sulfuré ². Elles jouent certainement un rôle dans la formation des eaux sulfureuses.

Dictionnaire DURAND-FARDEL (art. Matières organiques). — 1854, LAURÈS ET BACQUEREL, *Sur les conferves de Nérès* (Ann. Soc. hydr. méd. de Paris, t. I). Cf. p. 133.

Voir, à ce sujet, un mémoire de COHN, un des fondateurs de la bactériologie.

Elles ont également la propriété, comme toutes les matières organisées vivant dans l'eau, de fixer et de concentrer légèrement certaines substances, qui, dans l'eau même, sont à peine perceptibles. C'est ainsi qu'on y trouve souvent des traces d'iode (Bourbon, Nérès, etc.) : fait qui se retrouve, d'ailleurs, dans la plupart des algues d'une eau quelconque¹. On y observe parfois aussi des substances cristallisées (calcite à Nérès, etc.).

Comme animaux, on constate, assez souvent, dans les bassins thermaux, une paludine, le *turbo thermalis*, qui vit dans des sources à 50°; le *Limneus pereger*, qui ne se rencontre habituellement que dans les eaux froides, existe à Gastein (Tyrol), à près de 48°. Dans les sources de Washita (États-Unis), à 72°, on a signalé des insectes et, dans l'eau thermale de Poorec, au Bengale, à 44°, des poissons carnivores².

En outre de ces animaux, qui vivent dans le griffon, on a parfois mentionné le fait de sources artésiennes, rejetant, au bout de plusieurs mois, plantes ou coquilles provenant de leur point d'infiltration. M. Daubrée en cite plusieurs exemples³ : dans un puits de 110 mètres à Tours, dans la craie inférieure, en janvier 1830, des graines de plantes et des coquilles d'eau douce (planorbis, helix, etc.); dans un puits de 45 m. près Bochum, en Westphalie, des poissons de 8 à 10 cm.; dans l'Oued-Rhir, d'après M. Rolland, des crabes, poissons et mollusques vivants, etc. Ces faits ne peuvent évidemment se produire que si l'eau circule par des fissures, dans un réseau de conduits souterrains, et non par porosité, suivant une nappe continue dans des sables. Enfin, de Humboldt parle de poissons rejetés vivants du cratère du Chimborazo, au moment d'une éruption d'eau à 98°.

A côté de ces animaux et plantes de dimensions appréciables, il convient de mentionner, en raison de l'importance qu'on y attache aujourd'hui, la constatation, souvent faite, de microbes dans des eaux thermales. Le fait, quand on le signale, attire tout particulièrement l'attention, s'il s'agit d'une eau employée comme boisson, puisque l'énorme développement récent de cette industrie des

¹ On sait que la plupart des végétaux d'eau douce contiennent de l'iode (CHATIN, *Journ. Pharmacie* 3, XXVII, 418). D'autre part, on a trouvé (CR. XXXI, 495) des iodures et bromures dans toutes les eaux naturelles, et von Aukam a constaté des iodures dans toutes les eaux potables de Hollande.

Dictionnaire DURAND-FARDEL, passim.

³ *Eaux Souter.*, I, 159.

eaux minérales, comme eaux de table, tient précisément à ce qu'on veut éviter l'usage d'eaux superficielles contaminées.

L'existence des microbes dans des bouteilles d'eau minérale doit tenir, bien souvent, à la façon dont ont été faits le rinçage et l'embouteillage¹; dans le griffon même, on l'attribue, en général, avec raison, à l'infiltration d'eaux de surface et l'examen attentif de presque toute les sources montre, en effet, que ces infiltrations, à une profondeur plus ou moins grande, jouent un rôle beaucoup plus général qu'on ne le croit dans les variations de la température et du débit. Cependant on peut concevoir, en outre, à titre exceptionnel, qu'une eau arrive de son circuit souterrain sans aucun mélange impur et contienne néanmoins des microbes, absolument comme, dans les exemples signalés plus haut, elle renferme jusqu'à des mollusques et des crabes; elle n'a pu être, en effet, purifiée, que si elle a subi, soit un filtrage parfait à travers des substances poreuses, soit une ébullition interne. Et vouloir qu'une eau thermo-minérale soit, *par définition même*, indemne de microbes, c'est, au fond, reprendre, sous une autre forme, la vieille idée que les eaux thermales ont une origine indépendante des phénomènes superficiels et viennent directement du centre de la terre.

Enfin, l'on constate, dans les eaux thermales, comme dans les eaux douces d'ailleurs, la présence d'une matière organique extrêmement diluée, ou même en dissolution, qui ne manifeste ordinairement sa présence que par la coloration jaunâtre, brune, noire ou grisâtre, qu'elle communique au résidu de l'évaporation de l'eau par la chaleur; quelquefois encore, par l'odeur de l'eau à l'évaporation.

Cette substance paraît contribuer au dépôt azoté, onctueux et glaireux, qu'abandonnent les eaux, lorsque leur température s'abaisse au-dessous de 50° (luchonine, nérissine, barégine, etc.). Ces dépôts inconsistants et vacuolaires semblent, d'autre part, une première forme de la végétation des conferves.

Voir, plus loin, un chapitre spécial sur l'embouteillage.

CINQUIÈME PARTIE

RÉPARTITION DES SOURCES THERMALES A LA SURFACE DU GLOBE. — GRANDES RÉGIONS NATURELLES DE SOURCES THERMALES

CHAPITRE PREMIER

RELATIONS DES SOURCES THERMALES AVEC LA GÉOLOGIE GÉNÉRALE

§ 1. — *Généralités. Relations des sources thermales avec les zones de dislocation récentes. Application aux filons métallifères. Possibilité que les faciès caractéristiques des groupes métallifères, observés dans les chaînes d'âges divers, tiennent à la profondeur plus ou moins grande mise à jour par les érosions.*

La partie de cet ouvrage, que nous abordons en ce moment, sera consacrée à un essai de description rationnelle et méthodique des grandes régions hydrothermales du globe, où nous nous efforcerons de rattacher ces manifestations spéciales à l'ensemble de la géologie terrestre et surtout à l'histoire des dislocations récentes du sol, en éclairant, autant que possible, l'un des phénomènes par l'autre. C'est là un travail de coordination difficile, pour lequel nous sommes obligé de demander, d'avance, une grande indulgence; car, n'ayant pour nous diriger aucun essai antérieur du même genre, nous sommes exposé parfois à nous égarer dans un champ aussi vaste et aussi peu exploré. Les rapports, que nous chercherons à établir entre le gisement des sources thermales et la structure tectonique de tous les pays, demanderaient, pour l'ensemble de la terre, une connaissance précise des particularités géologiques les plus délicates et les moins connues, celles qui concernent les fractures diverses des roches et des strates, par lesquelles remontent au jour les eaux souterraines. Au lieu de cela, nous ne

possédons guère, même pour les pays les plus favorisés, que des tables de noms de sources et parfois des séries d'analyses sans aucun commentaire. Nous avons donc été obligé de commencer notre étude par un travail de rapprochement assez long entre ces catalogues de sources et les descriptions géologiques, faites, dans un ordre d'idées tout différent, pour les mêmes régions. Il est impossible de trouver le fil d'Ariane, qui doit, au milieu du désordre des faits particuliers, conduire aux idées générales, sans avoir, d'abord, exactement localisé ces menus faits dans l'espace. D'où, trop souvent, dans les pages qui vont suivre, des énumérations, pour l'aridité desquelles nous nous excusons d'abord ¹

Il est à peine besoin de dire qu'en les publiant ici, nous ne visons nullement à cataloguer les innombrables sources thermales, qui peuvent exister de tous côtés, mais seulement à mettre en lumière, par des exemples nombreux et par des rapprochements, les lois d'ensemble, auxquelles nous a conduit cette étude. Quelle que soit, d'ailleurs, la valeur réelle de ces lois, ceux qui voudront, après nous, aborder le même champ d'études, nous sauront peut-être gré de trouver le champ débroussaillé et les cases toutes préparées pour recevoir ces observations de détail, qui sont le germe fécond des synthèses futures.

L'exposé que nous avons déjà fait de l'origine et des propriétés des sources thermales, dans les quatre premières parties de notre livre, aura assez montré comment chacune de ces sources, individuellement, se rattache à la géologie de la région, où on l'observe et tire, de la nature des terrains avoisinants, ses propriétés caractéristiques. Nous voudrions maintenant aller un peu plus loin et chercher si la répartition des sources thermales à la surface du globe n'est pas en rapport avec quelques lois géologiques très générales, qu'elle peut contribuer à faire connaître. Le problème présente, en dehors même de la question particulière des eaux thermales, plus d'un côté intéressant ; car, ce que sont les sources thermales à notre époque, les eaux métallisantes, auxquelles on doit l'incrustation des filons, ont dû l'être aux époques antérieures. Si donc nous arrivions à établir des règles théoriques pour la répartition des sources thermales actuelles, on pourrait tenter de les appliquer anciennement aux filons et l'on aurait peut-être ainsi

¹ Elles ont été généralement imprimées en petits caractères, pour mieux permettre de suivre la marche des idées.

quelques jalons dans ces questions. si obscures encore, du groupement chronologique des formations métallifères et de leur répartition géographique par rapport aux plissements anciens.

Mais, pour aborder avec chances de succès un problème semblable, il faut évidemment commencer par restreindre le sens, dans lequel nous avons entendu, jusqu'ici, les eaux thermo-minérales, et nous borner à celles qui, par leur thermalité spéciale, témoignent d'un circuit souterrain profond. Toutes les autres eaux, — qui peuvent d'ailleurs être très fortement minéralisées par la rencontre d'un gisement salin quelconque et que leur emploi thérapeutique nous avait conduit à envisager également dans les chapitres précédents, — n'apportent, on le comprend, aucun indice sur la constitution tectonique du sol, qui nous préoccupe seule en ce moment et prouvent seulement l'existence de quelques dépôts lagunaires, dont la répartition sur la terre est suffisamment connue par la géologie. C'est donc uniquement des *Sources thermales*, au sens propre du mot, que nous allons nous occuper.

On pourrait seulement remarquer, avant d'aller plus loin, que les dépôts lagunaires eux-mêmes présentent une certaine relation avec les plissements de l'écorce terrestre, qui donnent lieu aux sources thermales ; car c'est, généralement, par l'effet de ces plissements que se sont constitués les bassins d'évaporation, où l'on retrouve aujourd'hui le gypse, le sel marin et autres produits solubles, qui alimentent les sources salines. Il serait donc, si on le voulait, possible d'établir, même pour cette catégorie de sources, une certaine relation avec les directions géologiques du globe.

Cette remarque faite, si l'on considère les cartes d'hydrologie minérale, qui ont été dressées dans divers pays et qui indiquent la position des sources thermo-minérales¹, en ayant soin d'effacer, malgré leur minéralisation, toutes les sources à la température ordinaire, qui sont formées, en réalité, d'eaux purement superficielles, on voit aussitôt les sources thermales se

¹ Il faut, évidemment, se garder d'adopter, sans contrôle et sans discussion, ces cartes hydrothermales, où des sources, très différentes en réalité, sont souvent classées sous la même rubrique. Il faut encore bien moins se fier à des catalogues, donnant le nombre des sources thermales de tel ou tel genre ; car rien n'est plus sujet à l'arbitraire que le nombre des sources distinctes d'une région hydrothermale donnée.

Nous ne croyons pas devoir reproduire ici de carte générale des sources thermales françaises ; cette carte qui, pour être lisible, est nécessairement d'un format incommode, se trouve déjà dans nombre de publications, telles que la *Statistique officielle du Ministère des Travaux Publics l'Annuaire des eaux minérales de la France* de MM. Jacquot et Willm, etc. Mais on trouvera, pages 36, 238, 310 et 327 des cartes spéciales relatives aux sources du Plateau Central, des Alpes, des Pyrénées et des Vosges.

grouper en un très petit nombre de régions, suivant certaines lignes, qui correspondent à de grands accidents dynamiques de l'écorce terrestre.

Cela était facile à prévoir, puisque la remontée au jour d'une source thermale à haute température prouve, au point où elle vient sourdre, l'existence d'une fracture importante et profonde et que les sources thermales sont, par suite, nécessairement reliées aux régions faillées du globe.

L'étude de la répartition géographique des sources thermales devra donc commencer logiquement par un exposé rapide sur l'allure des dislocations terrestres : exposé, qui fera l'objet d'un paragraphe suivant¹

Mais, par la lumière qu'elles nous apportent implicitement sur la disposition et le prolongement de ces fractures en profondeur, les sources thermales peuvent, ce nous semble, fournir la plus utile contribution à la géologie même. Elles mettent, en effet, nous le montrerons, en évidence et comme si nous les touchions du doigt, les lignes de dislocation terrestres, assez récentes pour n'avoir pas encore été incrustées, obstruées, ni refermées d'une façon quelconque.

C'est là une loi, qui nous paraît tout à fait essentielle et qui n'avait pas encore été signalée, croyons-nous : *les sources thermales sont, comme les volcans, auxquels les rattache un lien d'origine précédemment indiqué*² *en relation avec les phénomènes de dislocation les plus récents de l'écorce terrestre (plissements ou effondrements) et localisées dans les zones assez restreintes de la terre, où ces derniers phénomènes se sont fait sentir*³

On voit, de suite, la conclusion, qui résulterait de cette loi, si nous arrivions à la démontrer, pour les filons métallifères.

Il s'ensuivrait qu'à une époque quelconque les remplissages métallifères se sont produits uniquement sur les zones qui venaient de subir l'effet de la dernière dislocation⁴ et, par suite, que les

¹ Voir plus loin, p. 221.

² Voir plus haut, p. 11.

³ Nous reproduisons ici, d'après Neumayer (fig. 24) une petite carte, représentant les chaînes récentes de plissement du globe. La plupart des sources thermales s'y trouvent rassemblées et, pour les avoir toutes, il suffirait d'y joindre les zones effondrées et volcaniques, comme on le voit sur la fig. 63, p. 381.

⁴ Chaque zone de dislocation successive est venue empiéter, à son tour, dans une certaine mesure, sur les zones précédentes : ce qui a amené les réouvertures de certains champs de filons à diverses époques, relativement rapprochées les unes des autres.

phénomènes d'incrustation métallifère filonienne ont dû se déplacer progressivement, à la surface du globe, de la même façon et dans le même sens que les plissements eux-mêmes : cela, par la seule considération de la fracture remplie et quel que fût, d'ailleurs, le métal incrustant, la nature de celui-ci ayant dû successivement, dans chaque zone de dislocation ainsi considérée, être déterminée par la composition, peu à peu modifiée, des magmas éruptifs, ramenés au jour en conséquence de ces mouvements.

Nous essayerons, tout à l'heure, d'aller plus loin et de voir, après chaque plissement du sol, quelles doivent être les zones particuliè-

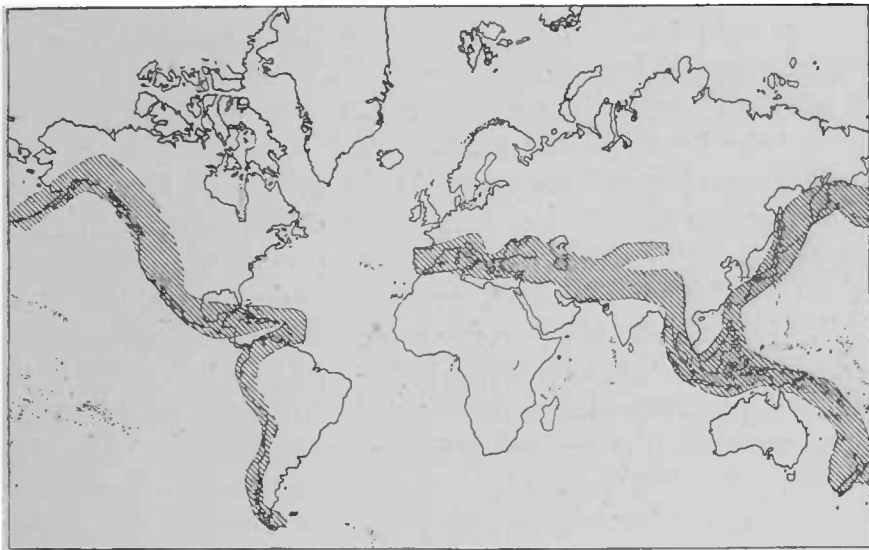


Fig. 24. — Carte des zones influencées par les derniers plissements terrestres (d'après Neumayr).

rement propices aux apparitions de sources thermales, aux éruptions volcaniques et aux formations de filons métallifères : ces trois phénomènes de circulations aqueuses souterraines, de déplacements rocheux à l'état de fusion et de fumerolles métallisantes émanant de ces roches, nous paraissant être connexes, en même temps qu'ils résultent tous trois de la même cause, qui est le déplacement relatif d'une portion de l'écorce au-dessus d'un magma igné. Nous verrons alors que, tandis que les plissements et leurs fractures de chevauchement sont peu favorables à des circulations d'eaux profondes, celle-ci peuvent avoir lieu suivant les décrochements perpendiculaires aux plis, suivant les failles périphériques ou radiales en rapport avec un effondrement et enfin (ce

qui rentre un peu dans le cas précédent) suivant les lignes de craquement produites, dans un massif antérieurement consolidé et jouant le rôle de butoir, par le choc d'un pli postérieur, venant s'abattre sur lui comme une vague.

Nous constaterons encore, par une conséquence des mêmes principes, que les roches éruptives, les volcans et, par suite, les catégories de sources thermales qui se rattachent à eux, ou anciennement les filons métallifères, se trouvent de préférence sur le flanc abrupt des rides terrestres, du côté où se sont réalisés les effondrements. Au contraire, d'autres sources thermales, produites par un circuit souterrain profond, mais indépendantes de toute venue éruptive, et, dès lors, en moyenne, plus faiblement minéralisées, sont, avec une abondance presque égale, sur le bord adouci.

Toutes ces conclusions relatives aux sources thermales, qui reposent sur des faits d'observation actuels et précis, ont ce grand intérêt, — sur lequel nous appelons l'attention, dès à présent, — de pouvoir être étendues, comme des hypothèses très vraisemblables, aux formations filoniennes anciennes.

Nous voudrions seulement, avant de passer à ces études de détail, ajouter encore une remarque générale, qui peut éclairer bien des phénomènes obscurs, relatifs aux filons.

On sait que les mouvements essentiels de l'écorce sont attribués à une concentration progressive (par refroidissement) du noyau interne¹, par suite de laquelle la surface extérieure, pour continuer à s'appliquer sur les couches plus profondes, est amenée à former des remplis, des rides, qui affectent un sens de propagation assez constant, avec une tendance à s'affaisser, à se renverser en avant de leur marche et à produire ainsi des phénomènes, aujourd'hui bien connus sous le nom de recouvrements.

On admet également qu'en Europe il s'est produit un certain nombre de ces rides successives, partant de parallèles de plus en plus voisins de l'équateur, pour cheminer chacune dans la direction du nord, c'est-à-dire vers la ride antérieurement consolidée, ou *Pays Antérieur* (*Vorland*), contre laquelle elles venaient se briser. Il en résulte que les phénomènes mécaniques, relatifs à chaque chaîne successive, peuvent se décomposer en trois groupes princi-

¹ On a cherché à établir, par le calcul, la loi de cette contraction (*Dawison et Darwin*, in *Lapparent*, p. 4468) et l'on a admis qu'il y avait, à partir d'un noyau interne à température invariable, des zones à tension croissante jusqu'à un maximum, puis décroissant jusqu'à une zone de tension nulle, dont la profondeur ne dépasserait pas 8 kilomètres (?).

paux : 1° plissements ; avec cassures connexes (inévitables dans le ridement de ces grandes masses inhomogènes), chevauchements, décrochements, chute pêle-mêle de blocs soulevés, s'abattant comme des châteaux de cartes, etc. ; 2° craquements et dislocations, produits entre la chaîne et son *Vorland* ; effondrements, soulèvements relatifs de massifs encadrés de failles (ou *Horsts*) ; cassures en dents de scie, par individualisation de ces vousoirs trop comprimés, etc. ; 3° effondrements et manifestations volcaniques dans la zone synclinale située en arrière de la chaîne.

Si nous nous bornons au premier groupe, c'est-à-dire aux plissements, qui constituent la formation d'une chaîne, nous constatons pratiquement, en examinant, à la surface de la terre, deux chaînes d'âges divers (telles que la chaîne calédonienne et la chaîne alpestre, par exemple), une divergence absolue d'aspect, qui ne doit pas tenir à des différences originelles dans le mode de constitution, mais aux phénomènes d'érosion, d'ablation plus ou moins prolongés, qui, en arrasant les parties hautes de la chaîne, en ont mis au jour des zones de plus en plus profondes.

On aurait, dans cette hypothèse (et sauf la restriction précédente, tenant aux craquements ultérieurs du *Vorland*), l'équivalent d'une coupe verticale (impossible à pratiquer en réalité sur une même chaîne de montagnes), en supposant par exemple : au dessous d'une chaîne tertiaire comme les Alpes, une chaîne jurassique comme celle de la Nouvelle-Zélande ; plus bas, une chaîne carbonifère comme le Plateau central et, plus bas encore, une chaîne silurienne, comme la Norvège et l'Écosse.

Étant donnée la remarque faite plus haut sur la relation des sources thermales et, plus généralement, des filons métallifères, avec les dernières dislocations de l'époque où ils se sont constitués, on est amené à penser que les filons métallifères de chaque chaîne successive ont dû se produire dans des conditions comparables, à des moments où ces chaînes, récemment plissées, présentaient le même aspect et, par exemple, que les formations métallifères de Norvège, en relation avec la chaîne calédonienne, doivent résulter surtout de circulations hydrothermales immédiatement postérieures au mouvement calédonien : circulations analogues à celles qui, aujourd'hui, donnent les sources thermales et les manifestations volcaniques dans la zone influencée par les plissements alpestres (la même remarque, que nous faisons pour les filons, étant applicable pour les roches éruptives).

Mais, depuis le moment où ces formations norvégiennes se sont constituées, des épaisseurs énormes de terrains ont été enlevées par l'érosion ; tout l'équivalent de la chaîne alpestre, avec ses saillies et ses pics, a été raboté en Norvège, pour ne laisser que son soubassement.

Par suite, si notre théorie est exacte, les formations métallifères, que nous constatons aujourd'hui en Scandinavie, doivent correspondre à un type plus profond de circulation hydrothermale métallisante que celles de la chaîne hercynienne, celles-ci elles-mêmes étant plus profondes que les filons de la chaîne alpestre : en sorte que l'on aurait une coupe théorique d'un ensemble métallifère en superposant (comme nous l'imaginions tout à l'heure pour les montagnes), le Plateau central sur la Norvège et les Alpes sur le tout.

Cela expliquerait, à notre avis, pourquoi les formations métallifères d'une même chaîne ancienne ont cet air de famille, qui n'est pas contestable et qui correspond avec un air de famille analogue dans les formations pétrographiques de pays constitués au même moment et cela ferait peut-être disparaître aussi des divergences de vue théoriques, qui existent aujourd'hui entre des observateurs, également consciencieux, de pays distincts par leur âge de plissement, comme la Norvège, la France ou l'Ouest américain.

Il est certain que, si l'on cherche à concevoir à priori comment peuvent se modifier les formations hydrothermales les plus profondes du haut en bas d'un massif plissé, on est assez naturellement amené à présumer qu'à la surface il a dû y avoir un éparpillement, un émiettement en mille petites fractures (type Atlas, Apennins, Alpes, Carpathes, etc.) ; plus bas, des cassures régulières et prolongées (types Bohême, Saxe, Plateau central) et, plus bas encore, une infiltration, une imprégnation des sédiments pénétrés, recuits sous pression, parfois recristallisés tout entiers dans le magma igné lui-même : des gîtes de ségrégation directe ou de contact immédiat ; de grands amas sulfurés ; des filons couches ; des minerais métalliques compris, non plus dans des filons hydrothermaux, mais dans de véritables filons rocheux, où ils jouent le rôle d'un élément de consolidation ordinaire (types Norvège, Canada, etc.).

On remarquera notamment, à l'appui de cette idée, que les grands filons nets et prolongés, comme il y en a tant en Bohême et dans le Plateau central, sont aussi rares en Norvège que le

sont aujourd'hui, dans ce dernier pays, les sources thermales elles-mêmes ¹.

Chaque région nous paraît avoir, suivant l'âge de ses dislocations et la profondeur jusqu'à laquelle les érosions ont affouillé ses parties disloquées, un type de gîtes métallifères, qui lui est propre et ne se retrouve que dans les régions comparables à cet égard.

Comme dernière conséquence de ces idées théoriques, nous ajouterons encore, en reprenant une observation précédente ² sous une forme un peu différente, que la profondeur, à laquelle pénètrent les circulations hydrothermales dans l'écorce terrestre, est très loin d'être illimitée ; les filons proprement dits doivent donc être, nécessairement, restreints dans le sens vertical et localisés dans une zone, qui ne dépasse probablement pas un petit nombre de kilomètres. D'où, pour les régions anciennement consolidées du globe, où l'érosion a eu le temps de s'exercer puissamment, cette conclusion théorique que les filons métallifères doivent y être aujourd'hui rares et, quand ils existent, peu continus en profondeur. Il suffit de comparer les montagnes Rocheuses au Canada, ou les Carpathes à la Scandinavie, pour voir à quel point cette hypothèse est vérifiée par les faits.

§ 2. — *Classification théorique des dislocations, susceptibles de donner naissance à des sources thermales. Leur position par rapport aux chaînes de plissement correspondantes.*

Nous emprunterons à l'ouvrage magistral de M. Suess, sur la *Face de la terre* ³, les éléments de notre classification des dislocations terrestres.

Ces dislocations étant toujours causées, dans leur principe, par la descente de compartiments de l'écorce superficielle vers le noyau contracté et par les pressions latérales qui en résultent, on

¹ On peut ajouter que les actions de métamorphisme superficiel et de remise en mouvement, sur lesquelles nous avons insisté dans de récents travaux, sont bien mieux marquées dans les régions récemment disloquées, où le niveau hydrostatique est irrégulier, complexe et souvent très distinct de la superficie, que dans la zone ancienne, où il se confond presque avec elle.

Voir plus haut, p. 33.

³ *Das Antlitz der Erde*, t. I, 3^e partie, p. 138 à 184 de la traduction française. D'une façon générale, quand nous aurons à citer cet ouvrage, nous renverrons : pour le tome I à la traduction ; pour le tome II, qui n'est pas encore traduit, au texte allemand.

peut décomposer les déplacements produits en leurs deux composantes : 1° tangentielle, ou horizontale ; 2° radiale, ou verticale.

Si l'on voulait donner aussitôt une idée de l'influence respective, attribuée à chacune de ces deux catégories de mouvements, on pourrait peut-être dire (par une première formule, trop générale pour ne pas présenter de nombreuses exceptions), que les mouvements tangentiels ont fait surgir les hautes chaînes de montagnes et provoqué les grandes altitudes du globe, tandis que les déplacements verticaux ont amené les profondes cavités des Océans.

Les déplacements horizontaux, dont le rôle est donc capital dans la formation du relief orographique terrestre, ne peuvent guère se comprendre que comme l'effet d'une compression latérale, poussant, dans un sens déterminé, une masse déjà solidifiée et inhomogène de roches et de terrains sédimentaires.

Par l'effet de cette compression, cette masse tend à se plisser, suivant un certain nombre de rides, qui se propagent peu à peu dans le sens de l'effort et qui ont, par suite, une tendance à s'infléchir, à se renverser même en avant, comme les crêtes des vagues, auxquelles on les a comparées ¹

Mais, en outre, la masse comprimée à sa base, dans la zone où s'exerce le refoulement principal, montre une propension toute naturelle à s'échapper, à se gonfler, à surgir dans le sens où elle peut s'épancher librement, c'est-à-dire à former au dehors une chaîne de montagnes, dont les dispositions extérieures peuvent offrir une complication aussi inextricable que celle d'un jeu de cartes tordu, déchiré, froissé (type alpestre), tandis qu'en profondeur, dans la portion comprimée, les terrains s'empilent par zones beaucoup plus régulièrement parallèles (type breton).

Ce mouvement horizontal est accompagné ordinairement de deux catégories de cassures :

1° Les plis successifs venant se coucher en avant et *chevaucher* les uns sur les autres, il doit se former des cassures longitudinales, des failles inverses, ou *wechsel*, séparant ces sortes de tuiles empilées, qui caractérisent la structure dite *imbriquée* ;

2° Deux portions d'un même pli, ayant un déplacement de vitesse

¹ Par suite des phénomènes signalés dans la phrase suivante, la structure des chaînes de montagne n'est pas aussi simple qu'on pourrait le supposer d'après ce premier énoncé et qu'on l'a cru parfois. Il n'y a pas dissymétrie complète entre les deux versants, mais souvent, au contraire, symétrie partielle.

inégal, il commence par se produire, entre elles, une torsion, qui, plus accentuée, aboutit à un décrochement (*blatt*) et est alors parfois minéralisée.

Dans les roches inaptes à se plisser, comme les granites, ces décrochements sont le seul indice, que l'on puisse constater, d'un déplacement horizontal.

En même temps que des portions de l'écorce subissent ainsi un mouvement horizontal, pour d'autres il y a simplement déplacement vertical et c'est alors surtout, on le conçoit, que se produisent les fractures proprement dites, propices à la formation de filons métallifères et de sources thermales.

Bien qu'on ne puisse guère concevoir la possibilité d'un grand vide venant se créer sous un voussoir¹ terrestre, il semble pourtant s'être produit parfois, dans des conditions mal définies, des descentes de quelques voussoirs semblables, plus ou moins étendus, entraînant, de proche en proche, irrégulièrement, les terrains du voisinage, tandis que le coincement de certains voussoirs effondrés peut, d'autre part, amener, entre eux, le surélévement de voussoirs intermédiaires, ou *horsts*.

La tendance théorique sera alors celle qui amènerait la production d'une fosse, entourée par des failles périphériques en marches d'escalier, disloquées à leur tour par des failles radiales.

Quelquefois (et il suffit d'examiner n'importe quel réseau de failles pour en trouver des exemples) un fragment, compris entre deux failles successives, descend trop et constitue une fosse (*graben*) ; s'il reste en l'air, c'est le cas, que nous venons de signaler, des *horsts*.

On a supposé, non sans logique, que de pareils effondrements devaient commencer par s'effectuer dans la zone, qui est le point de départ de tout le phénomène de plissement et atteignaient là leur maximum, avec fractures thermale et roches éruptives à la périphérie ; puis, que la chute même d'un semblable bloc dans une portion de l'écorce à rayon plus faible amenait, — par la nécessité de reporter au dehors un excédent de matière, impossible à introduire dans l'enveloppe trop étroite, — le déplacement latéral tangentiel, d'où naît la chaîne et que celle-ci, à son tour, venant s'écraser contre le butoir formé par le pays antérieurement consolidé, ou *vorland*, déterminait, le long de celui-ci, des effondrements,

¹ Voir, à ce sujet, p. 33.

accompagnés de cassures, de crevasses, dans le massif ancien lui-même. Pourtant, d'autres géologues préfèrent prendre, comme point de départ, le plissement qui fait surgir la chaîne et dont l'effondrement en arrière ne serait que la contre-partie.

Quand on essaie, comme l'a fait M. Suess, d'appliquer ces idées générales aux diverses chaînes de montagnes et de rechercher, pour chacune d'elles, quel a été le rôle respectif de ces divers accidents tectoniques, on trouve, ainsi qu'on devait s'y attendre pour un phénomène naturel aussi complexe, à peu près toutes les combinaisons possibles, réalisées, — suivant des circonstances locales, souvent mal déterminées, — dans l'une ou l'autre chaîne¹. Dans tel cas, qui est celui des Alpes, les plissements tertiaires est-ouest partent du sud, où se trouve une zone d'effondrement, pour venir buter, au nord, contre une chaîne plus ancienne, ou Avant-pays ; ailleurs, comme dans les montagnes Rocheuses et les Andes, les plissements nord-sud, partis de l'est, s'arrêtent à l'ouest devant l'océan Pacifique, qui représente peut-être la place d'un Avant-pays effondré. Telle chaîne plissée, rectiligne comme le Caucase ou les Andes, porte des volcans à son faite ; dans d'autres régions (Hongrie, Apennins, Antilles, etc.), les volcans sont sur le bord interne d'une chaîne courbée en arc de cercle, etc.

Une telle et si inévitable variété ne peut que mettre en garde contre des tentatives de généralisation trop prématurées. Néanmoins, dans notre cas spécial des sources thermales, le problème se trouve un peu simplifié par la considération de la loi fondamentale, énoncée au paragraphe précédent, qui nous permettra d'envisager uniquement les dislocations récentes du sol, tertiaires ou quaternaires, avec lesquelles ces sources sont, nous l'avons dit, toujours en relation et de laisser de côté tous les mouvements antérieurs. En outre, sauf dans quelques cas exceptionnels, les plissements eux-mêmes ont une influence restreinte sur les manifestations hydrothermales, qui sont, au contraire, localisées sur les fractures du sol (failles ou filons) et, de préférence, sur certaines catégories de ces fractures. C'est là le premier point qu'il s'agit de préciser.

La simple définition, que nous avons donnée plus haut des *chevauchements*, fait prévoir qu'ils ne fourniront guère d'issue aux eaux souterraines profondes, de même qu'ils ont rarement dû

¹ Voir SUSS, *Loc. cit.*, t. I, p. 819 à 822, le résumé relatif aux continents.

autrefois être transformés en filons d'incrustation, puisqu'il tend à se produire, dans ce cas, une compression entre les deux lèvres de ce genre de failles et que la fissure, peu profonde, se trouve, ordinairement, de suite, refermée ; en outre, étant parallèles aux plissements, ils ont peu de chances pour rencontrer ces grandes dénivellations orographiques, qui sont évidemment propices à la thermalisation des eaux.

Au contraire, les *décrochements* présentent une allure beaucoup plus favorable et nombre de sources des zones plissées ou des massifs anciens redisloqués se trouvent sur des fractures de cette catégorie, qui offrent souvent, en même temps, des filons d'incrustation plus anciens.

Mais c'est surtout le long des *effondrements*, que l'on observe une abondance toute spéciale d'eaux chaudes, sur les failles périphériques qui encadrent les parties du sol restées en relief, et en découpent la bordure en marches d'escalier. Les conditions sont alors toutes semblables à celles qui produisent la majorité des éruptions volcaniques et, souvent même, dans ce cas, la chaleur de l'activité éruptive vient encore favoriser l'échauffement des eaux souterraines.

Il nous semble qu'il y a lieu de distinguer ces effondrements eux-mêmes en trois catégories :

1° Ceux qui se produisent en arrière de la chaîne et qui sont généralement les plus importants, tels que la fosse méditerranéenne, la fosse adriatique, ou le bassin de Vienné, au sud des Alpes : effondrements circulaires, souvent entourés d'une ceinture de volcans, au voisinage desquels on trouve, par une connexion naturelle, de nombreuses sources chaudes, sans que les eaux qui les forment aient eu besoin d'accomplir un circuit bien profond¹ ;

2° Les effondrements rectilignes, transversaux aux plissements, et infiniment plus étendus qu'eux : par exemple, les crevasses nord-sud de l'ancien monde, telles que la fosse atlantique, la mer Egée, ou cette longue et curieuse dépression de la mer Morte et des

¹ On a supposé, parfois, qu'après l'exhaussement des chaînes plissées un tassement avait pu se produire dans toute la chaîne un moment trop surélevée, et qu'il en était résulté, à la jonction de la zone plissée et de la zone effondrée, une ou plusieurs cassures périphériques. Une cassure de ce genre a été invoquée pour expliquer les lignes de lacs marginales si caractéristiques des bords de reliefs alpestres (Alpes, Nouvelle-Zélande, etc.), avec leurs dépressions qui peuvent, dans les lacs de la Haute-Italie, descendre au-dessous du niveau de la mer.

grands lacs africains, avec accompagnement de volcans et de sources chaudes analogues à celles du cas précédent¹ ;

Enfin, 3°, les dénivellations qui se produisent en avant de la chaîne plissée, entre elle et le *Forland* et qui, là, résultant d'une compression latérale, amènent des surélèvements de certains vousoirs, ou *horsts*, et des craquements complexes : dénivellations accompagnées de toute une catégorie de sources chaudes sans aucun caractère volcanique, uniquement produites par la profondeur atteinte dans leur circuit.

Telles sont les idées que nous allons bientôt essayer de préciser par l'étude de quelques grandes régions hydrothermales, en examinant tout d'abord, avec un soin particulier, le continent européen, c'est-à-dire la partie du monde qui nous est le mieux connue et où nous avons, par suite, les données les plus précises sur ces dispositions tectoniques, si essentielles pour notre sujet, mais qui, nécessairement, en raison même de toutes les observations antérieures qu'elles exigent, sont toujours les dernières abordées et les plus négligées dans les pays neufs.

Si nous envisageons donc plus spécialement l'histoire de la consolidation du continent européen, nous rappellerons qu'on y admet la formation successive des chaînes principales suivantes, de plus en plus méridionales à mesure que le temps s'est écoulé (fig. 25) : huronienne (précambrienne) ; calédonienne (prédévonienne) ; hercynienne (prépermienne) ; alpestre (préquaternaire), l'intervalle entre chacun de ces grands mouvements pouvant être caractérisé, dans l'ensemble, par une modification capitale dans les phénomènes de la vie sur notre planète : développement des plantes après la chaîne huronienne, des poissons après la chaîne calédonienne, des vertébrés après la chaîne hercynienne, de l'homme après la chaîne alpestre.

Chacun de ces plissements successifs paraît avoir cheminé, du sud au nord, jusqu'à la chaîne précédente (située plus au nord), qu'il a redisloquée en s'y écrasant. Les fractures d'origine alpestre, qui nous intéressent spécialement ici, puisque ce sont les plus récentes, portent donc, à la fois, sur la zone alpestre elle-même et sur son Avant-pays hercynien, tandis qu'elles n'atteignent que très

¹ Sur une moindre échelle, l'Europe occidentale présente nombre de semblables effondrements Nord-Sud, transversaux sur les plis des Alpes, tels que la Limagne, le Roannais, la vallée du Rhin, etc., chacun d'eux entouré d'une ceinture de sources thermales.

exceptionnellement la masse calédonienne. Quant à la chaîne, que nous qualifions, en ce moment, d'alpestre au sens géologique du mot, elle comprend les Pyrénées, les Alpes, avec la suite de montagnes entourant la fosse méditerranéenne (Apennins, Atlas,



Fig. 23. — Carte des grandes chaînes de plissement du continent européen (d'après M. Marcel Bertrand).

Cordillère bétique), les Alpes dinariques de l'autre côté de l'effondrement adriatique, les Carpathes entourant le bassin de Vienne et, plus loin, la Crimée, le Caucase et l'Himalaya.

Elle est donc formée d'une série de chaînons sinueux, séparés

Voir plus loin, fig. 52, p. 307.

par de brusques dépressions et présentant souvent ce caractère commun que leur bord abrupt est à l'intérieur de la courbure, c'est-à-dire vers le sud, dans les Pyrénées, les Alpes et les Carpathes, tandis qu'au nord de la chaîne les pentes sont plus adoucies.

C'est souvent sur le bord adouci et en dehors de l'axe de la chaîne, que se trouvent les sources thermales en rapport avec des décrochements (versant français des Alpes et des Pyrénées, Suisse, Tyrol, etc.).

Les sources thermales, produites par des fractures d'effondrement, sont, au contraire, soit dans les dépressions situées en arrière de la chaîne (bordures de la fosse méditerranéenne ou de la fosse du bassin de Vienne), soit à la périphérie des bassins à sédiments tertiaires, creusés dans l'Avant-pays lui-même (Limagne, Bohême, etc.). C'est dans ce groupe surtout, dont la connexité avec les phénomènes volcaniques est fréquente, que l'on trouvera les sources à acide carbonique libre abondant, ce gaz semblant être, le plus souvent, un résidu d'activité interne.

En résumé, quand nous allons parcourir l'Europe du nord au sud, nous rencontrerons : d'abord, au nord, ce que M. Suess a appelé le Bouclier baltique ou scandinave¹, cette plate-forme solide comprenant la Laponie et la Finlande ; puis la chaîne calédonienne (Ecosse et Norvège), ensemble très anciennement consolidé et résistant, qui a été seulement coupé à l'ouest par les fractures atlantiques (Hébrides, Islande, terre de Jean Mayen), mais qui ne témoigne, par lui-même, d'aucune redislocation tertiaire et manque, par conséquent, de sources thermales.

La Bretagne, également exempte de fractures tertiaires, est dans le même cas et sa pauvreté hydrothermale fait un contraste frappant avec la richesse, que présente, à cet égard, tout le reste de la France.

Puis, nous étudierons les tronçons disséminés de la chaîne hercynienne redisloquée (Meseta espagnole, Plateau central, Vosges, Forêt Noire, Bohême), qui offrent de très nombreuses sources thermales, souvent carbonatées.

Les Alpes mêmes sont riches en eaux chaudes, jaillissant de leurs décrochements ; mais ces eaux ne sont fortement minéralisées que dans le cas, tout accidentel, où elles traversent des gîtes salifères ou gypseux de la zone triasique. On aura donc là des

Loc. cit., t. II, p. 58 à 81.

sources simplement thermales (*wildbäder*), ou des sources salines chaudes, dont le nombre ira en s'atténuant vers l'axe de la chaîne : celui-ci représentant, à la fois, une portion comprimée de l'écorce et une portion surélevée, donc difficile à alimenter en eaux souterraines par un circuit artésien, partant de points plus élevés.

Enfin les régions d'effondrements volcaniques méditerranéennes nous fourniront toutes les variétés des sources chaudes minéralisées par les fumerolles : sources riches en acide carbonique et souvent en silice dissoute à la faveur des carbonates alcalins ; sources sulfurées, dégageant de l'hydrogène sulfuré et de l'acide sulfureux et se rattachant aux solfatares ; sources contenant de l'arsenic, de l'acide borique ; salses, avec hydrocarbures, etc.

Quand nous aurons ainsi terminé l'étude détaillée de notre continent, nous pourrons parcourir, plus rapidement, les autres parties du monde, pour y chercher la vérification sommaire des idées résultant de ce premier examen. Nous passerons donc, tour à tour, en revue, le continent asiatique, puis le cercle éruptif du Pacifique et l'Amérique du Nord, enfin ces deux grands axes de dislocation nord-sud, qui limitent à l'est et à l'ouest notre Europe : d'un côté, l'effondrement Mer Morte-Kilmandjaro, que prolonge, presque, au nord, la chaîne hercynienne de l'Oural ; de l'autre, l'axe éruptif Atlantique, avec sa trainée de volcans : Jean Mayen, Islande, Açores, Canaries, Cap Vert, Ascension, Saint-Hélène, etc.

Dans cette dernière partie de notre travail, nous serons amené à examiner surtout les lignes de dislocations volcaniques : non pas que les volcans, simples événements sur des lignes de fractures, aient une importance tectonique comparable à leur importance apparente, mais parce qu'il y a souvent, pour les raisons énumérées plus haut, rapprochement entre les grandes régions hydrothermales et les régions volcaniques.

Ce rapprochement, nous l'avons dit, tient à ce que les volcans sont, de préférence, sur le bord de zones effondrées, où les fractures, propices à la circulation hydrothermale, existent en abondance et le volcanisme lui-même, tant par la chaleur du sol que par le dégagement des fumerolles, contribue, à la fois, à échauffer et à minéraliser les eaux.

Les dégagements d'eaux chaudes sont donc très nombreux au voisinage des volcans et jusque dans le volcan lui-même, dont ils ne produisent peut-être pas, mais dont ils caractérisent, tout au

moins, les éruptions. Ils ont alors un intérêt spécial pour nous, puisqu'ayant des chances pour être plus fortement minéralisés ils nous donnent mieux l'image de ce qui a dû se passer pour l'incrustation des filons métallifères. Mais nous avons à peine besoin de répéter, une fois de plus, pour éviter tout malentendu, qu'en insistant, comme nous nous trouverons le faire ainsi, sur les zones volcaniques, nous n'entendons nullement attribuer une origine interne aux eaux thermales et les exemples multipliés, que nous donnerons d'abord en Europe de sources chaudes, indépendantes de toute espèce de volcanisme ancien ou récent, suffiront abondamment à le prouver.

CHAPITRE II

SOURCES THERMALES DANS L'AVANT-PAYS DES ALPES : ARDENNES, EIFEL ET HARZ ; MESETA ESPAGNOLE ; PLATEAU CENTRAL ; VOSGES ET FORÊT NOIRE ; BOHÈME.

§ 1. — *Généralités. Extrême rareté des sources thermales au nord de l'Europe, dans la chaîne calédonienne (Iles Britanniques, Scandinavie et Plateau russe). Chaîne avancée de la Bretagne, de l'Ardenne, de l'Eifel et du Harz*

Si l'on veut bien se reporter aux indications rappelées plus haut sur la formation du continent européen, on voit que la masse la plus ancienne de ce continent se trouve au nord, englobant tout le nord des Iles britanniques, environ jusqu'au canal

¹ Ayant ici, pour la première fois, l'occasion de parler des sources thermales allemandes, nous en donnerons ci-dessous la bibliographie générale, avec des indications particulières sur quelques sources dont il ne sera pas question ultérieurement. Les sources décrites auront, chacune en son lieu, leur bibliographie spéciale.

1811. WEGELER (F.). *Sur l'eau minérale de Tönnestein* (Coblentz). — 1815. CH.-W. HÜSELAND. *Praktische Uebersicht der vorzüglichsten Heilquellen Deutschlands* (Berlin in-8°). — 1818. D^r RICHTER. *Deutschlands Mineralquellen* (in-8°, Berlin). — 1821. D^r KARL MOSCH. *Die Bäder und Heilbrunnen Deutschlands und der Schweiz* (in-8° Leipzig). — 1823. *Ueber Gesundbrunnen und Heilbäder* (3 parties Mayence). — 1829. LIEBIG, *Analyse d'un sel double des eaux minérales de Salzhausen* (Ann. d. M., 2^e sér., t. V, p. 111). — 1851. MARCHAND. *Analyse d'une eau minérale des environs de Halle* (Ann. d. M., 4^e sér., t. XIX, p. 256). — 1851. BROMIUS. *Analyse de l'eau minérale de Linden (Hanovre)*. (Ann. d. M., 4^e sér., t. XIX, p. 255). — 1866. FRÉSENUS. *Analyse de la source principale de Driburger, de celle de Hersten et des boues déposées par ces sources* (en allemand). (Osnabruck, Rackhort). — 1867. WOLTZIEN (C.). *Les eaux de source de Karlsruhe par Birnbaum* (en allemand). — 1869. BARBER. *Analyse chimique de la source iodurée de Roy, près Freistadt, en Silésie* (en allemand). — 1876. RIBBENTROP. *Ueber Kohlensäurehaltige Quellen bei Pelm, unweit Gerolstein* (Verhandlungen des Naturhistorischen Vereins der preussischen Rheinlands und Westfalens, 4^e série, t. III, p. 105 ; Bonn). — ROTUREAU. *Examen comparatif des principales eaux de l'Allemagne et de la France*. — 1882. BERENDT ET JENTZSCH. *Neuere Tiefbohrungen in Ost. und West Preussen, östlich der Weichsel* (pl. en couleurs).

de Bristol et à la Tamise, la Scandinavie et le Plateau russe ¹. C'est la chaîne calédonienne de M. Suess, caractérisée par l'horizontalité du carbonifère et du dévonien, c'est-à-dire par la résistance apportée aux plissements carbonifères et tertiaires. A l'ouest, cette chaîne, dont on peut suivre à distance le prolongement dans l'Amérique du Nord, est coupée par l'effondrement atlantique, avec la traînée volcanique de Jean Mayen, de l'Islande et des Hébrides (fig. 63, p. 381). A l'est, son évasement progressif est des plus remarquables. Dans toute l'Europe, cette chaîne, qui couvre pourtant de si grandes étendues de terrains, ne contient pas, on peut le dire, une seule source thermale. C'est, peut-être, la meilleure preuve que nous ayons à donner de la relation annoncée plus haut entre les sources thermales et les dislocations récentes.

Si nous commençons par les *Iles Britanniques* ², on pourra être étonné de lire ici qu'il ne s'y trouve pas de sources thermales, car nombre de stations minérales y sont très fréquentées ; mais, à l'exception des eaux de Bath, près Bristol, qui rentrent dans la zone hercynienne, influencée par le contre-coup des plis alpestres, il ne s'agit là que de sources minéralisées froides, dont la présence n'implique aucunement une circulation profonde des eaux. Nous nous contenterons de citer ces principales eaux minérales du nord au sud :

En Ecosse, *Pitkeathly* (près de Pesh), chlorurée sodique, et *Bridge of Allan* (près de Stirling) ; puis *Scarborough* (York), source sulfatée magnésienne au bord de la mer ; *Harrowgate* (à l'ouest de York), chlorurée sodique à 10° ; *Buxton* (Derby) ³, au sud-ouest de Sheffield, station célèbre aux eaux bicarbonatées calciques, en rapport possible avec une faille est-ouest traversant le calcaire carbonifère, qui paraît elle-même se rattacher à un système de filons plombés de même direction, très développé plus à l'est ; *Burton upon Trent*, entre Statford et Nottingham, aux eaux sulfatées calciques sortant d'un bassin de gypse et, un peu plus à l'est : *Ashby*, aux eaux chlorurées sodiques ; *Ilkes-*

On peut consulter la carte schématique (fig. 25), extraite d'un mémoire de M. Bertrand sur la formation du continent européen (*Bull. Soc. Géol.*, 21 mars 1887).

BIBLIOGRAPHIE DES EAUX MINÉRALES ANGLAISES. — 1844. NOAD. *Analyse de l'eau minérale de Bath (Somersetshire)* (*Ann. d. M.*, 4^e série, t. V, p. 574). — PHILLIPS (J.). *Waters of a Salt Spring in Huel Seton Mine*. — 1882. DE RANCE (C.-E.). *The Water supply of England and Wales* (London, Stanford, in-8°). — 1888. WHITAKER (W.). *List of Works referring to underground water England and Wales* (*Rep. Brit. Assoc. Adv. Sc. for.*, 1887, p. 384-414). — 1889. DALTON (W. H.). *List of Works referring to British Mineral and Thermal Waters*. (*Rep. Brit. Assoc.*, p. 859-897.)

³ Feuille 81-S.E. de la carte géologique d'Angleterre — Cf. 1840. GREENOUGH. *Geological map of England*.

ton, près Nottingham ; *Droitwich* (Worcester), source salée sur le trias ; *Leamington* (près de Warwick), chlorurée sodique ; *Malvern* (Worcester), sulfatée sodique ; *Cheltenham* (Glocester), chlorurée sodique ; *Timbridge Wells*, au sud de Londres, eaux ferrugineuses ; *Brighton* (Sussex), chlorurée sodique et enfin *Bath*¹, près de Bristol, sulfatée calcique et sodique à 47°, à proximité immédiate d'une zone de Keuper, qui recouvre le terrain houiller, exploité plus à l'ouest.

Il suffit de se reporter à une carte géologique d'Angleterre pour constater que la plupart de ces sources suivent la bande de trias, qui traverse l'Angleterre en écharpe, du nord au sud, entre Newcastle et Exeter².

Nous n'avons, en définitive, à retenir, comme source réellement thermale, que l'importante station de *Bath*, connue depuis l'époque romaine et dont la grande réputation remonte au XVIII^e siècle.

Cette source, dont la composition s'explique, comme nous venons de le dire, par le voisinage du Keuper, est dans le sud de l'Angleterre, dans une zone très nettement influencée par le prolongement des plissements houillers du Bourbonnais et de l'Artois, qui ont eu, on le sait, une répercussion dans les terrains tertiaires superposés³.

L'absence de sources thermales est encore plus complète, croyons-nous, en *Scandinavie*, en *Finlande* et dans le *Plateau russe*⁴.

A la limite de ce dernier, la chaîne de l'Oural, qui est d'âge hercynien, fait elle-même, par sa pauvreté hydrothermale, un contraste remarquable avec la chaîne tertiaire du Caucase, dont nous parlerons plus loin⁵.

¹ Feuille 49 de la carte géologique détaillée d'Angleterre.

² Voir une carte dans nos *Gîtes minéraux*, I, 488.

³ Voir, à ce sujet, un mémoire de M. MARCEL BERTRAND (*Ann. des Mines*, 1892) et notre note sur les *terrains houillers du Boulonnais* (*Nouvelles géographiques*, avril 1893). On considère que la traînée houillère du pays de Galles Saint-Brides Bay, Swansea, etc.) forme la limite des deux zones, l'une à plis sud-sud-ouest prédevoniens, l'autre à plis est-ouest hercyniens. — Cf. GOSSELET (*C. R.*, sept. 1898).

Sur la source de Bath, voir : BATTEN (E.-C.). *Cause of the Heat of the Bath Waters*.

⁴ En Suède, on cite seulement la source ferrugineuse à 9° de *Porla* (Oerebro), où Berzélius a découvert en 1832 l'acide crénique ; en Finlande, celle d'*Uleaborg*. — Voir : 1834. BERZÉLIUS. *Eau de Porla* (*Ann. d. Mines*, 3^e série, t. V, p. 538).

⁵ Nous donnons, ci-dessous, la bibliographie relative à quelques sources minérales russes, en dehors de la région caucasique, qui sera déerite ultérieurement. Il ne s'agit généralement que de sources salines froides et superficielles.

1844. CAPITAINE CHOUBINE. *Analyse de l'eau minérale de Serquinsk* (*Ann. d. M.*, 4^e sér., t. V, p. 574). — 1860. GUILLEMIN. *Sur la nature des eaux de la Russie d'Europe* (B. S. G. F., 2^e série, t. XVII, p. 232). — 1896. SOLOTNITZKI (W.). *Unsere nordis-*

Si nous passons maintenant à la zone hercynienne de l'Europe occidentale, nous trouvons, d'abord, au nord, une première chaîne avancée, comprenant le Cornwall, la Bretagne, l'Ardenne, l'Eifel et le Harz. Étant la plus éloignée des Alpes, cette zone, bien que légèrement atteinte par les plis alpestres, n'a néanmoins subi que de faibles dislocations et, par suite, les sources thermales y sont, comme nous allons le voir, très rares, tant qu'on n'approche pas des régions d'effondrement volcanique N.S., qui marquent la vallée du Rhin.

La *Bretagne française*, prolongement naturel du *Cornwall*, la *Vendée*, l'*Anjou*, le *Maine* présentent un manque absolu de sources thermales, qui étonne, au premier abord, par la comparaison avec les autres régions françaises, en général si richement dotées à cet égard. Tout au plus trouve-t-on à signaler, dans cette région, quelques sources froides ferrugineuses, tout à fait accidentelles, à *Dinan*, *Saint-Servan*, *Pontivy*, aux environs d'*Angers*, vers *Chalonnes*, etc.¹

En *Normandie*, il n'y a également, dans la plaine, que des eaux froides, ferrugineuses, dont la plus connue est celle de *Forges*

chen Heilwasser (Nowosti i Birsheweja Gaseta, 1896, n° 202). — 1896. SESEFF, *Die Kurskischen eisen-alkalihaltigen Wasser*, Kursk, 1896. — 1896. TROPIN. *Die amenschen Mineralwasser* (Priansursk Wedomosti, 1896, n° 112, p. 18-20). — 1896. TROPIN. *Die Schwefelsalzwasser von Nishue-Sterginsk* (Stibirsk Weshnk, 1896, n° 84). — 1896. TROPIN. *Die Mineralwasser von Slawjansk* (Warsch. Gouv. Zeitung, 1896, n° 34 et 35). — 1896. NIKITIN (S.) et NALINKIN (B.). *Source minérale ferrugineuse de Balowo* (Gouv. de Saint-Petersbourg) (Bull. du Comité géol. de Saint-Petersbourg, t. XIV, n° 6-7, p. 259-268). — 1896. RABINOWITSCH. *Chemische Analyse des Wassers im Alkalizalzsee von Goloprstanj* (J. de la S. phys. chim. russe, 1896, t. XXVIII liv. II, p. 221, liv. IV, p. 365-371). — 1896. SENETZ (M.). *Therapeutisch, und Sanitare Bedeutung der Ortschaft Druskeniki im Gow. Grodno* (Eisen und Chlorcalciumhaltige Salzwasser) (Bull. de l'Université de Varsovie, 1896, liv. IV, p. 1-50, avec un plan des sources minérales). — 1897. Z... *Wegweiser durch die Druskenikischen Mineralwasser* (Grodno), 1897. (Ausgabe der Verwaltung der Druskenikischen Mineralwasser, Wilna, 1897, 32° p. 60). — 1897. KASCHKADOMOFF. *Ein neuer Kurort in Russland* (Gouv. Kursk). Vortrag. der V Section der R. Gesellschaft z. Forderung der Volksgesundheit (Kursker Gouv. Zeitung, n° 93-94. Tschernigowsche Gouv. Zeitung, n° 1127. — 1897. MRATSCHNY (A.). *Slawjansk und Seine Mineralwasser*. XII et XIII Lettte (Charkowsche Gouv. Zeitung, 1897, n° 176 und 190). — 1897. KOSJURIN (S.). *Slawjansk und seine Heilkräfte* (J. de la Soc. russe d'hygiène publique, 1897, n° 6-7, p. 337-402 et 402-410). — 1897. MENDELSON (A.). *Poljustrowo, als Kurort und Seine Heilkräfte* (J. de la Soc. russe d'hygiène publique, 1897, n° 5, p. 284-304). — 1897. Z. *Die Mineralwasser des Gouv. Archangelsk* (Archangelsk'sche Gouv. Zeitung, 1897, n° 45).

¹ On sait que le plissement breton, esquissé après le cambrien, s'est surtout accentué après le carboniférien. Bien que la mer pliocène paraisse avoir passé sur la Bretagne, les traces de dislocations tertiaires y sont peu sensibles.

M. Lechatelier (*Ann. d. Min.*, t. XX, 3^e série, 1842) a fait des études sur les eaux ferrugineuses de l'Anjou, dont le fer paraît provenir de l'oxydation de pyrites.

(à 7°); mais, dans la partie accidentée de l'Orne, la source de *Bagnoles*¹ faiblement minéralisée en sels sodiques, est à 27°.

Le *Bassin de Paris*, qui interrompt la chaîne hercynienne entre la Bretagne et l'Ardenne, porte, on le sait, la trace d'un léger plissement tertiaire; mais, nulle part, celui-ci n'a atteint assez d'intensité pour produire des factures hydrothermales et l'on ne trouve à y signaler que des eaux séléniteuses, ou sulfurées calciques accidentelles, en relation avec le tertiaire gypseux, telles que celles de *Enghien*, *Batignolles*, etc.²

Aux approches de l'Ardenne, on a, dans le département du Nord, les eaux à 23° de *Saint-Amand*³ un peu au nord de la grande traînée houillère du Pas-de-Calais. Ces eaux proviennent d'une assise de schistes pyriteux, située dans la carbonifère.

Puis, en Belgique, il faut gagner, dans l'est des Ardennes, la région de Liège et d'Aix-la-Chapelle, où se trouvent les eaux de *Chauffontaine* (à température de 40° et faible minéralisation), celles de *Spa*⁴

¹ Bagnoles est entre Alençon et Domfront (*feuille d'Alençon*, par M. Lecornu), sur les grès à bilobites St. formant le flanc sud d'un synclinal, qui bute au sud contre le granite. Vers le nord-est, au nord d'Argentan, le ridement de l'axe du Merlerault s'est accentué entre l'oolithe miliaire et les couches de Ranville et s'est encore prolongé dans la suite. (1888 LECORNU. *Soc. linnéenne de Normandie*, 4^e série, t. II.) Près de Saint-Rémy, on sait qu'il existe un petit dépôt crétacé recouvert de silurien. — Cf. 1838. MORIN et GIRARDIN. *Analyse des eaux minérales de Forges (Seine-Inférieure)* — (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIII, p. 621). — 1840. QUEVENNE. *Analyse des eaux minérales d'Antoville (Calvados)* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XVII, p. 579).

² 1822. VAUQUELIN. *Analyse des eaux de Baigneur, près Paris* (Ann. d. M. 1^{re} sér., t. VII, p. 199). — 1824. HENRY FILS. *Analyse de l'eau minérale d'Enghien, près Montmorency* (Ann. d. M. 1^{re} sér., t. IX, p. 366). — 1833. HENRY FILS. *Recherches analytiques sur les eaux minérales de Passy* (Ann. d. M., 3^e sér., t. III, p. 488). — 1840. MICHELIN. *Sur une source des environs de Sens* (B. S. G. F., 1^{re} sér., t. XI, p. 221). — 1861. MAJOT. *Notice sur les eaux minérales ferro-crénatées de Fontaine-Bonneleau (Oise)* (in-8°, 26 p. Paris, Baudouin). — 1880. SAUVAGE. *Note sur les sources d'eaux minérales de Seine-et-Oise, Seine-et-Marne et Loiret* (Ann. d. M., 7^e sér., t. XVIII, p. 102). — 1888. STAN. MEUNIER. *Source sulfurée découverte dans l'île Saint-Louis* (*Le Naturaliste*, 10^e année).

— 1843. P. BERTHIER. *Analyse d'une eau minérale du département du Nord* (Ann. d. M., 4^e sér., t. III, p. 726). — 1861. CHARPENTIER. *Notice sur les eaux et les boues thermo-minérales sulfureuses de Saint-Amand (Nord)* (in-8°, 16 p. Paris, Masson). — 1873-74. GOSSELET. *Présentation des recherches géologiques et chimiques de M. Lally sur les eaux sulfureuses du Nord et sur les eaux chlorurées du terrain houiller* (B. S. G. F., 3^e sér., t. II, p. 50). — 1887. GOSSELET. *Leçons sur les nappes aquifères du nord de la France* (B. S. G. de Lille). — Voir, pour Saint-Amand, la feuille au 1/80 000^e de Douai.

⁴ *Chauffontaine* est à 8 kilomètres de Liège; *Spa* à 23 kilomètres sud-est de la même ville. — De Liège à Aix-la-Chapelle, la distance directe est de 40 kilomètres. — Voir, pour cette région, outre les cartes de détail, l'Ardenne de M. Gosselet, la feuille au 1/500 000^e de Mézières, et la carte géologique générale de l'Europe au 1/500 000^e. Comme bibliographie des eaux minérales belges, consulter, outre le Bulletin de la Soc. hydrolog. belge, les ouvrages suivants :

1875. BODY (A.). *Bibliographie spadoise et des eaux minérales du pays de Liège*

(ferrugineuses, froides, très gazeuses), enfin celles d'*Aix-la-Chapelle*, chlorurées et sulfurées sodiques à 55°¹.

On est là sur la bordure nord d'une région très anciennement plissée, d'abord à l'époque silurienne, puis entre le carbonifère et le trias (lors du ridement du Hainaut), qui, à la fin de l'éocène, a subi, une fois de plus, un mouvement de dislocation, connu sous le nom de ridement de l'Artois.

On sait que les formations métallifères de zinc et de plomb y sont nombreuses². Entre Liège, Moresnet, Aix-la-Chapelle et Duren, en Belgique et dans la Prusse rhénane, elles semblent affecter souvent les décrochements perpendiculaires aux plis anciens du Hainaut et leur remplissage n'est peut-être pas sans rapport avec les remarquables imprégnations plombifères, qu'on trouve, non loin de là, dans le grès bigarré, à Commern, Mechernich, Call et, beaucoup plus au sud, à Saint-Avold, etc.

L'existence de grands effondrements dans la vallée du Rhin, autour de Cologne et surtout celle des volcans de l'Eifel, un peu plus au sud, prouvent suffisamment que les mouvements tertiaires se sont fait sentir jusque là et les sources chaudes, dont nous venons de parler, — localisées, on le remarquera, comme celles de Bath et de Saint-Amand, sur le flanc nord de cette même chaîne, — en sont peut-être la conséquence.

Arrivée au Rhin, vers Cologne³, cette première ride septentrionale de la chaîne hercynienne, que nous suivons en ce moment,

(1 vol. in-8°, 334 p., Bruxelles). — 1887. DEWALQUE. *Un nouveau dosage du fer dans les eaux minérales de Spa* (2 p.). — 1888. VAN DEN BROEK (E.). *Les eaux minérales de Spa* (Bull. Soc. belge de géologie, p. 235-260). — 1888. POSKIN (D. A.). *Les sources minérales de la Belgique* (Bull. Soc. belge de géologie, t. II. Mémoires, p. 348-382). — 1890. FÉLIX (Jules). *Des eaux thermales de Chaudfontaine* (Bull. Soc. belge de géologie, t. IV. Mémoires, p. 243-257, avec bibliographie). — 1892. FIRKET (Ad.). *L'eau minérale et le captage de Harre*. In-8°, 39 p. 1 pl. Liège (Extr. Ann. Soc. géol. de Belgique).

A Mondorf (Luxembourg) [WELFER. *Tempér. du sondage de Mondorf*, CR. 1845, XXI, 887 — un sondage à 671^m,2 a donné, au fond, de Feau à 34°, contre 11°5 à la superficie, soit 1° pour 29^m,6 (voir, plus haut, p. 155). — Cf. 1849. DE KIRCKHOFF. *Analyse de l'eau minérale de Mondorf, près Luxembourg* (Ann. d. M., 4^e sér., t. XV, p. 37).

¹ 1862. L. WETZLAR. *Ueber die Heilwirkungen der Aachener Schwefelthermen*. — 1875. BEISSEL ET KRIBBEN. *Aachen : seine geol. Verhältnisse und Thermalquellen* (Aix-la-Chapelle, 6 cartes et plan).

² Les gisements de Welkenroedt, Eupen, Lontzen, Walthorn, Moresnet, Busbach et Stolberg sont concentrés dans une région assez restreinte.

³ Voir plus loin, figure 26, p. 238. Pour toutes les descriptions géologiques relatives à des sources d'Allemagne, on peut se reporter à la carte au 1/500 000°, en 27 feuilles, de l'empire allemand par Richard Lepsius (1892). Voir également la carte géologique de l'Europe au 1/500 000° (feuille 24).

subit une brusque coupure; puis la trainée houillère de Dortmund reprend la suite de celle d'Anzin et de Charleroi et va disparaître sous le trias, à la hauteur de Paderborn.

Les sources thermales font défaut dans toute cette zone et c'est seulement en relation avec le trias que nous trouvons deux sources salines : l'une à 31°. chlorurée-sodique, celle de *Rémé*; l'autre sulfatée calcique froide, celle de *Lippspringe*, à l'est de Paderborn¹

Enfin, plus à l'est encore, il est à remarquer que ce grand massif du *Harz*, l'antique forêt hercynienne, le berceau de l'art des mines en Allemagne, dont les fractures minéralisées et les décrochements carbonifères sont si remarquables, ne présente pas une source thermale.

Quand on passe, au contraire, au sud de la trainée houillère précédemment suivie et qu'on aborde le pays montagneux de l'Eifel, du Westerwald et du Sauerland, puis du Taunus, on voit, avec les manifestations volcaniques, apparaître les sources à acide carbonique, tantôt froides, tantôt chaudes (fig. 26).

Le *Taunus* et le *Westerwald* dégagent, en effet, comme l'Auvergne, de grandes quantités d'acide carbonique, tantôt dans les sources, tantôt même à sec.

C'est la fameuse source gazeuse froide d'*Apollinaris*, sur la rive gauche du Rhin, entre Bonn et Coblenz; c'est le groupe des sources carbonatées du *Laacher-See*, près d'Andernach; c'est, à l'est de Coblenz, les eaux d'*Ems*², eaux bicarbonatées sodiques à 46°, dont nous avons indiqué plus haut³ les particularités de gisement; puis, vers l'est, au nord du Kellerwald, *Pyrmont* et *Wildungen* (Waldeck), sources gazeuses froides, utilisées comme ferrugineuses.

Au sud de l'*Hundsruck* et du *Taunus*, la réapparition des terrains permians a, comme contrecoup habituel, l'existence de sources salines, en relations avec les gisements de sel de ce terrain, telles que *Kreuznach*, à l'ouest du Rhin; mais, en même temps, on reste au voisinage des manifestations basaltiques du *Taunus* et du *Vogelsberg* et sur une ligne de dislocation tertiaire, nettement marquée, qui coupe le *Taunus* au sud de *Bingen*, vers *Frankfort*. On a

¹ 1891. SCHLÜTER. *Ueber die Temperature einiger Quellen Paderborns* (Verh. des nat. Ver. der preuss. Rheinlande, etc., 48^e année, Bonn).

LUDWIG (R.). *Die warmen Mineralquellen zu Bad Ems*. — 1839. BECQUEREL. *Des eaux d'Ems* (in-8°, 43 p. Paris, Germer-Baillière).

³ Page 51, fig. 2.

⁴ 1826. BERTHIER. *Analyse de l'eau de Creutznach, près Bingen (Grand-Duché du Rhin)* (Ann. d. M., 1^{re} série, t. XIII, p. 221). — 1826. MANÈS. *Eau de Creutznach* (Ann. d. M., t. XIII, p. 222).

donc toutes les raisons pour avoir, en même temps que des sources salines, des sources chaudes et des sources carbonatées.

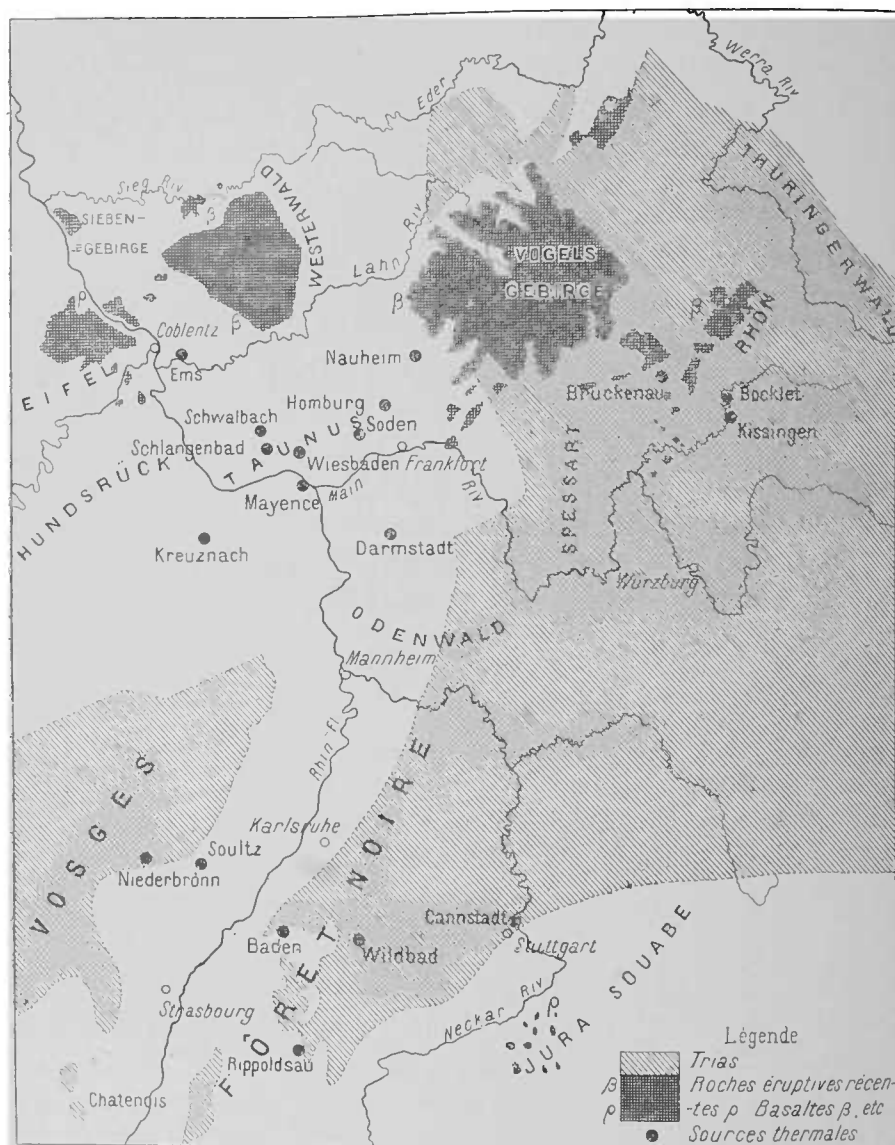


Fig. 26. — Carte théorique des sources thermo-minérales de la région rhénane, montrant leurs relations, soit avec le trias, soit avec les roches éruptives récentes.

Echelle au $\frac{1}{2.520.000}$.

C'est, sur le bord de l'effondrement tertiaire, près de Mayence, la source saline chaude à 69° de Wiesbaden¹. A l'ouest de là, dans le Taunus, Schwal-

¹ 1828. CADET GASSICOURT. *Sur les eaux minérales de Wiesbaden* (Ann. d. M., 2^e sér., t. III, p. 199). — KASTNER. *Wiesbaden Heilquellen*.

bach et *Schlangenbad* sont des sources carbonatées, la première froide et ferrugineuse, la seconde chaude et alcaline; *Weilbach*, près de Flörsheim, est encore une source carbonatée, légèrement sulfureuse. *Seltz*, *Geibnau* et *Fachingen*, à moitié chemin entre Mayence et Frankfort, sont des eaux carbonatées. Puis, au nord-ouest de Frankfort, *Soden*¹ est une source chlorurée sodique froide, en relation avec le permien; enfin, en remontant vers le nord de Frankfort, vers Giessen dans la Hesse, le long d'une dépression tertiaire entre le dévonien du Tannus et les basaltes du Vogelsberg, on trouve, toujours au voisinage du permien et des basaltes: *Hombourg*², source chlorurée sodique froide, et *Schwalheim*³, source froide carbonatée, près de Nauheim.

A *Nauheim* (Hesse Cassel) les eaux salées, chargées d'acide carbonique, remontent, dans des conditions curieuses, en plein terrain dévonien, au contact des schistes à orthocères *Sch.* du calcaire à stringocéphales *C.* Après avoir exploité, d'abord, des suintements naturels, qui s'éparpillaient à la surface dans le tertiaire, on a, vers 1816, fait un sondage de 159 m., qui a rencontré les sources jaillissantes à 39°, actuellement utilisées (fig. 27).

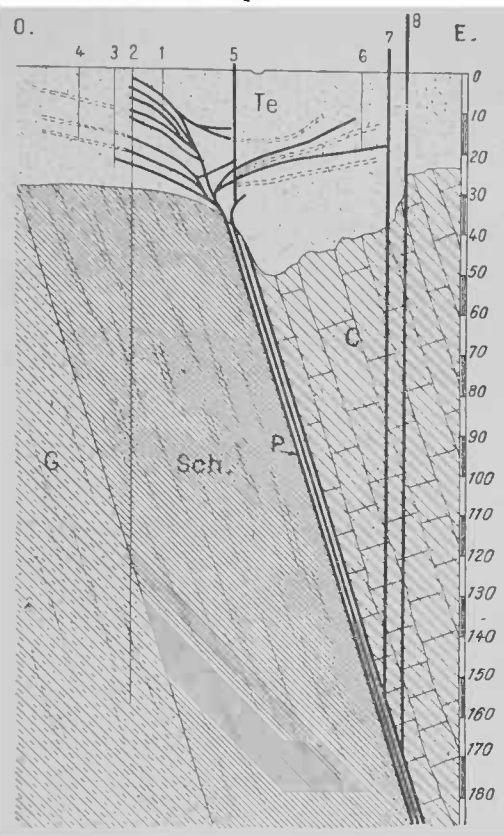


Fig. 27. — Coupe trans-versale à travers les *Sprudels* salés de Nauheim (d'après M. Ludwig).

G., grès à spirifères. — *Sch.*, schistes à orthocères. — *P.*, conglomérat traversé par l'eau salifère. — *C.*, calcaire à stringocéphales. — *Te.*, terrain tertiaire, déposé irrégulièrement sur les inégalités des couches dévoniennes. Les traits forts expriment les eaux salées jaillissantes: soit au contact des schistes et des calcaires; soit en ramifications dans les terrains tertiaires superposés, soit enfin suivant les forages. Le jaillissement le plus élevé au-dessus du sol est la source Friedrichwilhelm.

¹ 1840. LIEBIG. *Composition des eaux minérales n° XIX à Soden* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XVII, p. 394). — 1858. Dr F. GROSMAÏN. *Soden am Tannus* (Mayence, de Zabern). — 1876. VON DECHEN. *Ueber die Thermalquellen zu Bad-Öggenhausen* (Verh. des Nat. Ver. der preuss. Rheinl., 4^e sér., t. III, p. 87). — 1877. VON DECHEN. *Ueber die Kohlensäure Quelle im Kyllthale zwischen Pelm und Bewingen* (Verh. des Nat. Ver. der preuss. Rheinl. und Westf., 4^e sér., t. IV, p. 207; Bonn.).

² 1826. BERTHIER. *Analyse de l'eau minérale de Hombourg, près Francfort-sur-le-Mein* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. XIII, p. 221).

³ 1840. LIEBIG. *Analyse chimique des eaux minérales de Schwalheim, près Friedberg* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XVII, p. 393).

1855. LUDWIG. *Section Friedberg geologisch bearbeitet*. — 1887. DAUBRÉE. *Eaux*

Vers l'est, la région change de caractère : on est dans cette zone d'affaissement, occupée par des terrains triasiques et jurassiques, entre le Thuringerwald à l'est, l'Odenwald et la Forêt Noire à l'Ouest, enfin au sud, la faille du Danube, que M. Suess a longuement étudiée. Ainsi que ce géologue l'a fait remarquer, « sur tout le pourtour du bassin, les compartiments de terrains mésozoïques se détachent des massifs anciens, le long de failles plus ou moins parallèles au bord de ces massifs et coupées fréquemment à angle droit par des failles transversales ».

Néanmoins, on ne trouve pas de sources thermales, mais seulement des sources salines froides, alimentées par les gîtes du trias, ou des sources carbonatées, suffisamment expliquées par le voisinage des manifestations basaltiques.

Au nord de cette région et sur le flanc sud du massif basaltique du Rhön, les sources carbonatées froides de *Bocklet* et de *Bruckenau*, en Bavière (fig. 26), se trouvent non loin de *Kissingen* (Basse-Franconie), où l'on utilise des sources chlorurées sodiques et chargées d'acide carbonique, provenant d'un sondage qui a recoupé la nappe d'eau minérale à 490 m., un peu au dessus du zechstein et qui, poussé plus bas, a traversé ensuite le zechstein (platten dolomit), puis le sel gemme à 507 m. et enfin l'anhydrite¹.

Un peu plus à l'est encore et dans le prolongement de la même région triasique, percée de basaltes, qui s'adosse au flanc sud-ouest du Thuringerwald et du Frankenwald, on a, dans le duché de Saxe-Meiningen², les eaux carbonatées et ferrugineuses froides de *Liebenstein* et les eaux salines froides de *Friedrichshall*³, près Cobourg, riches en sulfates de soude et de magnésie. Leur présence s'explique, tout naturellement, comme dans les cas précédents, par le voisinage des basaltes, donnant l'acide carbonique et par la présence de la zone permo-triasique, fournissant les sels solubles.

Nous allons maintenant abandonner ces régions allemandes (que nous retrouverons bientôt), pour suivre, dans un autre paragraphe,

souterraines I, 375. D'après Daubrée, auquel nous empruntons ce renseignement, dans la vallée de l'Alte, au pied de la montagne basaltique de *Neuenahr* en Prusse rhénane, d'anciens dégagements d'acide carbonique ont également donné (en 1860) l'idée de faire un sondage, qui, à 90 mètres, a rencontré une nappe d'eau acidulée jaillissante. — 1862. NOEGGERATH. *Jahrbuch für Mineralogie* (in Daubrée, I, 377).

1840. FORBES. *Source salée intermittente de Kissingen* (Ann. d. Mines, 3^e série, t. XVIII, p. 590). — 1870. SANDBERGER (*Jahrbuch für Mineralogie*, t. XXXVIII, p. 642). — 1884. D. BAYERLEIN. *Bad Kissingen* (in Daubrée, *Eaux. sout.*, I, 377). — Voir encore SOTIER, *Bad Kissingen*; GÜMBEL, *Geol. Rundschau von Kissingen*.

² H. BÜCKING. *Gebirgsstörungen südwestlich vom Thuringerwalde* (Jahrb. d. k. preuss. geol. Landesamt und Bergak. zu Berlin für 1880). — W. FRANTZEN, *die Störungen in der Umgebung des grossen Dollmars bei Meiningen* (ibid.) et SUSS. *Loc. cit.*, I, p. 250, avec bibliog. dans la note I, p. 250.

³ CREUSBERG. *Analyse des eaux salées de Friedrichshall* (Ann. d. M., 4^e sér., t. V, p. 576).

la masse principale de la chaîne hercynienne, avec ses grands massifs démantelés, qui constituent aujourd'hui la Meseta Espagnole, le Plateau Central et le Morvan, les Vosges, la Forêt-Noire, enfin la Bohême et les Sudètes. C'est là, au nord des Alpes, la région essentielle pour les sources thermales : celle où ces sources se trouvent sur les dislocations produites dans l'Avant-pays hercynien, par le choc des vagues alpestres. Nous examinerons ensuite les chaînes alpestres elles-mêmes, avec leurs rameaux détachés, Pyrénées, Apennins, Carpathes, etc., et nous terminerons enfin ce qui est relatif à l'Europe par les zones de grands effondrements, entourés de volcans, qui constituent ce qu'on pourrait appeler l'Arrière-pays de la chaîne alpestre, et où les mouvements constants du sol, tremblements de terre, éruptions, déplacements de rivages contemporains, etc., préparent peut-être ce qui sera, dans les temps géologiques futurs, la prochaine chaîne de montagne, devant surgir, au sud des Alpes, sur l'emplacement actuel de la Méditerranée.

§ 2. — *Espagne et Portugal. La Meseta et la Cordillère bétique*¹

En laissant de côté la région pyrénéenne, qui fera ultérieurement l'objet d'une étude séparée, la péninsule ibérique est géologi-

Voir, pour la géologie de l'Espagne et du Portugal, les quatre feuilles correspondantes de la carte d'Europe au 1:150 000^e, la carte plus ancienne au 1:2 000 000^e par de Botella y de Hornos (1879) et les feuilles de la carte au 1:500 000^e.

Cf. SUSS. *Das Antlitz der Erde*, t. I (traduction), p. 295 à 301, sur la Cordillère bétique), et t. II (en allemand), p. 144 à 151, sur la Meseta. — SALVADOR CALDERON Y ARANA. *Ensayo orogenico sobre la Meseta Central de España* (Ann. Soc. Esp. de Hist. Nat., XIV, 1883, p. 131-172). — MAC PHERSON. *Breve noticia acerca de la especial estructura de la Pen. Iberica* (Ann. de la Soc. Esp. de Hist. Nat., VIII, 1879, p. 1-26).

Voir, plus spécialement, sur les eaux thermales d'Espagne et de Portugal, en outre des indications bibliographiques données plus loin pour quelques sources spéciales :

1810. D^r FRANCISCO TAVARES. *Instruções sobre a natureza das aguas mineraes de Portugal* (Coimbra). — 1851. D^r JOSÉ PEREZ DE LA FLOR et MANUEL GONZALES DE JONTE. *Novissima manua de hydrologia medica espanola* (1 vol. in-16, Madrid). — 1853. D. PEDRO MARIA RUBIO. *Tratado completo de las fuentes minerales de España* (1 vol. in-8^o, Madrid). — 1867. D^r LOURENÇO. *Renseignements sur les eaux minérales portugaises* (Paris, Expos. Univ.). — 1870. *Anuario de la Hidrologia medica española*. — 1878. *Anuario oficial de las Aguas Minerales de España* (Madrid), avec bibliographie dans les notes, p. 31, 35, 41. — 1892. BUREAU DES MINES DU PORTUGAL. *Bibl. manus. des eaux minérales du Portugal*. — 1892. DE BOTELLA Y DE HORNOS. *Monografía de las Aguas Minerales y termales de España* (Publication du Ministerio de Fomento, avec carte générale des sources thermales espagnoles et nombreuses analyses chimiques). — 1893. CHOFFAT. *Coup d'œil sur les eaux thermales des régions mésozoïques du Portugal* [B. S. G., t. XXI, p. 44 à 64, et publication officielle du Ministère des Travaux Publics à Lisbonne].

quement divisée en trois principales parties bien distinctes et presque indépendantes : le grand plateau ancien de la Meseta, dans l'ouest et le nord-ouest, comprenant la Galice, les Asturies, Léon, l'Estramadure et les provinces portugaises de Traz oz Montes, Beira, l'Alemtejo ; à l'est, les terrains tertiaires du bassin de l'Ebre et la Cordillère bétique, longeant le littoral méditerranéen (Valence, Murcie, Grenade) ; enfin, dans l'ouest, un triangle tertiaire, avec manifestations éruptives, autour de Lisbonne.

Tandis que la Meseta fait partie de l'Avant-pays alpestre, la Cordillère bétique est une chaîne de plissement reliée aux Alpes, qui est venue précisément s'écraser sur cet Avant-pays, en le disloquant, et la zone des environs de Lisbonne se rattache aux effondrements, qui ont déterminé la formation de la fosse atlantique. Nous devrions donc, pour suivre absolument notre plan primitif, éparpiller leur description entre trois chapitres successifs ; néanmoins, pour la facilité de la description, nous allons réunir ici tout ce qui se rattache à la péninsule ibérique.

Quand on examine une carte générale des sources thermo-minérales espagnoles, telle que celle de M. Botella, et surtout quand on a le soin de la rendre plus claire en distinguant par un signe les sources carbonatées, ainsi que nous avons essayé de le faire dans le croquis de la figure 28, on voit aussitôt apparaître quelques lois générales, qui établissent, une fois de plus, la relation, admise par nous comme une notion fondamentale, entre la nature des sources thermales et les terrains géologiques de la région avoisinante, qu'a pu parcourir le trajet souterrain des eaux.

Tout d'abord, la répartition des eaux thermales dessine, comme dans tous les pays, un certain nombre de zones, qui correspondent aux parties du sol le plus fortement disloquées ou effondrées et qui, ici, d'une façon générale, enveloppent (sauf dans le S.-O., entre Lisbonne et Gibraltar) les contours polygonaux, si nettement accusés, de la péninsule.

Une première de ces zones, que nous laissons de côté en ce moment, est formée par les Pyrénées, et leur prolongement vers les Asturies, avec une abondance toute spéciale de sources aux deux points de moindre pression de cette chaîne, c'est-à-dire là où elles vont rencontrer, d'une part la Méditerranée, de l'autre l'Atlantique.

Le Guipuzcoa, la Biscaye et le nord de la Navarre sont remarquablement chargés de sources chaudes.

Vers l'ouest, les lignes de fractures pyrénéennes se poursuivent,

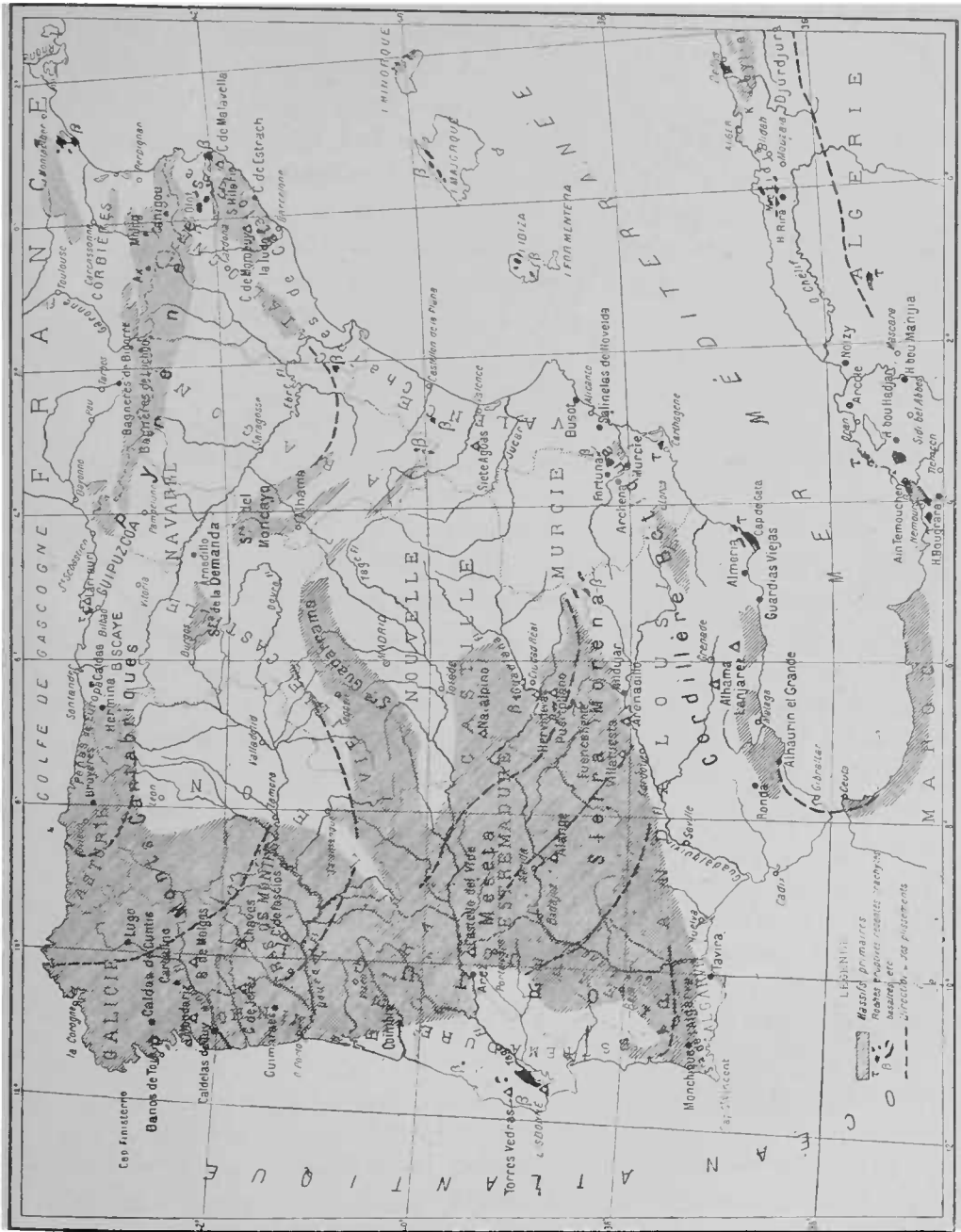


Fig. 28. — Carte des sources thermo-minérales d'Espagne et d'Algérie, montrant leurs relations avec la géologie. Echelle 1 millimètre pour 9,35 kilomètres. Les points noirs représentent les sources thermales; les points triangulaires des sources carbonatées.

au nord des monts Cantabriques, jusqu'à Oviedo, avec quelques sources thermales.

Puis, de la Corogne à Lisbonne, toute la région ouest de l'Es-

pagne a subi des fractures connexes de l'effondrement atlantique, et les sources s'y multiplient

Enfin, un groupe, particulièrement riche, de sources thermales est celui de la Cordillère bétique, dans la zone parallèle à la Méditerranée, qui s'étend de Cadix vers Barcelone.

Au point de vue de la composition chimique, on peut remarquer que presque toutes les sources salines ou sulfatées calciques, à teneur un peu notable, sont en relation avec les gîtes de sel du trias, ou, plus rarement, de l'éocène (Asturies, bassin de l'Ebre; région de Barcelone, de Cordoue et d'Almeria). Dans deux ou trois cas, pour des sources côtières situées sur des lignes d'effondrement (environs de Lisbonne, Baños de la Toja, etc.), il peut y avoir pénétration de l'eau de mer.

Enfin, dans les massifs granitiques de la Galice, il existe le type, bien connu dans le Plateau Central, des eaux chaudes, très faiblement minéralisées, ayant pris un peu de chlorure de sodium aux roches cristallines.

Les sources à acide carbonique libre (distinguées sur la figure 28 par un signe spécial) sont relativement peu nombreuses et, pour la plupart, en relation bien nette avec des manifestations éruptives récentes, et notamment des basaltes : ainsi, entre Cordoue et Ciudad Real, entre Gérone et Barcelone, ou à Baños de la Toja, dans une île de Galice, sur le bord de l'effondrement atlantique.

Il n'y a guère d'exception à faire que pour un groupe de sources situées en Galice, entre Pontevedra, Orense et le parallèle d'Oporto et dont l'interprétation ne nous apparaît pas nettement sur les cartes géologiques à trop petite échelle, que nous possédons.

Enfin, le type qui domine dans toutes ces régions de terrains anciens à fractures multiples, comme la Galice, c'est le type pyrénéen de sources chaudes sulfurées sodiques, dont l'interprétation doit être la même que pour les Pyrénées.

Passons maintenant à la description des trois zones principales que nous venons de distinguer :

1° Meseta. — Le plateau primaire de la Meseta comprend un grand massif, émergé et plissé depuis le milieu de l'époque carbonifère¹ mais que les accidents alpestres ont visiblement influencé et fracturé.

¹ Le carbonifère supérieur est discordant sur le carbonifère inférieur, aussi bien

Si on le parcourt du nord au sud, on trouve, d'abord, dans les Asturies et la Galice, un large pli courbé et renversé, qui semble dessiner à peu près l'angle N.-O. de la péninsule, en allant, le long du golfe de Gascogne, se relier avec les Pyrénées et le Plateau Central et qui marque, par suite, combien se sont anciennement dessinées les lignes directrices de la géographie de cette région.

Le centre de ce pli courbe est occupé par le carbonifère des Asturies (Picos de Europa), recouvert, dans l'ouest, d'abord par une zone silurienne, puis par des terrains archéens avec granite, qui occupent la Galice.

Au sud, un premier pli archéen prend la direction E.-O. de la Sierra de Guadarrama et se prolonge, en se recourbant à peu près à angle droit, autour de la Nouvelle-Castille, par une chaîne N.-O.-S.-E. de terrains triasiques et jurassiques (Serrania de Cuenca) vers Valence.

Enfin, tout le S.-O. de l'Espagne (Estramadure et Alemtejo) présente une série de plis N.-O.-S.-E. de terrains archéens, siluriens, carbonifères (nettement obliques sur la direction orographique E.-O. des sierras), que vient couper, parallèlement au cours moyen du Guadalquivir, une faille des plus remarquables, allant de l'embouchure de la Guadiana à Cordoue, Linarès et Alcaraz.

En résumé, les plis anciens de l'Espagne, supposés raccordés à ceux de l'O. du Plateau Central et de la Bretagne, dessineraient un S complet.

Si nous partons de Santander, en suivant, vers l'ouest, le flanc nord des monts Cantabriques (connu, on le sait, pour ses gisements de zinc), nous trouvons, d'abord, comme sources thermales principales : *Las Caldas de Besaya* (sur le Besaya, au sud-ouest de Santander), chlorurée sodique à 47° et *la Hermida*, sur la limite des provinces de Santander et d'Oviedo, chlorurée sodique à 61°; puis *Bruyeres de Nava*, à l'est d'Oviedo, sulfatée calcique arsenicale à 25°, et *Caldas de Oviedo*, au sud-ouest de la ville du même nom, chlorurée sodique et nitrogénée.

Ces quatre sources sont en relation évidente avec une zone de terrain triasique, accompagnée parfois de crétacé, qui apparaît sur le prolongement des plis pyrénéens, au sud de Santander et de Torrelavega et se poursuit, sauf une courte interruption, avec une direction est-ouest, jusqu'à Oviedo¹.

dans la province d'Huelva que dans les Asturies, bien qu'il ait subi ultérieurement, d'après M. Barrois, un plissement de même sens.

¹ Voir : 1858. SCHULZ. *Descr. Geol. de Asturias* (p. 126), in-4°, Madrid, chez d. José Gonzales, avec atlas de 8 pl. et carte géologique. — 1882. BARROIS. *Recherches sur les terrains anciens des Asturies et de la Galice* (Mém. Soc. géol. du Nord, t. II. Mém. 1. Lille, 630 p. in-4° et un atlas de planches), avec bibliographie, p. 14.

A l'ouest d'Oviedo, ce genre d'accidents disparaît, au contraire, et l'on traverse une série de zones dévoniennes, siluriennes et carbonifères de direction nord-ouest, assez régulièrement plissées suivant le type breton.

En même temps, les sources thermales font défaut et l'on a seulement quelques sources froides, comme *Prelo* au sud de Luarca, sulfatée calcique à 17°; *Meira* (ferrugineuse), etc.

En arrivant à la dépression du Minho, que suivent, d'abord du nord au sud, puis du nord-est au sud-ouest, une série de lambeaux tertiaires (miocène ou pliocène) et qui marque, par suite, une ligne de fracture alpestre, on retrouve, le long de la vallée, des sources chaudes, généralement sulfurées sodiques, du type pyrénéen, telles que *Lugo* à 44°, *Carballino* (près d'Orense, au contact du granite et du gneiss), à 35°; *Cortegada* à 25°. Puis vient une source bicarbonatée sodique à 42°, celle de *Mondariz*, qui émerge du granite et renferme 0,95 gr. d'acide carbonique libre, avec 2,17 gr. de bicarbonate de soude. Elle se rattache au groupe de sources bicarbonatées, que nous étudierons plus loin.

Enfin *Caldelas de Tuy* (49°), sur le tertiaire, est minéralisée par du chlorure de sodium et du sulfate de chaux.

Des sources thermales assez analogues sont nombreuses dans toute la Galice : la plupart sulfurées sodiques, telles que *San Juan de Carballo* à 37°, *Caldas de Cuntis* à 57°; quelques-unes chlorurées sodiques, à très faible minéralisation (du type de Nérís, dans le Plateau Central), comme *Arteijo* (près de la Corogne), où la température est de 36° et le résidu fixe de 1,87 gr., et *Caldas de Reyes*, en plein granite, à 46°, avec 0,57 gr. de sels par litre¹.

Le cas est différent pour les eaux de *Loujo*, ou *Baños de Toja*, situées dans une île granitique en face de Cambados, où les eaux, très abondantes et atteignant 60° de température, contiennent 29,74 gr. de sels, dont 24 gr. de chlorure de sodium, avec une forte proportion d'acide carbonique. Nous sommes évidemment là sur un point, où se font sentir les effets de l'effondrement atlantique et des manifestations volcaniques, qui le suivent sur presque toute sa longueur.

Ces dégagements d'acide carbonique se multiplient plus au sud, jusqu'à la hauteur de Porto et, presque toujours, pour des sources situées sur du granite ou des terrains archéens : ce qui montre bien, une fois de plus, que l'origine de l'acide carbonique abondant n'est pas à chercher dans les terrains calcaires; mais sans que, d'autre part, il apparaisse là une relation nette avec des roches éruptives récentes.

Nous avons déjà cité *Mondariz*; *Baños de Molgas*, au S.-E. d'Orense, est bicarbonatée sodique à 46°; *Chaves* (Bragance), gazeuse et saline à 56°; *Caldas de Jerez* (dans le granite), gazeuse à 40°; *Caldas de Farcios*, gazeuse à 28°.

En même temps, on continue à avoir des sources sulfureuses : *Caldellas*, à

D'après M. BARROIS (*loc. cit.*, p. 107), plusieurs des sources thermales de la Galice et des Asturies seraient dans des conditions tout à fait analogues à celles que nous étudierons plus tard dans les Pyrénées, au contact de roches cristallines : ainsi *Prelo* (massif de Boal), le long du granite; *Salave*, dans les falaises à l'est de *Figueiras* et *Nava*, au sud des affleurements crétacés, le long de kersantites récentes, probablement éocènes, qui contiennent de l'étain à *Salave*. — 1853. PASCUAL LOPEZ, *Mem. geogn. sobre la prov. de Asturias*, Madrid, p. 15.

33°; *Guimaraes*, à 35°; *Vizella*, à 35°; *Pombal*, à 36°; *Carrabal*, à 38°; *San Pedro do Sul*, à 66°; *Camas de Sihorina*, à 35°; *Cranto o Vinha de Rainha*, près de Coimbre, à 31°.

Quand nous reviendrons tout à l'heure sur la zone tertiaire de Lisbonne, nous verrons ces sources sulfureuses, mêlées de sources salines et de plus rares sources carbonatées, se prolonger vers Lisbonne. Dans la région qui nous intéresse en ce moment, on est un peu surpris de ne pas trouver d'autre source thermale que celle de *Coimbre*, sur la fracture si rectiligne, qui limite à l'ouest la *Meseta*.

Après le décrochement du Tage, le groupe de Portalegre comprend : une source bicarbonatée sodique à 26°, *Castelo del Vide* et des sources sulfatées calciques comme *Arez* (25°) et *Cabezo de Vide* (26°), que peuvent justifier des pointements d'ophite.

Vers le sud, *Alange*, au sud de Merida, présente une source isolée bicarbonatée calcique à 27°; puis, le long de la faille du Guadalquivir¹ et des pointements basaltiques qui s'y rattachent, vers Ciudad Real et Almagro, on a une série de sources bicarbonatées, en même temps que la réapparition du trias produit, suivant l'habitude, des sources salines, telles que *Arenosillo* à 24°.

Les principales sources bicarbonatées sont, entre Cordoue et Andujar, *Fuente Agria de Villalvestra* à 21°; *Marmolejo* à 24°; puis, vers le nord, *Fuencaliente* à 21°; *Puertolano* à 20°; *Villar del Pozo* à 28°; *Herrideros del Emperador* (un peu au nord de Ciudad Real) à 25°; enfin *Navalpino* à 24°.

On doit encore rattacher aux plis anciens de la *Meseta* la série des sources situées entre Gérone et Barcelone, dans un massif ancien recoupé par la trainée balsatique d'Olot et enveloppé de trias, en sorte qu'on peut s'attendre à y trouver des sources bicarbonatées et salines.

Nous citerons : *Caldas de Malavella*, bicarbonatée sodique à 60°²; *San Hilario*, bicarbonatée magnésienne; la *Garriga*, chlorurée sodiquée à 45°; *Caldas de Monbuy*, chlorurée sodique et bicarbonatée à 70°; *Caldas de Estrach*, près de Mataro, chlorurée sodique à 48°; la *Puda*, à l'est du Monserrat, sulfurée sodique à 29°.

2° Bassin de l'Ebre et Cordillère Bétique. — L'allure des plissements alpestres espagnols, qui sont surtout accentués dans la Cordillère bétique, est des plus remarquables. Pour nous borner aux deux traits principaux, on sait qu'ils dessinent, au sud de l'Espagne, une courbe tout à fait analogue à celle des plis hercyniens plus au N., courbe allant, par Grenade et Gibraltar, rejoindre les plis N.-S. du Maroc et se retourner finalement dans le sens E.-O. suivant l'Atlas. D'autre part, ces plissements viennent s'écraser sur

Dans la région d'Huelva, d'après M. GONZALO Y TARIN, il n'existe que des eaux minérales superficielles, produites par le lessivage des grands gîtes pyriteux de cette région, ou une eau salée froide, celle de San Lucar de Guadiana, sur la Guadiana, dont la salure est simplement due à l'influence de la marée.

² L.-M. VIDAL. 1882. *Estudio geologico de la estacion termal de Caldas de Malavella*. (Bol. de la Comision del mapa geologico de España, t. IX, n° 1.)

la ligne de fracture ancienne, si fortement marquée par le Guadalquivir et, entre le Guadalquivir et la côte, ils ont produit une série d'effondrements locaux, tels que celui de la plaine de Grenade, avec lesquels des sources thermales sont, tout naturellement, en relation.

La ligne d'effondrement méditerranéenne, jalonnée, depuis les volcans d'Olot jusqu'aux trachytes de Mazarron et du cap de Gata par une trainée éruptive presque continue, vient encore accentuer cette tendance à la production de sources thermales en fournissant, soit l'acide carbonique, soit la salure, résultant d'infiltrations marines, et enfin l'existence de zones triasiques ou éocènes, à gisements salins, amène la présence d'autres sources salines : pour ces divers motifs, les sources thermo-minérales sont particulièrement abondantes dans la région que nous allons étudier.

Si nous commençons par le bassin de l'Ebre, nous avons là, dans l'éocène, un important niveau salifère, caractérisé par les salines de *Cardona* ; puis, dans le haut bassin de l'Ebre, entre Saragosse, Vitoria, Burgos et Soria, une série de sources chlorurées sodiques ou sulfatées calciques, généralement froides, parfois thermales, en relation, soit avec le tertiaire, soit avec le trias, qui reparait, de ce côté, sur le flanc N.-E d'un chaînon ancien, constituant la Sierra de la Demanda et la Sierra del Virgen. Ce dernier cas est celui de la source d'*Arnedillo*, chlorurée sodique à 52° ; au contraire, les sources de *Cervera*, *Grabalos*, *San Agustín de Haro* sont froides. Les eaux de *Alhama de Aragon* (34°), à la limite du crétacé et du tertiaire, sur le flanc ouest de la Sierra del Virgen (ouest de Saragosse), sont très riches en acide carbonique, avec une minéralisation où dominant le sulfate et le carbonate de chaux¹.

Dans le même ordre d'idées, on peut citer, sur la zone tertiaire située à l'est de Madrid et de Guadalajara, quelques sources chlorurées sodiques chaudes, telles que *Carlos III Trillo* à 29°, avec plus ou moins de sulfate de chaux et de sulfure de calcium selon les griffons, à la limite du tertiaire et du crétacé, ou sulfatées calciques, avec sulfate de magnésie, comme *Sacedon*, à 29°.

Nous arrivons enfin à la chaîne bétique proprement dite.

Dans l'étude qui a été faite de cette chaîne par la mission d'Andalousie, en 1888, on y a distingué² :

1° Sur la côte, une chaîne ancienne, avec des reliefs très abrupts sur la Méditerranée : chaîne bétique, formée par un massif de schistes archéens ou cambriens, avec cipolins, amphibolites, etc., qui a été plissée pendant le carbonifère, en même temps que la chaîne hercynienne, en sorte que, sur la tranche des terrains, reposent des lambeaux triasiques, jurassiques, éocènes. Cette chaîne ancienne commence entre Marbella et Ronda, puis forme le noyau de

1877. LABAT. *Etude sur la station et les eaux d'Alhama de Aragon* (Espagne). 23 p., Paris, Baillière.

* BERTRAND. *Mission d'Andalousie*, p. 390.

la Sierra-Nevada (prolongement de l'anticlinal de la Sierra de Mijas), se poursuit par la Sierra de los Filabres et aboutit à la côte, vers Aguilas.

A l'est, cette chaîne a été tranchée obliquement par la ligne de fracture méditerranéenne.

2° A l'ouest, d'autres chaînes secondaires sont formées surtout de calcaires jurassiques, crétacés et tertiaires plissés et disloqués, le tout jouant, par rapport à la chaîne bétique, le rôle des Préalpes à l'égard des Alpes et constituant la zone subbétique. Ces zones se prolongent jusqu'à la faille du Guadalquivir, où nous avons vu qu'elles butent obliquement contre la Meseta.

Elles présentent, dans la Serrania de Ronda¹, deux discordances principales : l'une entre le néocomien et le nummulitique, l'autre entre le nummulitique et le miocène marin de Ronda, qui a dû s'étendre sur la majeure partie de cette sierra. Après quoi, des soulèvements plus lents se sont produits jusqu'au quaternaire et même, à Gibraltar (d'après Ramsay et Geikie), après le quaternaire.

En outre, un certain nombre de dépressions, occupées par du tertiaire, notamment à Grenade, marquent, le long de la chaîne, des aires d'effondrement.

Passons maintenant en revue les principales sources de cette zone, du nord au sud.

Au sud de *Castellon de la Plana*, il existe, en relation avec le trias, quelques sources froides salines ou bicarbonatées magnésiennes et une seule source chaude, *Villavieja de Nales*, sulfatée calcique chaude atteignant 45°, près de la côte.

Autour de Valence, quelques sources chaudes sulfatées calciques émergent du trias ou du crétacé superposé : *Bellus* à 28° ; *Chulilla* à 40° ; *Fuente Podrida* à 20°. Il existe, en outre, une source bicarbonatée ferrugineuse à 24°, celle de *Siete Aguas*.

Plus au sud et un peu au nord d'Alicante, *Busot* offre des eaux sulfatées calciques et sulfatées magnésiennes à 41° sur le nummulitique, au voisinage immédiat du trias : tout près de là, *Nuestra Señora de Orito* est une eau chlorurée sodique à 13° sur le trias, et *Salinetas de Novelda* une eau chlorurée sodique à 20° sur le nummulitique.

Entre Murcie et Lorca, le long de la vallée du Rambla Sanguenera, on retrouve encore, sur le tertiaire ou le trias, des eaux chlorurées sodiques chaudes, telles que *Archena* (32°), *Fortuna* (48°), *Mula* (33°), ou sulfatées calciques, avec bicarbonates, comme *Alhama de Murcia* à 42° : ce qui semble caractériser, dans cette région, des fractures d'effondrement, d'ailleurs marquées par des pointements de trachyte et de basalte, auxquels il faut, sans doute, rattacher l'acide carbonique de Alhama.

Ce sont, évidemment, des circonstances analogues, qui, d'Almeria vers Grenade, Jaen et Cadix, font apparaître une série de sources, d'une part échauffées par leur relation avec les fractures tertiaires, d'autre part minéralisées par le sel du trias ou l'acide carbonique des basaltes²

M. LÉVY et BERGERON. Mission d'Andalousie, p. 474. Selon M. BERTRAND, *loc. cit.*, p. 533, la véritable chaîne subbétique était constituée à la fin du crétacé.

Voir 1881, GONZALO Y TARIN, sur la Province de Grenade.

Notons, autour d'Almería, des sources sulfureuses et salines sur le tertiaire, telles que *Guardias Viejas* (28°), où le sulfate de soude est associé au chlorure de sodium; *los Guarros* (21°), où l'on observe un type assez remarquable de sources bicarbonatées calciques chaudes; *Alhama de Almeria* (46°); *Sierra Alhamilla* (57°); enfin les eaux chaudes à 48° de la *Sierra Almagrera*.

Plus loin, on retrouve encore des eaux bicarbonatées calciques chaudes, à acide carbonique plus ou moins abondant : *Alhama Nueva* (45°), *Alicun de Ortega* (34°), ou chlorurées sodiques, comme *Lanjaron* (30°) et la *Mala* (32°).

Alhama nueva, près de Grenade, est apparue, à quelque distance de l'ancienne Alhama, à la suite du tremblement de terre du 25 décembre 1884, sur un pointement de lias, émergeant au milieu du bassin tertiaire effondré et au pied des formations marno-gypseuses miocènes¹.

La *Mala* est tout près de Grenade, dans les marnes gypseuses miocènes très disloquées, au pied d'un îlot de schistes cambriens et calcaires triasiques, sur le bord même de la chaîne bétique.

Lanjaron, source à acide carbonique abondant et à chlorure de sodium, est sur la zone triasique, qui forme le flanc est de la Sierra Nevada, peut-être en relation avec des accidents N. 150° E. marqués plus au sud.

Plus à l'ouest, *Alora* et *Alhaurin et Grande* sont à l'ouest du massif cambrien de Malaga, au contact du nummulitique.

3° Région secondaire et tertiaire de Lisbonne. — Les sources de la zone secondaire et tertiaire de Lisbonne, qui ont été spécialement étudiées par M. Choffat², continuent surtout les types que nous avons trouvés plus au nord dans la Galice, c'est-à-dire que l'on y trouve des sources sulfureuses, des sources salines, avec des sources carbonatées, plus rares qu'on n'aurait pu s'y attendre sur une zone aussi manifestement influencée par les éruptions récentes et, encore aujourd'hui, par les tremblements de terre.

Nous citerons, du nord au sud, comme sources sulfureuses :

Cranto o Vinha de Rainha, près Coimbra (31°), *Monte Real*, *Caldas de Reinha* (chlorure de sodium et sulfate de chaux, à 35°), *Rio Real*, les *Bains de l' Arsenal* à Lisbonne même (30°); comme sources salines : *Obilos* (29°) et *Agua Santa de Vimeiro* (26°), toutes deux sur le trias; *Cascaes* (29°) et *Baños del Duque* à Lisbonne, (30°); enfin, comme sources gazeuses : *Torres Vedras* (saline et gazeuse, à 36°), sur le basalte et, dans l'Algarve, au sud, *Monchique* (33°) et *Tavira* (28°), près de pointements éruptifs.

A *Lisbonne*, au pied de la colline du château de Saint-Jorge, formée par la mollasse marine, des eaux à 30° sortent au niveau même du Tage et sont minéralisées, soit par du chlorure de sodium et du carbonate, soit par des sulfates.

VOIR BERTRAND, *loc. cit.*, p. 411, une coupe à Baños de Alhama.

² (*B. S. G. F.*, 1893, 3^e sér., t. XXI, p. 44), spécialement sur *Cascaes*, Lisbonne, *Cucos*, *Maccira*, *Leira*, *Caldas de Reinha*.

§ 3. — *Plateau Central français et Morvan*¹

Le Plateau Central français présente, chacun le sait, une remarquable abondance de sources thermales, où, d'une façon générale, l'acide carbonique prédomine : ce qui s'explique, tout naturellement, par le voisinage des volcans d'Auvergne. En dehors de ces eaux, minéralisées, suivant leur température, soit par les bicarbonates alcalins, soit par les bicarbonates terreux ou ferrugineux, on y trouve quelques eaux, simplement thermalisées, mais à peine minéralisées par leur circuit souterrain (Néris, Evaux, etc.) et, lorsqu'on se rapproche, vers le nord, de la bordure triasique, des sources plus ou moins fortement chlorurées (Bourbon-l'Archambault, Bourbon-Lancy, Saint-Honoré, Santenay, etc.), mais où des bicarbonates peuvent, comme à Saint-Honoré et Bourbon-Lancy, accompagner encore le chlorure.

Il est peu de régions, où, lorsqu'on examine les phénomènes dans leur ensemble et non sur des cas trop particuliers, l'origine interne et volcanique de l'acide carbonique des eaux saute plus manifestement aux yeux. Toutes ces eaux bicarbonatées sont, en effet, comprises dans le triangle éruptif, si nettement limité : à l'ouest, par la faille des bassins houillers de Moulins à Decazeville ; à l'est, par la zone d'effondrements tertiaires de Roanne et Montbrison et ce triangle, qui renferme, à peu près, toutes les sources carbonatées françaises, est, en même temps, celui qui contient la presque totalité de nos pointements basaltiques²

Ce n'est pas, on le conçoit, ici le lieu de refaire la géologie du Plateau Central ; il en est néanmoins quelques traits, qui nous paraissent essentiels à rappeler pour expliquer le gisement des sources thermales.

Le Plateau Central, comme tous les lambeaux disjoints de la chaîne hercynienne, que nous étudions successivement en ce moment, porte l'empreinte très manifeste de deux ordres de phé-

¹ Voir, outre les bibliographies de détail qui seront données ultérieurement, comme ouvrages généraux :

1846. NIVET. *Dict. des eaux min. du Puy-de-Dôme* (avec bibliographie antérieure). — NIVET. *Études sur les eaux minérales de l'Auvergne et du Bourbonnais*. — 1864. LECOQ. *Les eaux minérales du massif central de la France, considérées dans leurs rapports avec la chimie et la géologie* (in-8°, 260 p.). — TRUCHOT. *Dictionnaire des eaux minérales du Puy-de-Dôme*.

² Voir fig. 5, p. 56.

nomènes tout à fait indépendants : d'une part, les phénomènes hercyniens ; de l'autre, les dislocations alpestres et il suffit de jeter un coup d'œil sur sa carte géologique, en essayant de reconstituer par la pensée les zones primaires, avec les décrochements pouvant dater de l'époque hercynienne, pour voir quelle complication ont introduite, dans tout cet ensemble, des mouvements d'âge tertiaire incontestable. Ici, comme partout, nous trouverons les manifestations hydrothermales en rapport avec ces fractures récentes et nous croyons que la généralité de cette loi, vérifiée en tant d'occasions, peut, à son tour, fournir un indice pour apprécier, dans le Plateau Central, l'âge de certaines dislocations d'origine douteuse, sur lesquelles se présentent des sources thermales.

Quand on veut comprendre ces mouvements tertiaires du Plateau Central, il est essentiel de tracer, sur les cartes géologiques d'ensemble (où on le néglige presque toujours), un élément auquel nous attribuons une importance capitale : ce sont ces grands filons de quartz, que l'on peut suivre, dans tout le nord de ce Plateau, sur des 50 ou 100 km. de long¹ et qui y mettent en évidence, d'une façon si nette, des lignes de faille, suivant lesquelles ont joué deux compartiments contigus de l'écorce, avec rejet horizontal des parties en contact. L'âge de ces filons est souvent difficile à déterminer ; mais, pour plusieurs d'entre eux, on ne peut douter qu'il y ait eu, tout au moins, réouverture tertiaire de filons plus anciens : ainsi, pour ceux qui suivent les deux bords de l'effondrement tertiaire de la Limagne, à l'est, entre Thiers et Châteldon, à l'ouest, de Chantelle vers Moulins ; puis, pour celui que nous avons récemment décrit sur la feuille de Confolens et qui prolonge si exactement, dans la direction même des plis bretons, à travers le granite et les schistes primaires, une importante faille, affectant plus au N.-O. les terrains secondaires, etc.²

On constate souvent, comme nous le verrons, que des dislocations de plusieurs époques successives ont réouvert, à diverses

¹ Voir nos feuilles, au 1 80 000, de Moulins, Gannat, Montluçon, Aubusson, Guéret et Confolens : notre note sur les dislocations du terrain primitif dans le nord du Plateau Central (C. R., 10 déc. 1888) ; la carte d'ensemble inscrite dans le mémoire sur les sources thermales de Néris et d'Evaux (Ann. d. M., juin 1893). Ces filons ont pu suivre parfois d'anciens accidents de la chaîne hercynienne, avec lesquels ils présentent une certaine conformité de direction.

² Note sur les courses de 1897, feuille de Confolens (Bull. Carte géol.). Il reste, au sujet de l'âge de ces filons, divers points à éclaircir, notamment la cause de leur disparition au passage du terrain carbonifère.

reprises, et en dernier lieu très récemment, un même plan de fracture ancienne.

Dans toute la région située à l'ouest de la trainée houillère de Saint-Eloy, les principaux de ces filons affectent, d'une manière très uniforme, depuis Montluçon jusqu'à Confolens, sur 150 km. de large, une direction N. 140° E et découpent ainsi le terrain en une série de bandes parallèles aux plis armoricains, le long desquelles on trouve des eaux chaudes, comme Nérès, Evaux, etc.

D'autres filons plus secondaires sont, au contraire, N. 40° E, comme la trainée houillère de Saint-Eloy et comme tous les plis anciens à l'est de la faille du Roannais.

Enfin, les effondrements proprement dits, dans lesquels se sont formés les bassins tertiaires, affectent cette direction N.-S., qu'on retrouve, dans toute l'Europe, pour tant d'effondrements de la même époque et sont, par suite, presque orthogonaux sur la direction moyenne des plis anciens ¹.

L'on a, par suite, en résumé, l'impression d'une ancienne courbure des plis hercyniens, ayant raccordé jadis, par une ligne continue les plis N.-O. de Bretagne aux plis N.-E. du Morvan ou des Vosges, mais dans laquelle un mouvement de compression postérieur serait venu juxtaposer brutalement des parties extrêmes, en produisant, sur toute la zone centrale, représentée aujourd'hui par le triangle éruptif, un effet de dislocation intense, des effondrements, des exhaussements, etc. ²

C'est sur le bord de ces effondrements tertiaires, situés dans le triangle éruptif ou sur des cassures connexes, que se trouvent à peu près toutes les sources carbonatées ; pour nous borner aux principales, on a : sur le bord ouest de la Limagne, Royat, Châtelguyon et, à peu près dans le prolongement, sur le système des failles du Sancerrois, Pougues et Fourchambault ; sur le bord est, au contraire, Châteldon, Vichy, Bourbon-Lancy et Saint-Honoré, les deux dernières étant très légèrement salines, en même temps que bicarbonatées ; dans le bassin de Montbrison, Saint-Galmier, Montrond, Sail-sous-Couzan ; dans celui de Roanne, Saint-Alban, Renaison et Sail-les-Bains.

Nous avons signalé récemment (*Ann. d. M.*, févr. 1898) un rapport analogue entre les plis archéens et les effondrements tertiaires de la mer Egée.

Le massif de Saint-Saulge et ses relations avec le terrain houiller de Decize (Bull. carte géol., 1895). On sait quelles dénivellations se sont produites dans la Limagne depuis l'époque tertiaire (*feuilles de Clermont et de Gannat*).

En outre, il existe, dans le massif même, sur des fractures tertiaires, des sources telles que le Mont-Dore, la Bourboule et Saint-Nectaire, ou Châteauneuf.

Et, enfin, l'effort de refoulement, parti de l'est, c'est-à-dire des Alpes, est venu s'écraser (dans des conditions tout à fait analogues à celles que nous avons rencontrées pour la Meseta espagnole, sur la faille du Guadalquivir), le long de cette fracture si rectiligne, qui borde le S.-O. du Plateau Central, d'Alais vers Privas et Valence ¹, à peu près en concordance avec les plis anciens et nous rouvons, à l'intersection de cette fracture avec la traînée basaltique u Mézenc, le groupe des eaux carbonatées de Vals.

Nous croyons donc que la thermalité de toutes ces eaux résulte de leur présence sur des cassures tertiaires : système des filons de quartz N. 140° E. et 40° E. ; bordure à peu près N.-S. des zones d'effondrement de la vallée de l'Allier et de la vallée de la Loire, etc. Quant à leur minéralisation, les sources de l'ouest, situées hors de la région éruptive, en massif granitique (Néris, Évaux), sont à peu près de l'eau pure ; les sources du triangle éruptif sont bicarbonatées (Bourboule, Saint-Nectaire, Royat, Châtelguyon. Vichy, Vals, etc.) ; enfin les sources de la bordure du Morvan (Bourbon-Lancy, Saint-Honoré) sont légèrement salines, en même temps que bicarbonatées.

Nous allons maintenant ajouter quelques détails sur les plus intéressantes géologiquement de ces sources, sans avoir, bien entendu, la prétention de les décrire toutes. On nous pardonnera de nous étendre peut-être un peu plus longuement sur cette région hydrothermale que sur les autres, en raison des observations personnelles que nous avons eu l'occasion d'y multiplier plus qu'ailleurs.

Néris et Évaux ² — Les deux sources thermales de Néris et d'Évaux, tout à fait comparables par leurs conditions de gisement, leur température et leur minéralisation, sont situées sur deux de ces filons de quartz N. 140° E., que nous avons décrits tout à l'heure d'une façon générale, près de leur intersection avec une ligne de

En prolongeant la faille de Privas jusqu'au cap Creux, longeant la côte espagnole vers Barcelone et rejoignant la faille du Guadalquivir, on laisse à l'ouest toute la masse ancienne hercynienne, dont les plis sont partout tranchés obliquement par cette dislocation capitale.

* L. DE LAUNAY. (*Ann. d. Min.* juin 1895), avec bibliographie.

dislocation tertiaire et de dénivellation orographique N. 40° E., marquée par les vallées du Cher et de la Tardes (fig. 29). La carte au 320 000°, que nous avons donnée de toute cette région dans un mémoire spécialement consacré à ces sources, montre bien comment ces deux directions de fractures, à peu près orthogonales, dont la seconde surtout a produit, sur les terrains primaires, des rejets manifestes, sont, d'autre part, obliques sur le sens des plissements primaires; pour le filon de quartz d'Évaux, qu'on peut suivre de Biollet vers Boussac sur près de 50 km. de long, l'angle avec la traînée carbonifère de Chambon et Saint-Julien-les-Genêts est environ de 20°

Le filon de quartz de Nérès est chargé de fluorine, barytine et

pyrite; celui d'Évaux contient de la barytine et de la pyrite. En dehors des filons proprement dits, incrustés par le quartz, nous avons été conduit à attribuer un certain rôle, dans la remontée au jour des eaux de Nérès, à des diaclases du granite, qui présentent là également une direction moyenne N. 130 à 140° E. et qui nous semblent être, elles aussi, des indices de la dislocation récente du sol.

Bourbon-l'Archambault. — La source de Bourbon-l'Archambault, dont nous avons étudié autrefois en détail les conditions de gisement¹, est en relation particulièrement nette avec un faisceau de filons N. 140° E., c'est-à-dire presque exactement parallèle à ceux sur lesquels nous venons de trouver les deux sources homologues de Nérès et d'Évaux. Ces filons, dont l'un, encore ouvert, forme le griffon même des eaux, sont tapissés de barytine, strontianite, fluorine, galène et pyrite de fer. Ils font, comme nous avons déjà eu l'occasion de le remarquer et comme le montre la figure 30, partie d'un grand ensemble de cassures de même direction, ayant dû prélever, dès l'époque hercynienne, par des décrochements per-

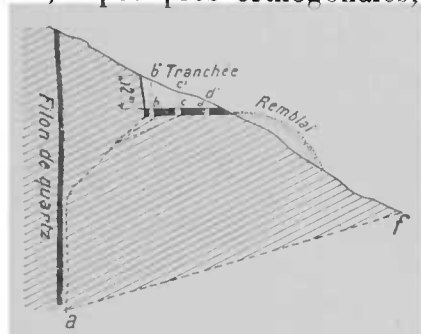


Fig. 29. — Coupe schématique à Évaux perpendiculairement au filon de quartz directeur. *ab, ac, ad*, trajets divers des eaux alimentant les sources *b, c, d*.

¹ *Annales des Mines*, mai 1888; 8^e sér., t. XIII, p. 129; *Feuille de Moulins; le Massif de Saint-Saulve* (Bul. carte géol., 1895).

pendiculaires aux plis des terrains archéens et s'étant reproduites, selon toute apparence, lors des dislocations alpestres, qui, sur cette extrémité nord du Plateau Central, paraissent concorder approximativement avec les anciens plis.

L'intersection de ces filons avec la curieuse dépression topographique, qui amène la réapparition du gneiss au milieu des terrains permien, sur 1 km. environ de large, autour de Bourbon-l'Archambault¹ suffit à expliquer l'émergence de la source ther-

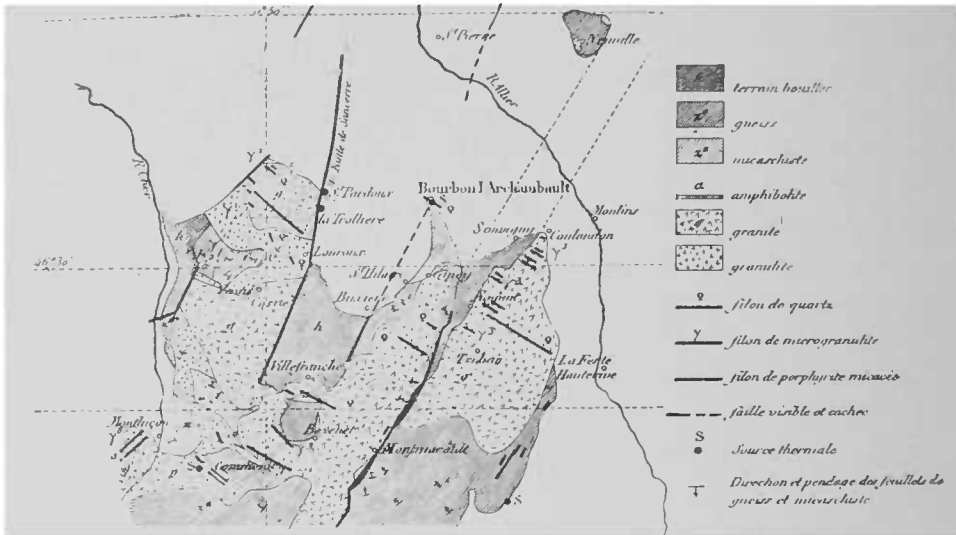


Fig. 30. — Carte géologique de la région de Bourbon (en supprimant les terrains postérieurs au houiller) montrant l'allure des dislocations.

Echelle de $\frac{1}{1.050.000}$.

male. Sa minéralisation, légèrement chlorurée sodique (1,80 gr. de chlorure), peut être attribuée à la présence voisine des terrains permien et triasiques, dans lesquels on connaît des gisements d'évaporation saline, sous forme de sulfate de chaux.

La Bourboule et le Mont-Dore - Saint-Nectaire. — Dans le très important mémoire consacré par M. Michel Lévy, en 1891, à la

¹ Voir plus haut fig. 9, p. 63.

² Voir plus haut, p. 58 et fig. 6. — Cf. 1822. P. BERTHIER. *Analyse des eaux minérales et thermales du Mont-Dore.* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VII, p. 201). — 1825. LECOQ. *Recherches sur les eaux minérales de la Bourboule* (Puy-de-Dôme). (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. X, p. 289). — 1870. D^r CHATEAU. *Eaux de la Bourboule* (Paris, Masson, 54 p.). — 1866. D^r BOUDANT. *Eaux du Mont-Dore* (Clermont-Ferrand, 50 p.). — 1873. D^r CHOUSSEY. *Eau de la Bourboule* (Paris, Delahaye, 76 p.). — MICHEL BERTRAND. *Le Mont-Dore.* — 1879. D^r NAVET. *Eaux de la Bourboule* (Clermont-Ferrand, 66 p., avec

chaîne des Puys, il a étudié incidemment l'origine de ces deux sources du Mont-Dore et de la Bourboule, qui sont en relation si évidente avec le massif éruptif du Sancy et fait voir comment elles se rattachaient à des dislocations alpestres.

Suivant lui, tandis que la majorité des failles intéressant l'oligocène et le miocène de la Limagne sont antérieures aux épanchements volcaniques, quand on s'éloigne vers l'ouest, du côté du Mont-Dore, on trouve des fractures plus faibles, mais plus récentes, postérieures au pliocène, notamment au Mont-Dore et à la Bourboule¹.

La faille de la Bourboule, très probablement pliocène, met en contact, d'une façon remarquablement nette, le granite avec la cinérite, sur une hauteur d'au moins 165 m.² Sa direction est N. 60° E. et M. Michel Lévy estime qu'elle se prolonge, avec une direction E.-O. et un plongement sud, le long de la Dordogne, où elle produit quelques sources thermales, jusqu'au ravin de Prendsgarde à 2 km. au nord du Mont-Dore ; selon lui, elle se coude là à 140° pour passer entre les puys de Mareille et de l'Angle, parallèlement à la vallée de la Dordogne au Mont-Dore et, par un nouveau coude, se dirige à 80° vers Chambon.

La vallée même du Mont-Dore semblerait correspondre à une cassure latérale, parallèle à cette grande faille : cassure qui se dirigerait droit vers le centre éruptif du Sancy et sur laquelle se trouveraient les sources thermales.

Ces deux sources, principalement minéralisées par l'acide carbonique et le chlorure de sodium (0,37 gr. NaCl au Mont-Dore et 3,45 gr. à la Bourboule) sont, en outre, remarquables par la présence de l'arsenic (0,0004 gr. au Mont-Dore, jusqu'à 0,008 gr. à la Bourboule).

bibliographie). — 1885. D^r LABAT. *Etude sur le pays et les eaux du Mont-Dore* (Auvergne), in-8°, 10 p. Clermont (Oise). — 1884. LIONNET (G.). *Note géologique et minéralogique sur la Bourboule et les environs* (Bull. de la Soc. géol. de Normandie, t. IX, p. 8, le Havre). — 1890. FOUQUÉ. *Le Plateau central de la France* (Rev. scientif.). — 1891. MICHEL LÉVY. *Notes sur la chaîne des Puys, le mont Dore, etc.* (Bull. Soc. géol., 3^e, t. XVIII, p. 688, etc., avec Pl. XXI représentant la faille de la Bourboule). — 1895. LABAT (D^r). *Etude sur la Bourboule* (Extr. Ann. Soc. d'hydrologie, t. XL, in-8°, 31 p., Paris). — *Feuilles au 1:80 000 de Clermont par M. MICHEL LÉVY; de Brioude par M. FOUQUÉ et d'Ussel.*

Loc. cit., p. 886.

Ibid., p. 779. Les sources de la Bourboule résultent, en grande partie, de sondages, entrepris depuis une quarantaine d'années pour aller drainer en profondeur les filets hydrothermaux, épanchés, à partir de la faille, dans les fissures du granite et dans les cinérites voisines (DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, t. 1, 121 : *feuille de Clermont*, par M. MICHEL LÉVY; voir, plus haut, fig. 6, p. 58).

On peut, à tous les égards, en rapprocher celles de *Saint-Nectaire*, situées à proximité du même massif éruptif, plus à l'est, encore en plein granite, mais au voisinage immédiat des terrains tertiaires à striatelles, sur une série de fractures en rapport avec les effondrements de la Limagne¹.

Là, le granite est recoupé par de très nombreux filons hydrothermaux N.-E., contenant, comme dépôts d'incrustation : aragonite, calcédoine et opale, réalgar, diallogite, etc.

Le résidu sec atteint 6 gr. par litre, contre 5 gr. à la Bourboule et 3,80 gr. au Mont-Dore. Il est formé surtout de bicarbonates, puis de chlorure de sodium (2,77 gr.), avec 0,002 gr. ou 0,003 gr. d'arséniate de fer.

Cette présence de l'arsenic au Mont-Dore, à la Bourboule, à Saint-Nectaire, est un fait que nous retrouverons souvent dans les districts volcaniques et dont nous n'avons guère d'exemples ailleurs ; nous avons déjà eu l'occasion d'en parler.

Sources de la Limagne : Royat, Châtelguyon, Vichy, etc. — Nous allons parcourir la Limagne du sud au nord, d'abord sur sa bordure ouest, puis sur sa bordure est²

Pour commencer, nous nous contenterons de citer, dans les bassins tertiaires de Brioude et d'Issoire, qui forment le prolongement sud du tertiaire de la vallée d'Allier, des eaux bicarbonatées de très faible importance, comme *Vézézoux*, *Sauxillanges*, *Coudes*, *Sainte-Marguerite*, etc³.

Royat⁴. — Les sources de Royat sont situées, environ 2 km. à l'ouest de Clermont-Ferrand, sur la fracture limite de la Limagne ; d'autres sources analogues se trouvent, à Clermont même (sources

Voir plus haut, pages 90 et 143. — MICHEL LÉVY. *loc. cit.*, p. 121, et *feuille de Clermont*. — Cf. BASSET. *Saint-Nectaire* ; — VERNIÈRES, *id.* — 1822. P. BERTHIER. *Notice sur les eaux minérales et thermales de Saint-Nectaire* (Ann. d. M. 1^{re} sér., t. VII, p. 208).

Voir p. 90 et 138.

Voir plus haut, figure 5, page 56. — *Feuilles de Brioude* par M. FORQUÉ, et de *Clermont* par M. MICHEL LÉVY.

* 1832. LECOQ. *Analyse des eaux minérales de Sainte-Claire, à Clermont*. (Ann. d. M. 3^e sér., t. II, p. 412). — 1832. BLONDEAU et HENRY fils. *Analyse des eaux minérales de Pontgibaud* (Puy-de-Dôme). (Ann. d. M., 3^e sér., t. II, p. 411). — 1837. NIVET. *Nouvelles recherches sur les eaux minérales thermales de Royat* (Puy-de-Dôme), in-8°, 55 p., Clermont-Ferrand, Thibaud. — 1878. LABAT. *Ems et Royat* (Ann. Soc. hydrol. médic., t. XXIII, 40 p., Paris, Baillière). — *Feuille au 1/80 000 de Clermont*, par M. MICHEL.

de *Jaude*. *Saint-Alyre*, etc.) sur une faille parallèle, de direction nord-sud, qui se dirige : au nord, vers Riom ; au sud, vers la source de Chamonat.

Ces eaux, très chargées d'acide carbonique (1,81 gr. par litre), sont, en même temps, très abondantes (1 mètre cube par minute à la source de la commune). La lithine y entre en proportions sensibles (0,03 gr. par litre).

Châtelguyon (Puy-de-Dôme¹). — Plus au nord, sur cette même bordure ouest de la Limagne, que marque, dans les terrains tertiaires, une dénivellation en échelons, atteignant, entre les points extrêmes, plusieurs centaines de mètres, on trouve les sources, également carbonatées, de Châtelguyon.

Les sources de Châtelguyon jaillissent, par une série de diaclases, d'un massif granitique très étroit et très allongé, lui-même ramené au jour, au milieu du tertiaire, par deux failles qui l'encadrent.

On est, à Châtelguyon, sur la bordure du massif primitif et du bassin oligocène de la Limagne. Le long de cette bordure, les failles, dirigées plus ou moins parallèlement à elle, c'est-à-dire de N. 15° E. à N. 30° E, sont nombreuses et se traduisent, notamment, par l'existence, à 1 kilomètre ou 2 du massif primitif, d'une traînée de granite, jalonnée par des sources minérales, à *Châtelguyon*, à *Gimeaux*, à *Saint-Myon*, etc. Il semble donc extrêmement vraisemblable que les eaux, qui se sont infiltrées à l'ouest sur le massif granitique de Charbonnières, Loubeyrat, Chazeron, etc., vers la cote 700, passent, par un trajet A B C (fig. 31) au-dessous des arkoses et viennent buter en C contre la faille, qui amène, au contact du granite, des marnes tertiaires très redressées, formant un barrage étanche. Elles remontent alors le long de cette faille, soit dans les fissures du granite, soit, plus exceptionnellement, dans celles des marnes, et viennent sourdre à Châtelguyon, le long de la ligne de moindre pression de la région, représentée par le torrent le Sardon.

L'ancienneté du système de dislocation, auquel appartient la

¹ 1843. D^r AGUILHON. *Eaux de Châtel-Guyon* (Ann. de théor. de Paris). — Vers 1863. CHALOIN. *Sur Châtel-Guyon*. — 1879. SARRAN (D^r AGUILHON DE). *Expériences physiologiques sur les eaux minérales de Châtel-Guyon* (Puy-de-Dôme), in-8°, 8 p. Paris. V. Ethiou-Pérou. — 1885. CAMÉRE. *Etude sur les eaux minérales de Chatel-Guyon*. (Ann. d. M., 8° sér., t. VIII, p. 300). — 1894. L. DE LAUNAY. *Feuille géologique de Gannat au 1/80 000*.

faille limite de la Limagne, est prouvée notamment par la direction parallèle des nombreux filons de minogranulite, qui s'échelonnent de Chazeron vers le lac de Tazenat et Manzat.

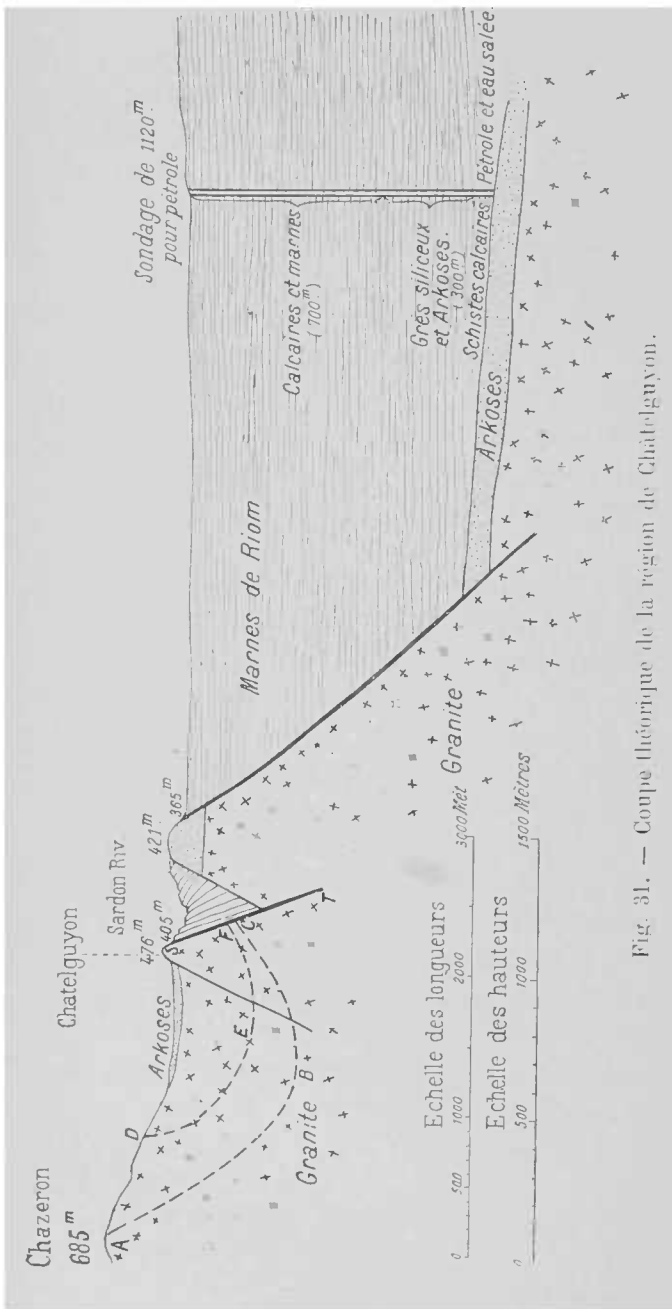


Fig. 31. — Coupe théorique de la région de Châtelguyon.

Plus récemment, elle a donné lieu, tout à côté de Châtelguyon, vers Roche-Pradière, à un remarquable système de filons de quartz et barytine, à plongement ouest, dont le principal recoupe entièrement la languette granitique de Châtelguyon, pour s'arrêter, à ses deux extrémités, devant l'arkose tongrienne, à laquelle il est, par suite, antérieur. Un réseau de fractures semblable, mais plus récent, au lieu de donner issue, comme autrefois, à des sources chargées de silice, livre aujourd'hui passage à des sources riches en

acide carbonique, comme toutes celles de cette région volcanique d'Auvergne et ayant, à la faveur de cet acide, dissous de notables proportions de chaux, avec des chlorures de sodium et de magnésium.

Ces sources, à une époque antérieure au creusement complet de la vallée du Sardon, avaient une émergence de 15 à 20 mètres supérieure à leurs griffons actuels et l'on voit très bien, sur la

rive gauche du Sardon, les anciens filons, aujourd'hui à sec et incrustés d'aragonite ou d'ocre ferrugineuse, qui leur donnaient naissance¹. A mesure que la vallée s'est approfondie, que la partie inférieure des fissures s'est obstruée, ou que la force ascensionnelle des eaux gazeuses a diminué, elles ont dû s'abaisser peu à peu. Actuellement, M. Caméré a pu constater, de la façon la plus nette, leur venue par des fractures du granite, de 1 à 3 centimètres de large, dont l'une, mise à sec près des sources Gubler, était, avec des ondulations, presque horizontale dans son ensemble et tapissée d'un commencement d'incrustation d'aragonite. D'autres fissures sont N. 45° E, avec plongement est, ou N. 404° E. avec plongement sud.

A *Gimeaux* et à *Saint-Myon*, l'observation des sources donne lieu à des constatations identiques.

Vichy². — Les sources de la région de Vichy³ présentent un exemple très intéressant de filons hydrothermaux, accompagnés d'épanchements latéraux, donnant lieu à une série de nappes artésiennes interstratifiées. La multiplicité des sondages forés, depuis quelques années, le long de la vallée de l'Allier, de Saint-Yorre à Hauterive, Vesse et Vichy, ainsi que suivant le ravin du Sichon, à l'ouest, du côté de Cusset, nous renseigne relativement bien

¹ Voir plus haut p. 74 et 141.

1820. P. BERTHIER et A. PUVIS. *Notice sur les eaux minérales et thermales de Vichy* (Allier) (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. V, p. 401). — 1832. D'ARCEL. *Note sur la préparation du bicarbonate de soude à l'aide de l'acide carbonique des eaux de Vichy* (Ann. d. M., 3^e sér., t. I, p. 363). — 1851. LEFORT. *Analyse de l'eau minérale des Célestins à Vichy* (Ann. d. M., 4^e sér., t. XIX, p. 256). — 1855. P.-S. BOUQUET. *Histoire chimique des eaux minérales et thermales de Vichy, Cussel, Vesse, Hauterive et Saint-Yorre* (in-8°, 3 pl., Paris, Masson). — 1859. *De l'usage des eaux minérales de Vichy dans le Levant* (in-16, 32 p., Paris, Maulde et Renou). — 1873. DE GOUVENAIN. *Recherches sur la composition chimique des eaux minérales de Vichy, de Bourbon-l'Archambault et de Néris* (Ann. d. M., 7^e sér., t. III, p. 26). — 1879. H. VOISIN. *Mémoire sur les sources d'eaux minérales de Vichy* (Ann. d. M., 7^e sér., t. XVI, p. 488). — 1879. GRELLETY. *Bibliographie de Vichy* (in-8°, 70 p., Vichy). — 1887. *Source intermittente de Vesse, près Vichy* (Allier) (La Nature, 15^e année, p. 473). — 1892. AUSCHER. *Origine géologique des eaux minérales du bassin de Vichy* (J.-B. Bailliére). — 1894. DOLLFUS (G). *Recherches géologiques sur les environs de Vichy* (65 p., 5 pl., avec bibliographie). — 1894. L. DE LAUNAY. *Feuille au 1 80 000 de Giannal*. (Cette feuille doit être accompagnée d'un mémoire sur le tertiaire de la Limagne Bourbonnaise, qui est en préparation depuis plusieurs années.) — 1896. MALLAT (A). *Les eaux minérales naturelles du bassin de Vichy* (in-4°, 8 p., Vichy, imp. Bougarel).

³ Nous évitons à dessein d'employer le mot *bassin*, dont la définition précise a donné lieu à d'interminables discussions juridiques. Les deux brochures de MM. Auscher et Dollfus (1892 et 1894) représentent, à ce propos, sous une apparence scientifique, les thèses des deux parties adverses.

sur l'allure de ces nappes aquifères, en même temps que les nombreux travaux de captage, accomplis, dans Vichy même, sur les filons thermaux, ont apporté quelque lumière sur la constitution de ceux-ci.

Les sources naturelles de cette région sont celles de Vichy même (Grande-Grille, Puits Carré, Hôpital, Célestins); puis des

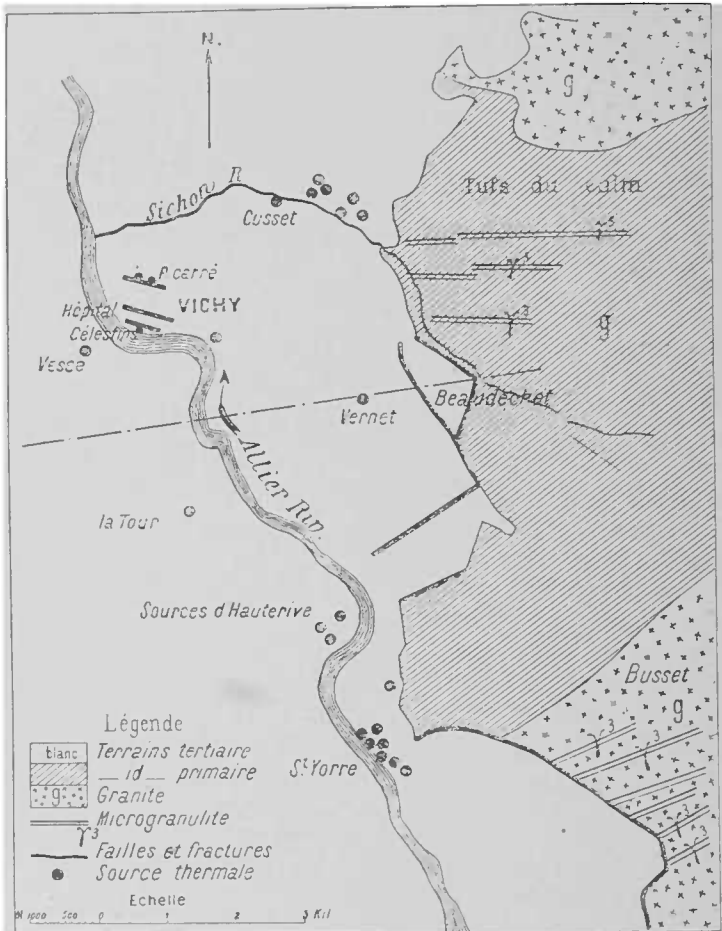


Fig. 32. — Carte géologique des sources thermales de la région de Vichy.

sources froides à Saint-Yorre, Hauterive et Brugheas¹ (fig. 32). Les autres sont le résultat de sondages.

Si nous considérons, d'abord, les filons hydrothermaux, qui alimentent à Vichy des sources, dont la température atteint $44^{\circ}2$,

Voir également la figure 5, p. 56.

Elle arrive à 61° dans le sondage récent du Dôme Thermal, au Nord d'Hauterive, entre la Tour et Vesce.

nous pouvons remarquer que nous sommes là sur cette bordure de

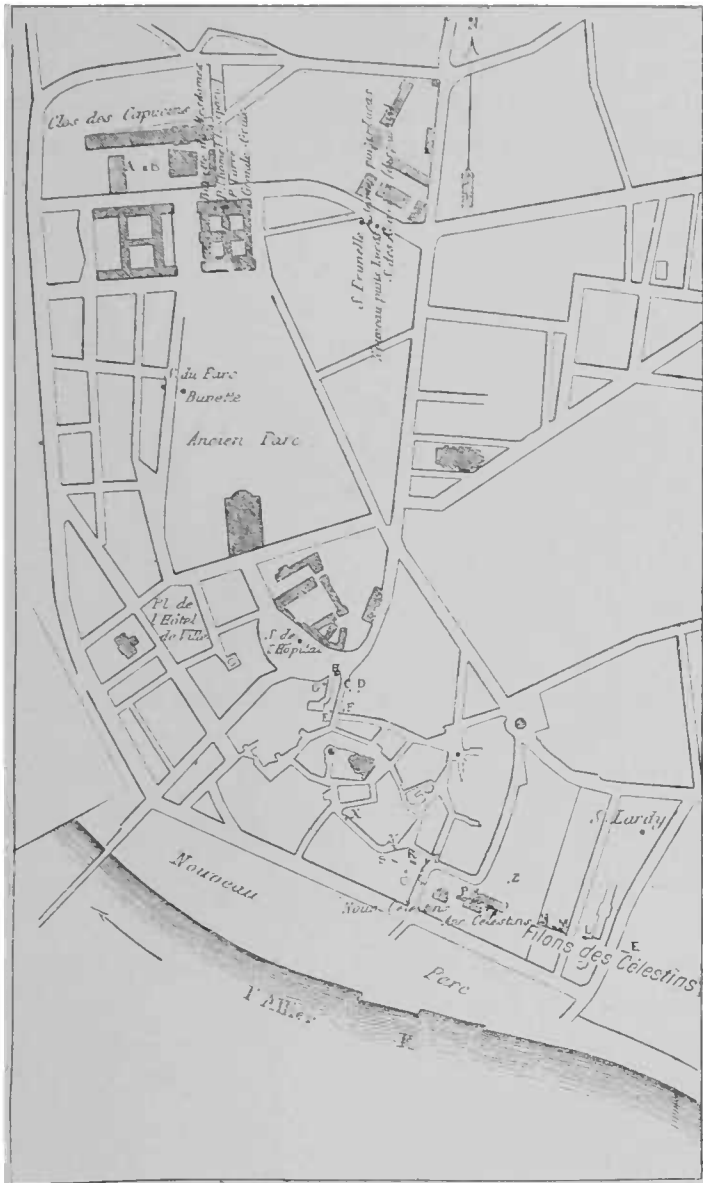


Fig. 33. — Carte des sources de Vichy (d'après M. Voisin). Echelle au $\frac{1}{9400}$

A, puits donnant de l'eau très notablement minérale. — B, Point où l'on a observé un dégagement abondant d'acide carbonique. — C, sources Collas. — D, Source de la maison Forestier. — E, Source Pacaud-Petit. — F, Source minérale de la maison Grolleau. — G, source minérale. — H, travertin en feuillets dirigés O.N.O. à E.S.E. — K. L. M... R. S, points où l'on voit le rocher des Célestins en feuillets verticaux. — I, filon transversal. — T, U, Z, points où l'on observe le travertin en feuillets contournés, presque horizontaux.

la Limagne, qui, depuis Thiers jusqu'à Saint-Yorre, est suivie d'une

façon continue, par une remarquable fracture N.-S., sur laquelle se trouvent, un peu au sud de Vichy, les sources de Châteldon¹.

Notre figure 34 montre, d'une façon saisissante, comment, au voisinage de Ris (Châteldon), le granite *g* est mis en contact par cette faille (suivant un plan vertical, le long duquel tombe une cascade) avec les masses démantelées d'arkose rouge *a*.

Ainsi qu'il arrive pour la plupart de ces accidents tertiaires

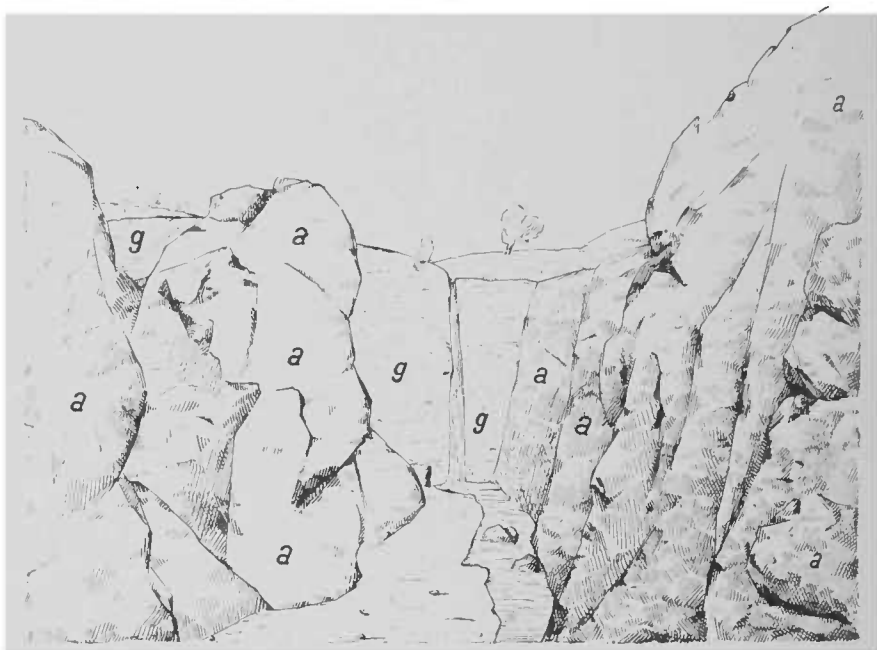


Fig. 34. — Croquis montrant l'allure de la faille de Ris, entre le granite *g*, et l'arkose rouge *a*.

dans le Plateau Central, la direction de la fracture semble, d'ailleurs, avoir été très anciennement esquissée ; car toute la bordure primitive est absolument hachée de filons transversaux de divers âges, spécialement de micro-granulite (carbonifère), qui marquent évidemment des étoilements connexes.

Vers Saint-Yorre, à 8 km. sud de Vichy, cette grande faille, si continue et si nette, rencontre un accident transversal, également à peu près perpendiculaire, qui ramène brusquement, jusqu'à l'Allier, une bande de terrains primaires d'environ 3 km. de large². Puis elle paraît reprendre, à l'est du village de Vernet,

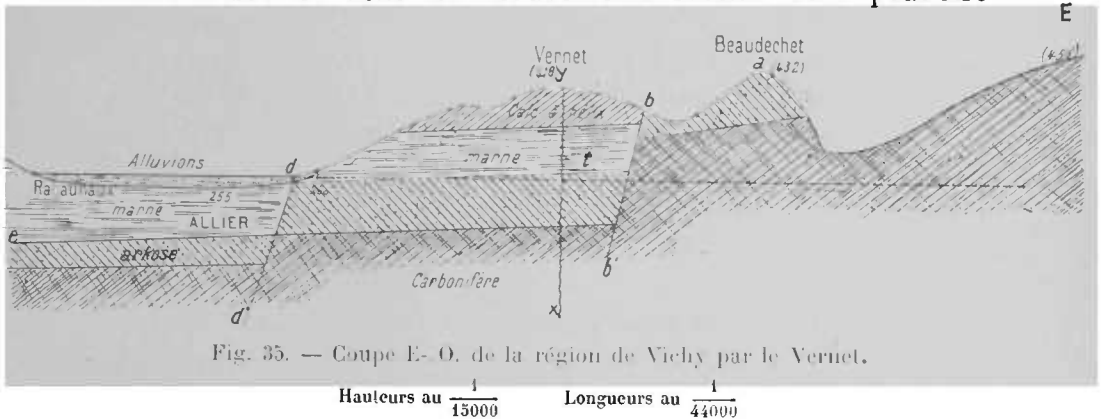
¹ 1839. DEBREST. *Châteldon*. — 1858. HENRY et GONOD. *Etudes chimiques et médicales sur les eaux minérales de Châteldon* (in-8°, 24 p., Clermont-Ferrand, Thibaud).

² C'est là un genre d'accidents qui, est extrêmement caractérisé vers l'est, sur la

mettant en contact des arkoses, probablement sannoisiennes, avec des calcaires aquitaniens et se dirige, en s'atténuant, sur Cusset.

Ainsi que nous avons essayé de le faire ressortir sur une coupe ci-jointe (fig. 35) un système de cassures, à peu près parallèle à cette faille principale, c'est-à-dire N.O.-S.E., suit probablement l'Allier, d'Hauterive à Vichy¹

Enfin, — ce qui achève de donner à cette position de Vichy une importance spéciale, comme point de dégagement de l'acide carbonique, — c'est là également qu'aboutit le système des accidents du Forez, nettement marqué par une trainée carbonifère de Cusset à Monbrison et dont les mouvements récents sont peut-être



caractérisés, au voisinage même de Vichy, le long du Sichon, par une série de pointements basaltiques, alignés N. 115° E., suivant une droite, dont le prolongement direct se trouve passer à Vichy même, et concorder approximativement avec le filon hydrothermal des Célestins²

Les sources thermales naturelles, que nous avons énumérées plus haut sont placées : d'une part, sur l'accident transversal de Saint-

feuille de Roanne. Il suffit de jeter un coup d'œil sur cette feuille pour voir comment ces compartiments de terrains anciens, dirigés N. 150° E., sont successivement reportés vers l'ouest par une série d'échelons, que produisent des décrochements perpendiculaires N. 70° E.

¹ On peut remarquer que Vichy, Cusset et Vesse doivent se trouver sur la bordure nord du massif primaire, bordure visible immédiatement à l'est et qui disparaît à la surface entre Cusset et Gannat, dans la zone effondrée de la Limagne, mais qui ne doit pas moins s'y continuer en profondeur (Fig. 5 et 32).

² La dénivellation de près de cent mètres, qu'on observe entre les arkoses tertiaires de Beaudechet à l'est de Vernet, et celles au nord-est de Cusset, semblerait un indice d'un accident semblable, qui n'apparaît pourtant pas dans les calcaires oligocènes à l'ouest de Cusset.

Les cotes indiquées sur nos coupes sont celles au-dessus de la mer.

Yorre, soit au sud de la zone primaire (Saint-Yorre), soit au nord (Hauterive et Brugheas); d'autre part, sur les fractures de Vichy. Ces dernières, étant situées dans des marnes facilement affouillables et dont les fissures s'engorgent progressivement par le dépôt des travertins, n'ont que le degré de fixité relative, obtenu par les captages; néanmoins, le filon d'incrustation vertical N. 110° E., qui produit les sources des Célestins, est depuis longtemps connu et toutes les sources naturelles de Vichy arrivent au jour par de semblables cheminées verticales, incrustées de travertin¹

Quelle que soit l'opinion sur le système de fractures, plus ou moins bien défini, par lequel semblent remonter les eaux de Vichy, on ne peut guère contester l'allure des nappes artésiennes interstratifiées, qui en dérivent.

Nous donnons ci-joint deux coupes N.-S. menées près de Vichy, l'une à l'est, l'autre à l'ouest de l'Allier (fig. 36 et 37) et une coupe transversale (fig. 35). Les points de repère, résultant des sondages, sont assez nombreux pour y réduire sensiblement la part de l'hypothèse².

D'une façon générale, les sondages de la région de Vichy vont chercher les eaux minéralisées par l'acide carbonique dans une série de niveaux sableux perméables, intercalés dans la partie supérieure des arkoses sannoisiennes, qui, elles-mêmes, dans la coupe du tertiaire à Vichy, sont surmontées par les marnes à cypris tongriennes et par des calcaires aquitaniens.

Ces niveaux sableux sont assez irréguliers, au milieu de la for-

¹ Voir, sur la figure 33, la place de quelques-uns de ces travertins. La découverte récente de la source, exceptionnellement chaude, du *Dôme Thermal*, entre la Tour et Vesse, ferait supposer le passage, à peu près en ce point, d'une fracture hydrothermale profonde.

² Ces figures étaient faites et le texte composé, quand nous avons eu connaissance de la découverte du *Dôme Thermal*.

Cette source a été obtenue par sondage à 160 m. de profondeur, à 150 m. à l'ouest d'une ligne passant par Vesse et par la Tour, et à mi-chemin entre Vichy et Hauterive. Une première nappe minérale avait été traversée à 103 m. de profondeur. L'analyse de la nappe principale a donné, comme éléments principaux : Résidu sec : 5,04 gr. ; CO² libre : 2,22 gr. ; Na²O : 2,62 gr. ; K²O : 0,12 gr. D'après la coupe, qui nous est communiquée par M. de Verdière, on a recoupé : pendant 30 m., une série de marnes, avec plaquettes calcaires; puis 70 m. de marnes, avec plaquettes de calcaire ou de grès souvent pyriteux; jusqu'à la première nappe minérale. Au-dessous, le caractère des terrains s'est un peu modifié et l'on a traversé des marnes noires, brunes, bigarrées, verdâtres, etc., avec plusieurs banes de calcaire compact siliceux, jusqu'à la nappe de sable quartzeux renfermant l'eau minérale.

Celle-ci serait donc encore au sommet des arkoses, les marnes tongriennes ayant, ainsi qu'on l'avait déjà observé dans les sondages des environs de Riom (voir plus haut, p. 156 et fig. 31, p. 260), une épaisseur plus forte que ne l'aurait fait supposer l'inspection de leurs affleurements.

mation d'arkose très inhomogène et plus ou moins argileuse suivant les points. Néanmoins, nos coupes montrent la disposition générale de l'arkose¹ et les différentes nappes minérales indépendantes, qu'on y a rencontrées jusqu'ici.

Les figures 36 et 37 représentent 2 coupes N.N.E.-S.S.O, parallèles à l'Allier, à environ 2 km. de distance relative²; le passage de la coupe 37 est indiqué, sur la fig. 35, en *xy*¹.

¹ L'arkose paraît être un produit de remaniement, assez direct et peu déplacé, du fond du bassin primaire, où s'est déposé le tertiaire de la Limagne. On peut y admettre une certaine augmentation d'épaisseur sur les bords du bassin et une pente naturelle, indépendante de mouvements postérieurs.

² Outre les résultats d'observation directe du terrain, nous avons utilisé les sondages des sources Lardy et Vichy, Vesse, la Tour, nou-

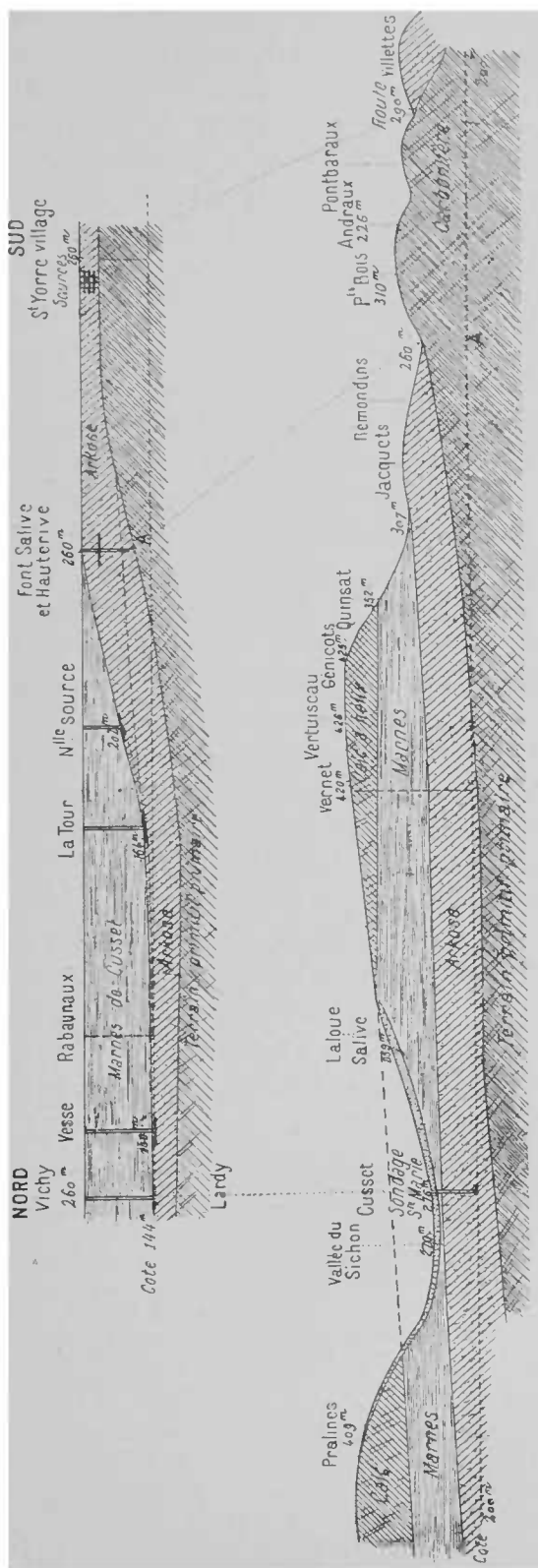


Fig. 36. — Coupe N.-S. de la région de Vichy, sur la rive gauche de l'Allier. (Hauteurs au $\frac{1}{15000}$ Longueurs au $\frac{1}{44000}$)
 Fig. 37. — Coupe N.-S. de la région de Vichy, sur la rive droite de l'Allier.

On y observe, à la partie supérieure de l'arkose, dans des sables grossiers, presque immédiatement sous les marnes imperméables, une première nappe, particulièrement constante, qu'on exploite à Vichy, à Vesse, à la Tour, à la nouvelle source d'Hauterive, peut-être à la source Sainte-Marie de Cusset, etc. Vers le sud, ce niveau supérieur de sable a été emporté par l'érosion et c'est un autre niveau qu'on utilise, sans doute, à l'ancienne source d'Hauterive ; ce sont aussi plusieurs niveaux distincts et plus profonds qu'on connaît à Saint-Yorre et au Dôme thermal. Toutes ces sources artésiennes, bien que paraissant dériver d'un même système d'infiltrations profondes, ayant suivi souterrainement des trajets analogues et minéralisées dans des conditions comparables, présentent donc, néanmoins, à l'égard les unes des autres, une indépendance relative, analogue à celle qui peut exister entre les imprégnations pétrolifères d'un même district.

Quant à l'origine première des eaux, il est évident qu'elles viennent du plateau situé à l'est de Vichy et il est possible qu'après s'être échauffées et imprégnées d'acide carbonique en profondeur, elles empruntent leur soude aux arkoses et aux tufs, qui en contiennent, d'après M. Dollfus, une proportion sensible, bien que ce soit un fait constant de trouver une prédominance de la soude dans toutes les eaux minérales en rapport avec des roches feldspathiques, même lorsque, dans celles-ci, la potasse est très prédominante²

Sources de la bordure ouest du Morvan : Bourbon-Lancy ; Saint-Honoré. — Les sources de Bourbon-Lancy et de Saint-Honoré se trouvent, à 30 km. de distance l'une de l'autre, sur le même système de fractures nord-sud, qui borne à l'ouest le Morvan et fait suite aux failles limites de la Limagne³.

velle et ancienne source d'Hauterive (rive gauche), ainsi que les nombreux sondages de Saint-Yorre et de Cusset (rive droite).

La coupe transversale (fig. 35) est plus hypothétique que les coupes longitudinales ; néanmoins, la présence de l'arkose étant déterminée par l'observation directe en *a* et *b* et par la coupe précédente (fig. 37) plus à l'ouest, en *c*, la pente assez faible (de 10 à 20° au plus), qu'on peut observer dans les terrains superficiels, ne permet pas de relier les points *a*, *b*, *c* par une courbe continue : d'ailleurs, en *b*, le niveau marnéux manque entre l'arkose et le calcaire à helix du Vernet, tandis qu'il a près de 400 mètres, plus à l'ouest : ce qui nécessite un accident brusque et probablement une faille.

A Pougues notamment, il y a, comme à Vichy, vingt fois plus de soude que de potasse.

² Voir, plus haut, figure 5, p. 56.

Bourbon-Lancy est à la limite ouest des schistes et quartzites dévoniens, sur un filon de quartz, dirigé en ce point N. 20° E.

A Saint-Honoré, on est sur la limite des tufs orthophyriques du culm, percés de microgranulites et du calcaire à entroques.

Les deux sources, très analogues de composition, sont, avant tout, des sources carbonatées à base de chaux, avec une légère proportion de chlorure de sodium (1,28 gr. à Bourbon-Lancy, 0,37 gr. à Saint-Honoré)¹.

Pougues et Fourchambault. — Les sources carbonatées de Pougues et de Fourchambault, au nord de Nérès, sont en relation nette avec une série d'accidents N.-S., bien marquée dans toute cette zone à l'ouest du Morvan² et qui se traduit, notamment, d'une façon particulièrement caractéristique : à l'est de Pougues, par les failles limites du Morvan, sur lesquelles nous venons d'étudier Bourbon-Lancy et Saint-Honoré et par l'allongement du horst de Saint-Saulge³ ; à l'ouest, par le système connu des failles du Sancerrois, sur le prolongement desquelles se trouvent, dans l'Allier, les deux petites sources de *Saint-Pardoux* et de la *Trollière*.

La faille de Pougues et de Fourchambault met en contact, auprès de Pougues, où son rejet est d'environ 100 m., le callovien inférieur et le bajocien ou le bathonien, ainsi que le montrent une carte et une coupe ci-jointes (fig. 38 et 39). Une autre faille, parallèle et de sens inverse, nommée faille de Soulangy, limite, à l'ouest, la plaine de Pougues.

M. Friedel a bien montré comment les eaux thermales, chargées d'acide carbonique et d'alcalis (empruntés en profondeur à des roches cristallines), s'élèvent là, le long de la faille de Pougues,

¹ 1828. PUVIS. *Note sur les eaux minérales de Bourbon-Lancy (Saône-et-Loire)* (Ann. d. M., 2^e sér., t. III, p. 196). — 1859. TH. EBRAY. *Sur la coïncidence des sources minérales de la Nièvre avec les failles* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XVI, p. 124). — 1859. ALLARD. *Eaux thermales sulfureuses de Saint-Honoré-les-Bains (Nièvre)*, in-8°, 19 p., Strasbourg, Silbermann. — 1881. MICHEL LÉVY et DELAFOND. *Feuille d'Autun au 1/80 000*. — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souler.*, I, 178. — 1884. LONGUY (II. DE) et C. SAUVAGEOT. *Notice sur Santenay (Côte d'Or)*, in-4°, 86 p. et 29 pl., Autun.

² Voir figure 3, p. 36 ; Cf. plus haut, pages 36, 52, 180, 184. — 1879-80. ROUBAUD (F). *Etude bibliographique et critique sur les eaux de Pougues*, in-8°, Paris, Delahaye. — 1894. DE GROSSOUVRE, BUSQUET et DE LAUNAY. *Feuille de Nevers au 1/80 000*. — 1897. FRIEDEL. *Sur les sources minérales de Pougues* (Ann. d. M., 9^e sér., t. XII, p. 589 à 638).

³ Voir *Bull. carte géol.*, 1896.

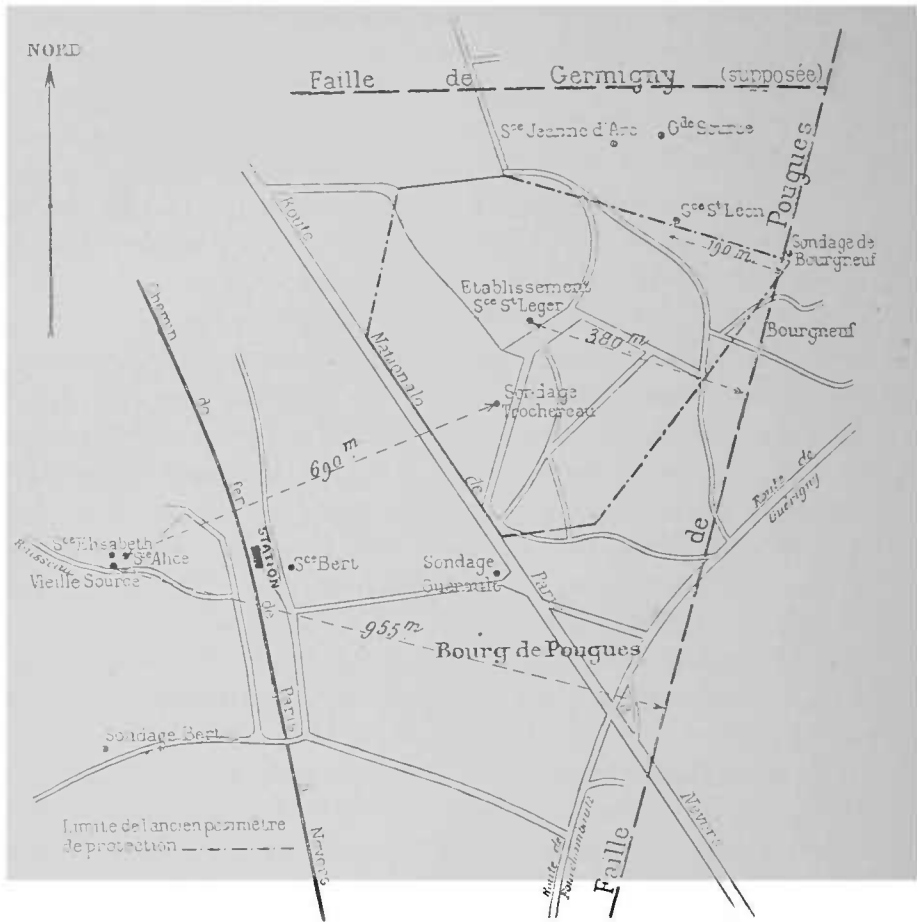


Fig. 38. — Carte de la région de Pougues (d'après M. Friedel).

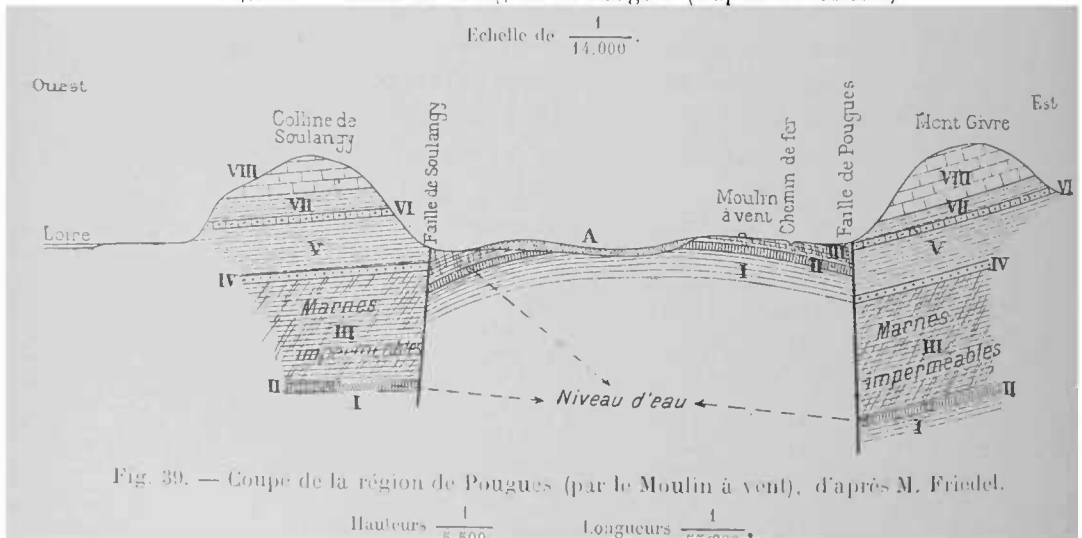


Fig. 39. — Coupe de la région de Pougues (par le Moulin à vent), d'après M. Friedel.

jusqu'au calcaire à entroques bajocien, qu'elles rencontrent à 60 ou 65 m. du sol.

Ces eaux s'éparpillent, alors, dans les diaclases de ce calcaire, où elles forment une sorte de niveau aquifère, analogue à ceux de la région de Vichy, en s'appauvrissant en alcalis et s'enrichissant, au contraire, en chaux, à mesure qu'elles s'éloignent de la faille et que leur trajet dans le calcaire, où elles se mélangent d'eaux superficielles, est plus prolongé.

Tandis que la source Saint-Léon, à 190 m. de la faille, tient 0,763 gr. de soude par litre, la source Élisabeth, qui est à 955 m., arrive à n'en plus tenir que 0,21.

L'intérêt théorique de ces sources est d'accuser, à une grande distance au nord du Plateau Central et en plein terrain jurassique, la continuation de ces dégagements d'acide carbonique, que nous venons d'observer dans toute la zone d'effondrement de la Limagne.

Bassin de Roanne et Montbrison. Beaujolais et Forez : Sail-les-Bains, Saint-Galmier, etc.¹ — Ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de le dire précédemment, la bordure des bassins tertiaires de Montbrison et de Roanne se comporte, à l'égard des sources thermales, comme celles de la Limagne. On retrouve, de même, sur les fractures qui limitent ces effondrements, des sources bicarbonatées gazeuses, généralement utilisées comme eaux de table.

Ainsi, à l'ouest de Roanne, on a, sur la bordure est du massif granitique des monts de la Madeleine, du nord au sud : *Sail-les-Bains*, à peu de distance du pointement basaltique tout à fait isolé d'Andelaroche², *Renaison* et *Saint-Alban*.

Le bassin tertiaire de Montbrison, qui forme le prolongement direct de celui de Roanne, en est séparé par une traînée saillante de tufs orthophyriques du culm, qui s'avance là au milieu de l'effondrement de la Loire, avec une direction est-ouest, comme elle le fait, plus à l'ouest, à Saint-Yorre, à travers l'effondrement parallèle de la Limagne d'Allier.

Puis on a, toujours dans les mêmes conditions, au voisinage de pointements basaltiques de plus en plus multipliés : *Sail-sous-*

Voir, plus haut, figure 5, p. 56. — 1882. LAUR. *Sur une eau thermale jaillissante obtenue dans la plaine du Forez* (C. R., t. XCIV, n^{os} 7-15, p. 405). — 1884. LAUR. *Sondage de Montrond (Loire)*. (C. R., t. XCVIII, n^{os} 16-24, p. 1069). — 1893. LE VERRIER. *Feuilles au 1/80 000 de Roanne et Montbrison*.

² Voir la *feuille de Charolles*, 1892, par MM. MICHEL LÉVY et DELAFOND.

Couzan, sur une petite fracture latérale dans les schistes précambriens, *Montbrison*, *Saint-Romain* sur la bordure ouest; *Saint-Galmier* et *Salt-en-Donzy* sur la bordure est. Entre ces deux dernières, la source de *Montrond*, sur la rive droite de la Loire, vers le centre du bassin, a été obtenue par un sondage, à 473 m. de profondeur, au voisinage d'un petit pointement basaltique, dissimulé sous la crête du château de Montrond. Elle est très chargée de gaz et paraît prouver qu'ici comme dans la région de Vichy, les filons hydrothermaux, alimentés par des mofettes d'acide carbonique en rapport avec les basaltes, donnent lieu à des épanchements latéraux, sous forme de nappes artésiennes minéralisées.

Sources du Cantal : Chaudes-Aigues. — Le Plateau Central renferme, en dehors des sources étudiées jusqu'ici, bien d'autres eaux bicarbonatées, que nous ne pouvons qu'énumérer : *Châteauneuf*¹ sur la Sioule, en rapport avec un système de fractures, manifesté, en ce point même, par des filons plombifères, qui semblent prolonger le faisceau de Pontgibaud; *Grandrif* et *Arlanc*, au sud d'Amibert, l'une à l'ouest, l'autre à l'est d'un lambeau tertiaire N.-S, qui occupe la vallée de la Dore, etc.² La plus importante est celle de *Chaudes-Aigues*³, en relation directe avec les manifestations volcaniques du Cantal et le plateau basaltique de l'Aubrac.

Ces eaux, les plus chaudes de France (81°, 5) et extrêmement abondantes, sont bicarbonatées sodiques, avec une proportion sensible d'arsenic, qui paraît caractériser fréquemment, comme nous l'avons déjà vu pour la Bourboule, le Mont-Dore et Saint-Neclaire, les eaux directement rattachées aux volcans d'Auvergne.

Bordure sud-est du Plateau Central. Vivarais, Velay : Vals, etc.⁴ — Les fractures, qui limitent le Plateau Central à l'ouest de

¹ 1854. SALNEUVE : *Sur Châteauneuf*. — 1892. L. DE LAUNAY : *Feuille de Gannat* et Bull. Soc. géol. 1896.

² *Feuille de Monistrol*, par M. TERMIER. — Cf. MAISONNEUVE. *Sur Grandrif*. — 1861. HENRY. *Analyse de l'eau de Grandrif (Puy-de-Dôme)* (Poitevin, in 8°, 14 p.). — 1832. JOYEUSE. *Analyse des eaux minérales de Souheyre (Haute-Loire)* (Ann. d. M., 3^e sér., t. I, p. 158). — 1832. ARMAND. *Analyse de quelques eaux minérales de la Haute-Loire* (Ann. d. M., 3^e sér., t. I, p. 414).

³ *Feuille de Saint-Flour* par M. FOUQUÉ (1882). — 1842. TASSY. *Dépôt stalactiforme, produit dans les tuyaux où circulent les eaux minérales de Chaudes-Aigues (bantal)* (B. S. G. F., 1^{re} sér., t. XIV, p. 71).

⁴ 1824. P. BERTHIER : *Analyse des eaux minérales de Vals (Ardèche)* (Ann. d. M.,

l'Ardèche, de Privas vers Alais et Ganges dans l'Hérault¹, ont produit jadis une des régions les plus métallisées de la France (filons de galène, de blende et de pyrite de fer, amas de calamine, etc.). Elles donnent encore lieu, vers Privas, sur l'intersection des zones basaltiques du Mézenc. à quelques sources bicarbonatées sodiques froides, dont les principales sont celles de Vals, sur un filon de quartz intercalé dans le gneiss.

L'exploitation des eaux de *Vals*, expédiées au loin comme eaux de table, porte surtout sur une nappe d'épanchement, partant de ce filon : nappe qu'on a déjà recoupée par plus de cent sondages.

Montagne Noire² : Lamalou, Sylvanès, Balaruc, etc. — La Montagne Noire, qui se rattache directement au Plateau Central, renferme, sur son flanc sud, un certain nombre de sources carbonatées, en relation très nette avec les pointements basaltiques de la région : *Gabian, Lamalou, Capus, Sylvanès³, Arène⁴, Camarès, Lacaune*, etc. Parmi ces eaux, celles de Gabian présentent cette particularité curieuse de contenir une matière bitumineuse liquide, de nature pétrolifère. Mais les seules, qui aient une réelle importance, sont celles de Lamalou.

1^{re} sér., t. IX, p. 368. — 1845. D^r DUPASQUIER. *Eaux minérales de Vals*. — 1867. D^r CLERMONT. *Eaux minérales de Vals* (J.-B. Baillière, 1 vol. in-8° de 298 p., avec note géologique par le D^r Jourdan). — 1857. J.-B. DALMAS. *Sur l'origine de la chaleur et des principes minéralisateurs des eaux de Nézac (Ardèche)* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XIV, p. 355). — 1858. AUPHAN. *Considérations médicales sur les eaux sulfuro-bitumineuses à base de chaux et de magnésie d'Euzet-les-Bains (Gard)* (in-8°, viii-108 p. Paris, J.-B. Baillière). — 1889. MINGAUD. *Tableau des eaux minérales des environs de Saint-Jean-du-Gard* (4 p. Nîmes). — 1880-81. PARRAN. *Sur une source minérale trouvée à Gagnières (Gard)* (B. S. G. F., 3^e sér., t. IX, p. 221).

¹ Ces fractures, qui se prolongent jusqu'à la Voulte, rencontrent là un système de failles, oblique sur elles, qui limite la vallée d'effondrement du Rhône. D'après M. MUNIER CHALMAS (B. S. G. F., 3^e sér., t. XXIV, p. 633 à 636), les failles de cette bordure, comprise entre Tournon et la Voulte, sont, les unes, au moins anté-stampiniennes, les autres, post-oligocènes et les dépôts de l'astien contiennent déjà de nombreux galets de phonolithe et de basalte. M. Boule est arrivé, de même, à cette conclusion que les éruptions du Mézenc et du Mégal appartiennent, soit au pliocène inférieur, soit au plus au commencement du pliocène moyen. — Voir sur cette région : 1894. BOULE. *Descript. géol. du Velay* (Bull. carte géol.). — 1894. *Réunion extraord. de la Soc. géol. dans le Velay et la Lozère* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XXI, p. 496).

² BERGERON. *Thèse sur la Montagne Noire*. Masson. 1889.

³ 1886. CARRIÈRE-MONTJOZIEU. *Quelques observations géologiques et hydrologiques sur la commune de Sylvanès et sur ses sources thermales* (Congrès int. d'hydrologie et de climatologie. Paris).

⁴ 1860. LAPEYRE. *Étude sur les eaux minérales d'Avenne* (arrondissement de Lodève (Hérault) (in-8°, 148 p. Lodève, Grillères).

A *Lamalou* (Hérault)¹ il existe de nombreux filons de quartz, plus ou moins métallifères, à travers le Keuper et les schistes siluriens.

Les plus anciens, N. 110° E., sont les plus métallifères ; les plus récents, N. 14° E., sont moins riches en plomb et cuivre sulfuré, mais souvent chargés de pyrite de fer arsenicale et de sulfate de baryte. Ce sont ces derniers, que les eaux souterraines ont suivis de préférence pour remonter à la surface et leur circulation a souvent amené, sur leurs affleurements, le dépôt de travertins siliceux et ferrugineux, notamment au pied du coteau de Lusclade.

En même temps, les eaux ont commencé par détremper et pourrir les schistes, où elles ont déterminé la formation de cavités allongées en chapelet, qu'elles ont incrustées ensuite de matières, probablement empruntées au filon voisin, telles que la baryte sulfatée, peut-être strontianifère, le quartz cristallisé ou amorphe, la pyrite de fer, le cuivre en mouches. C'est un des exemples les plus souvent cités de formations de minéraux filoniens contemporains.

Les eaux, à 47°, contiennent des traces de cuivre, nickel, cobalt, plomb, arsenic, etc.

*Balaruc*² est situé à l'est de la Montagne Noire, dans la plaine, sur le bord N.-E. de l'étang de Thau, dans une région où la présence de dislocations récentes est prouvée, notamment, par des pointements basaltiques, mais où, cependant, on ne trouve plus les dégagements d'acide carbonique, qui accompagnent les basaltes.

C'est une eau chlorurée sodique à 48°, dont le débit journalier est de plus de 3 000 hectolitres et qui subit nettement, pour ce débit, l'influence des variations de niveau de l'étang de Thau.

D'autres sources salines, en rapport probable avec les terrains permo-triasiques, se trouvent, à l'ouest de Balaruc, à *Montmajou* et *Cruzy*³, dans l'Hérault.

Celle de Cruzy est remarquable par sa richesse exceptionnelle en principes minéralisateurs (100 gr. par litre, dont 88 de sulfate

Voir plus haut, pages 64 et 143. — 1861. MOITESSIER. *Étude chimique des eaux minérales de Lamalou (Hérault)* (in-8°, 131 p. Paris, Delalaye). — FRANÇOIS. *Note sur les filons aquifères de Lamalou (Hérault) et sur le fait d'actualité de l'époque barytique aux filons de l'Uscade (Lamalou l'Ancien)* (C. R. 1861). — DE CIZANCOURT. *Lamalou*. — 1896. *Notice sur les eaux minérales de Lamalou-le-Haut* (in-8°, 52 p., Montpellier ; imp. Firmin et Montane).

1851. MARCEL DE SERRES et FIGUIER. *Analyse de l'eau minérale de Balaruc (Hérault)* (Ann. d. M., 4° sér., t. XIX, p. 237).

³ 1885. BRACONNIER. *Note sur l'eau minérale sulfatée magnésienne de Cruzy (Hérault)* (Ann. d. M., 8° sér., t. VII, p. 443).

de magnésie). Elle résulte d'un trou de sonde dans des couches verticales d'anhydrite, au fond d'une ancienne carrière de gypse épuisée.

Enfin, nous nous contenterons de mentionner, comme dépendances du Plateau Central, les eaux accidentelles sulfatées de *Cransac* (Aveyron)¹ et de *Carmaux* (Tarn)².

§ 4. — *Les Vosges*³ : *Bourbonne, Plombières, Contrexéville, Lureuil. Bussang, etc.*

Le groupe des sources des Vosges, que nous allons étudier dans ce paragraphe, présente une analogie toute naturelle avec celui des eaux de la Forêt-Noire, que nous examinerons ultérieurement.

On sait, en effet, qu'il est classique de considérer les Vosges et la Forêt-Noire comme formant les flancs d'un grand anticlinal, dont la clef de voûte, correspondant à la vallée du Rhin, se serait effondrée pendant l'époque tertiaire (définitivement à l'époque oligocène), de telle sorte que, dans la vallée du Rhin, les formations secondaires, par une suite de failles étagées, inclinent vers l'axe du Rhin, tandis qu'à partir des deux chaînes des Vosges et de la Forêt-Noire les terrains plongent, des deux côtés, vers l'extérieur de ces chaînes. Des formations éruptives récentes se sont localisées dans le massif du Kaiserstuhl, à l'est de Colmar.

La disposition des sources minérales est, comme toujours, en relation avec celle des terrains. Ces sources appartiennent, comme composition chimique, à trois catégories principales :

1° Sources souvent froides, exceptionnellement chaudes dans des zones de fracture, fortement minéralisées en chlorure de sodium ou sulfate de chaux, résultant du lessivage direct (parfois artificiel) des terrains triasiques :

1841. HENRY ET POUMARÈDE. *Des eaux de Cransac* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIX, p. 612). — 1890. AD. CARNOT. *Sur les sources minérales de Cransac (Aveyron)* (Ann. d. M., 8^e sér., t. XVII, p. 282 et C. R., t. CXI, p. 192). — 1890-91. D^r LABAT. *Les eaux de Cransac* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XIX, p. XCH).

² 1888. STAN. MEUNIER. *Remarquable dépôt de source provenant de Carmaux (Tarn)* (Le Naturaliste, 10^e année).

Voir plus haut, figure 26, page 238. — DE BILLY. *Carte géologique des Vosges* : feuilles diverses de la carte au 1,80 000^e et carte de la France au millionième.

1873. JOUVE (L.). *Bibliographie des eaux minérales des Vosges* (Soc. d'émul. des Vosges, t. XIV, p. 159 à 224). — BRACONNIER. *Mémoire sur les sources sulfatées calciques du trias en Lorraine* (Ann. de la Société d'émulation du département des Vosges, Épinal). — 1896. LABAT (D^r). *Stations balnéaires des Vosges* (Extr. Ann. d'hydrologie, Janvier, 1896, in-8^e, 47 p. Paris, 1896). — 1898. *Réunion de la Soc. géol. dans les Vosges* (B. S. G. F., 3^e s., t. XXIV).

a. A l'ouest des Vosges, sur la zone périphérique des marnes irisées : salines artificielles de *Gouhenans* ; sources salines chaudes de *Bourbonne-les-Bains* ; sources sulfatées calciques froides de *Martigny* et de *Contrexéville*, *Outrancourt*, *Heucheloup*, *Saint-Vallier*, etc.¹ ; source froide magnésienne de *Vittel*² ; salines artificielles de *Varangéville* et *Rosière-aux-Salines**, près Nancy, de *Dieuze*³, etc.

b. A l'est des Vosges (fig. 26), sur la zone de trias inférieur, qui borde la vallée du Rhin à partir de Strasbourg : sources chlorurées sodiques froides de *Chatenois* (près Schlestadt), *Soultz-les-Bains*⁴ *Niederbronn*⁵, *Wattwiller*, etc.

c. De l'autre côté de la vallée du Rhin, à l'ouest de la Forêt-Noire, sources salines chaudes à 67° de *Baden-Baden*⁷.

2° Sources dites indifférentes, alpestres ou granitiques, généralement à haute température et très faible minéralisation, émergeant de cassures ou de filons sur le pourtour du massif cristallin des Vosges : *Luxeuil*⁸ (56° au grand bain ; 1,32 gr. de principes salins, surtout chlorure de sodium) ; *Plombières*⁹ (70° au maximum ; à peine 0,28 gr. par litre) ; *Bains* (50° ; 0,30 gr. par litre).

3° Sources carbonatées froides, à l'ouest du massif volcanique du Kaiserstuhl : *Sultzbach*¹⁰ et *Sulzmatt*, dans la vallée du Rhin ; *Bussang*¹¹ dans les Vosges.

Dans l'ordre d'idées spécial qui nous a occupé jusqu'ici, à savoir les rapports entre les sources thermales et les fractures récentes du sol, nous aurons surtout à considérer les eaux salines chaudes de Bourbonne-les-Bains et les eaux indifférentes de Luxeuil,

¹ Voir la feuille de *Mirecourt* au 1 80 000^e. — 1861. HENRY. *Rapport sur une nouvelle source d'eau minérale, découverte à Contrexéville (Vosges)* (3 p. in-4°, Chaix).

² Feuille de *Mirecourt*.

³ Feuille de *Lunéville*, par M. VÉLAIN.

⁴ Feuille de *Sarrebourg*.

⁵ Feuille de *Sarrebourg*. — 1844. Analyse de l'eau minérale de *Soultz-les-Bains* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. V, p. 373).

Feuille de *Saverne*. — 1860. KULM. *Les eaux de Niederbronn* (in-8°, VIII, 200 p., Strasbourg, Berger-Levrault et C^{ie}).

Voir plus haut, p. 61 et fig. 8.

⁸ Feuille de *Lure*. Voir, plus loin, p. 283.

⁹ Feuille de *Epinal*, par M. VÉLAIN. Voir, p. 64, 193, 284.

¹⁰ Feuille de *Mulhouse*. — 1854. D^r AIMÉ ROBERT. *Notice sur les eaux acidulées, alcalines et ferrugineuses de Sultzbach*, in-8°, Strasbourg. — 1860. *Notice sur l'eau gazeuse alcaline et ferrugineuse de Sultzbach, près Colmar (Haut-Rhin)* (in-8°, 16 p., Colmar, Decker).

Feuille de *Lure*.

Plombières, Bains, etc., qui se trouvent dans la région S.-O. des Vosges, où les roches cristallines n'apparaissent plus que par lambeaux au milieu du grès bigarré, réparties sur une série de fractures de directions diverses.

Quant aux eaux salines froides, elles trouvent, dans le trias vosgien, plusieurs niveaux susceptibles de les minéraliser :

1° Au sommet du grès bigarré, un premier niveau fournit le sel des sources de Bourbonne.

2° Dans le muschelkalk, un niveau salifère, utilisé en Wurtemberg, a été retrouvé dans un sondage à Lunéville. C'est probablement aussi à des imprégnations salines du muschelkalk qu'il faut attribuer les sources de Saint-Vallier, Heucheloup, Vittel, Outrancourt, Contrexéville, Martigny, toutes situées presque au sommet du muschelkalk, sous les marnes irisées.

3° A la base du Keuper moyen, sous les grès de Stuttgart, des marnes versicolores contiennent le sel des environs de Nancy et de Dieuze, celui des sources de Niederbronn, Sultz-les-Bains et Chatenois¹

Enfin 4°, les argiles bariolées du Keuper supérieur sont parfois imprégnées de gypse.

Bourbonne-les-Bains (Haute-Marne)². — Les sources de Bourbonne sont des sources chaudes à 65°, chlorurées sodiques, se présentant sous forme de nappes interstratifiées et dont la minéralisation [7,17 gr. par litre, dont 5,12 gr. de chlorure de sodium et 1,38 gr. de sulfate de chaux] paraît empruntée aux terrains gypsifères et salifères du sommet du grès bigarré.

¹ Cf. *Gîtes minéraux et métallifères*, I, 483.

² 1826. DESFOSSÉS ET ROUMIER. *Analyse de l'eau minérale de Bourbonne-les-Bains* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. XIII, p. 223). — 1827. PRAT. *Mém. sur les eaux minérales de Bourbonne*. — 1828. MAGISTEL. *Essai sur les eaux de Bourbonne*. — 1863. DROUOT. *Notice sur les sources thermales de Bourbonne* (Ann. d. M., t. III, 148 p. et 2 pl.). — 1873. DAUBRÉE. *Sur la form. contemp., dans la source de Bourbonne, de diverses espèces minérales cristallisées*. — 1874-75. JEANNETAZ. *Observations sur la formation contemporaine, dans les sources thermales de Bourbonne-les-Bains, de diverses espèces minérales cristallisées par M. Daubrée* (B. S. G. F., 3^e sér., t. III, p. 30). — 1875. BOURGARD (E.). *Bibliotheca Borvoniensis* (Bibliographie de Bourbonne. 1 vol. in-8°. 728 p., Chaumont). — 1876. A. DAUBRÉE. *Formation contemporaine de diverses espèces minérales cristallisées dans la source thermale de Bourbonne-les-Bains* (Ann. d. M., 7^e sér., t. VIII, p. 439, et C. R., 22 fév. et 15 mars). — 1877. D^r RENARD. *Bourbonne* (Notice archéologique). — 1880. RIGAUD. *Notice sur les travaux exécutés à Bourbonne-les-Bains* (Ann. d. M., 7^e sér., t. XVII, p. 349). — 1881. TRAUTMANN. *Notice sur l'organisation du service d'hiver à l'établissement de Bourbonne* (Ann. d. M., 7^e sér., t. XX, p. 86). — 1884. RIGAUD. *Feuille géologique au 1/80 000^e de Langres*. — Voir, plus haut, p. 59, 153, 180, 193.

Ces sources (fig. 40) se trouvent sur la rive droite du ruisseau, la Borne, à environ 255 m. d'altitude. Les terrains de la région appartiennent, soit au trias, soit à l'infralias ; mais, à 9 km. à l'est,

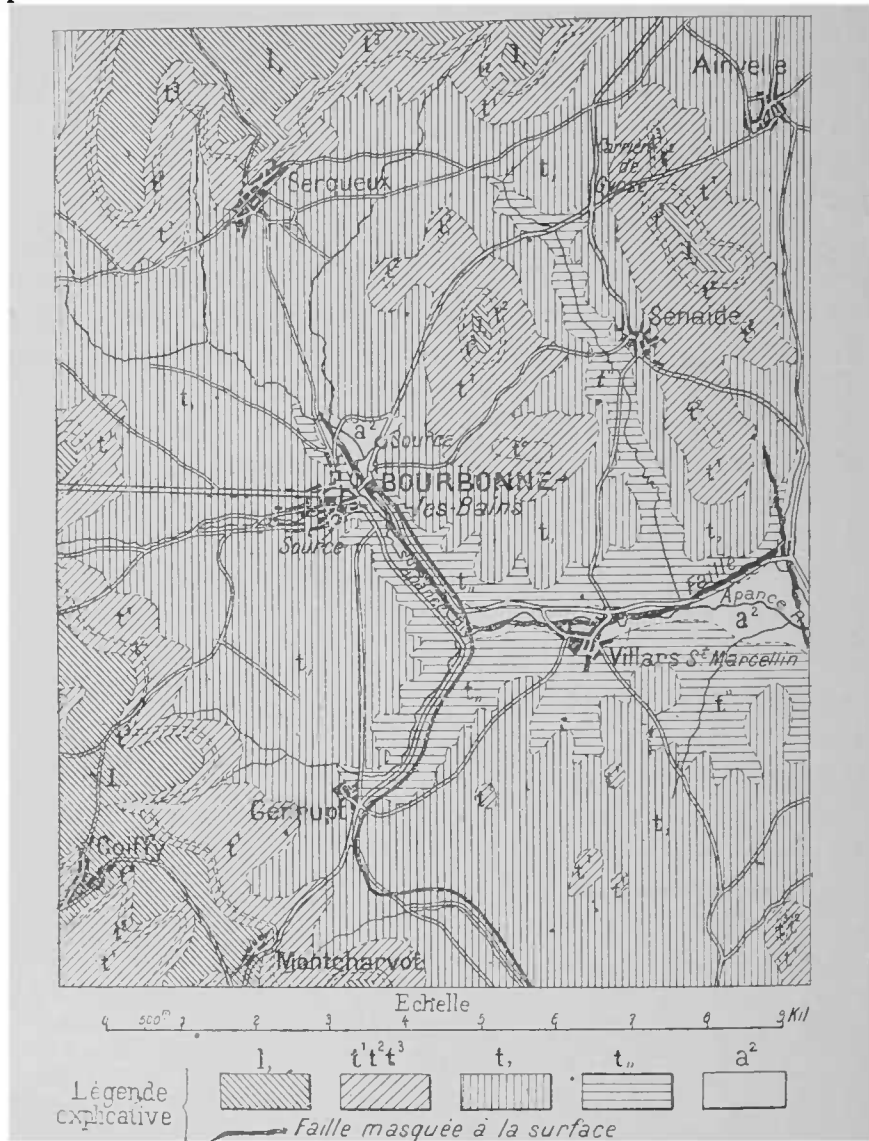


Fig. 40. — Carte géologique de la région de Bourbonne, d'après la feuille de Langres au $\frac{1}{80.000}$ par M. Rigaud.

on voit reparaître au jour, à la cote 240, vers Châtillon-sur-Saône, une crête de roches cristallines (granite, etc.), dirigée N. 40° E., sur laquelle repose directement le grès bigarré.

Ces pointements granitiques, dont le prolongement se montre encore, 32 km. plus au sud-ouest, à Bussières-les-Belmont (cote 270) et à 30 km. au N.-E., vers Passavant et Darney, marquent évidemment le passage d'un ancien anticlinal primitif, qui va, sans doute, du côté de Blaizy-Bas, à l'ouest de Dijon, relier les Vosges au Morvan.

Sur le flanc nord-ouest de cet anticlinal, les terrains triasiques ont, dans la direction de Bourbonne, une pente générale au N.-O., d'environ 1 p. 100. Les grès bigarrés, affleurant à 275 m. à Châtillon, sont, dans les sondages de Bourbonne, à 210. Au delà de Bourbonne, ces couches se relèvent, au contraire, de telle sorte que Bourbonne se trouve être au fond d'une sorte d'entonnoir géologique, qui a pu contribuer à la formation des sources. Enfin, la vallée de la Borne est marquée par une petite faille de 7 à 8 m., à laquelle on attribue également un rôle.

Sans entrer dans la description des terrains triasiques, nous y noterons la présence d'un certain nombre de niveaux perméables aux eaux, qui sont de haut en bas :

1° Dans des sables, sous le béton romain, à la base des alluvions, où circulent les eaux chaudes, que les Romains avaient captées ;

2° A la base du grès infraliasique, au-dessus des masses irisées imperméables ;

3° Dans les masses irisées, à la base de bancs de calcaire dolomitique intercalés ;

4° A la base du muschelkalk, dans une couche de sable quartzeux, au-dessus des argiles marneuses bariolées, qui séparent le muschelkalk du grès bigarré ;

5° Sous ces argiles bariolées.

C'est au premier et au dernier niveau que l'on attribue les sources thermales de Bourbonne, probablement constituées dans les conditions suivantes :

Des eaux infiltrées, soit simplement à travers le grès bigarré (comme le supposait M. Drouot) ; soit, comme l'imaginait M. Rigaud, par la faille Fresnes-Châtillon¹, auraient pénétré dans le

¹ On remarque, à ce propos (Rigaud, p. 373), que l'eau amène des débris organisés et des matières grossières, montrant que, dans la dernière partie au moins de son trajet, elle a circulé, non par infiltration, mais en suivant des cassures assez larges. (De même, à Pougues, les eaux arrivent au jour dans de larges diaclases, remplies de sables.) Il est bien hardi d'en conclure, comme le fait M. Rigaud, que ces substances ont été entraînées par l'eau dans la totalité de son circuit souterrain.

granite sous-jacent (qui doit être à une faible profondeur, en raison de son affleurement à peu de distance ¹).

Puis, remontant par un circuit artésien, en profitant des cassures du grès bigarré, elles se trouvent arrêtées par le niveau imperméable des argiles bariolées du sommet du grès bigarré et circulent au-dessous, après s'être minéralisées à un moment quelconque de leur trajet ², jusqu'à ce qu'elles rencontrent une issue, soit naturelle, soit artificielle.

Les plus anciennes sources de Bourbonne, connues dès l'époque

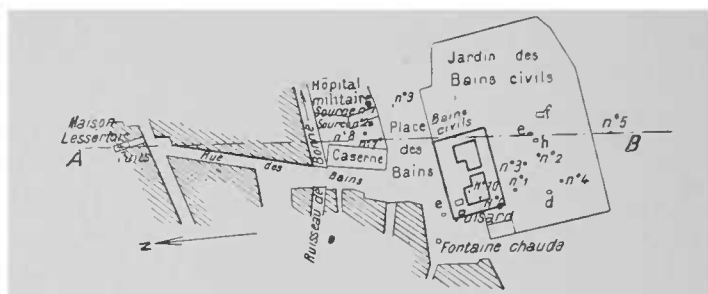


Fig. 41. — Plan général des sources de Bourbonne, d'après M. Drouot ; au $\frac{1}{5.000}$.

romaine, correspondent à des issues naturelles, ou cheminées, résultant peut-être d'une sorte de délayage des argiles et ont été captées, soit dans des puits de maçonnerie, soit dans des tuyaux verticaux de plomb. Les plus récentes ont été obtenues en 1862 et 1875 par des sondages, dont le succès a précisément prouvé l'existence de la nappe souterraine, retenue par les argiles supérieures, que nous venons de signaler. Cette nappe se trouve, en général, à environ 45 m. au-dessous de la surface.

Les figures 41 et 42 indiquent la disposition de ces sondages, dont 7 seulement sont normalement en activité.

¹ Le contact direct du grès bigarré avec le granite à Châtillon-sur-Saône prouve qu'il n'existe pas là de couches plus anciennes que le trias ; dès lors, la profondeur minima de 4 800 mètres, à laquelle l'eau a dû descendre pour arriver à 70°, rend vraisemblable sa pénétration dans le granite.

² M. Drouot rattachait la minéralisation à la dernière partie du trajet sous les argiles bariolées. Il existe, en effet, dans ces argiles, des efflorescences gypseuses. Cependant M. Rigaud a objecté (p. 354) qu'on n'y connaissait pas de gîte de sel et a supposé (p. 372) que la minéralisation pouvait se faire, beaucoup plus profondément, dans le granite ou dans un terrain dévonien hypothétique, où la supposition de gîtes de sel constituerait une hypothèse de plus. Il nous paraît beaucoup plus logique de la rattacher au trias, si souvent minéralisé dans la région. La présence du sulfure de fer dans les eaux n'est pas une objection, puisque l'existence de sulfate de fer peut facilement s'y expliquer et que celui-ci serait réduit par les matières organiques, dont on constate la présence dans la source.

Le débit des sources de Bourbonne était d'environ 300 mètres cubes par jour jusqu'aux sondages de 1875, qui l'ont porté, un moment, à 500 m³ ; il est retombé assez vite à 420.

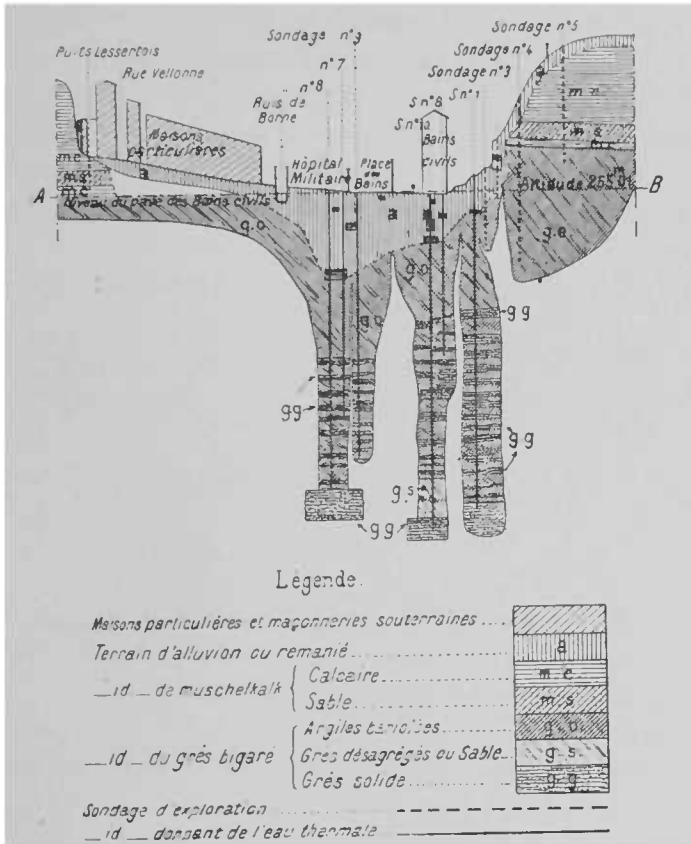


Fig. 42. — Coupe, suivant AB du plan, avec indication des terrains et de la hauteur du rejet de la faille (d'après M. Drouot).

N. B. — Les sondages sont seulement projetés.

La température des eaux de Bourbonne est très élevée. Si, dans un des sondages de l'hôpital militaire, elle descend à 42°,8, elle s'élève, dans le puisard romain, à 65°. On peut admettre, en profondeur, 70 degrés. Des observations, faites le 28 décembre 1875, ont donné :

Sources.	Température.	Débit journalier.
Sondage n° 8	41° cent.	34,6 m ³
— n° 9	45 —	28,8 —
— n° 10	65 —	123,4 —
— n° 11	61 —	61,7 —
— n° 12	64 —	108 —
— n° 13	66 —	172,8 —
Température moyenne	61 1/2	529,3 m ³

Ces eaux sont assez fortement minéralisées ; leur résidu fixe est voisin de 7,20 gr. par litre. Elles contiennent des chlorures alcalins et des sulfates. D'après de récentes expériences, la lithine y existe en quantité exceptionnelle (de 0,080 à 0,088 gr. de chlorure de lithine par litre.) Il y a des traces de fluor, d'iode, d'arsenic, d'ammoniaque et de matière organique.

L'émergence des eaux est accompagnée d'un dégagement de gaz assez abondants, évalués à 3 ou 4 p. 100 du volume écoulé et composés, presque exclusivement, d'azote, avec un peu d'acide carbonique.

D'après M. Willm, on aurait, au puisard romain :

Chlorures de sodium, potassium, lithium, calcium et magnésium	5,6608 gr.
Bromure de sodium	0,0671 —
Sulfate de chaux.	1,3550 —
Carbonates de chaux, fer et manganèse	0,0824 —
Silice	0,0604 —
Total	<hr/> 7,2257 gr.

Sources chaudes indifférentes : Plombières, Luxeuil, etc. — Toutes les sources, dont nous allons nous occuper ici, sont, d'une façon remarquable, en relation avec un système de filons de quartz et fluorine N.-E., analogues à ceux que nous avons trouvés au voisinage de sources semblables, à Bourbon-l'Archambault, Néris, etc... Ces filons eux-mêmes font partie d'un groupe d'accidents et de failles de même direction, qui a eu, sur la direction générale des vallées, entre Remiremont, Plombières et Luxeuil, une influence très nette.

Le sous-sol, qui commence à apparaître vers Plombières et se développe plus à l'est, est formé de granite, appartenant à deux types distincts : granite porphyroïde à amphibole, représenté à Plombières même et granite ordinaire à grain fin.

Les granites sont recouverts par une mince couche de poudingue grossier, représentant le grès des Vosges, immédiatement surmontée par le grès bigarré et c'est à travers le grès bigarré qu'émergent les sources de Fontaines-Chaudes, de Bains, ou de Luxeuil, dans des conditions moins nettes par suite qu'à Plombières.

Les filons, qui les recourent, sont de diverses natures :

On notera, d'abord, les filons de Château-Lambert et cette longue

suite de filons métallifères, qui, de Giromagny à Kruth (vallée de la Than) se poursuit sur 20 kilomètres de long.

Il existe également, sur la promenade des Dames, à Plombières, des filons de dolomie et oligiste, enveloppant de beaux cristaux violacés de spath calcaire.

Enfin, on connaît une série de filons thermaux, particulièrement caractérisés à *Plombières*, où ils ont été recoupés, tant par les galeries des sources tièdes ou savonneuses, que par les tranchées de la route nationale de Metz à Besançon. Ces filons de Plombières, suivis par les griffons, renferment du spath fluor, du quartz, de l'halloysite (d'où le nom de savonneuses) et du sulfate de baryte (fig. 43)¹. Nous reviendrons sur leur description.

Au *Rehercy*, on est, comme à Plombières, dans le granite à amphibole, près de son contact avec le granite à grain fin. La source est sur le prolongement d'un filon de quartz et d'oligiste, assez riche pour qu'on ait tenté de l'exploiter.

A la *Chaudeau*, on est également dans le granite et l'on peut voir les fentes incrustées de quartz et de barytine, par lesquelles émergent les sources chaudes.

Ailleurs, on est dans le grès vosgien.

A *Luxeuil*² et à *Bains*, non seulement les griffons sont dans le grès des Vosges, mais ils sont encore masqués par les constructions des bains. Néanmoins, on voit, au voisinage de Luxeuil, dans la carrière de la saline, un filon vertical de jaspe, ayant silicifié les grès au contact; et la baryte est fréquente dans ces grès. Près

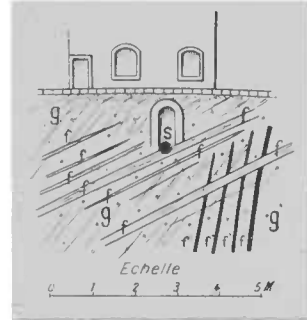


Fig. 43. — Gisement de la source Simon à Plombières (d'après Daubree). Détail de la fig. 10, p. 64.

g, granite. — ff, veines de fluorine. — ff', veines de quartz.

Voir plus haut, page 64 et fig. 10.

² On peut comparer ce gisement à celui de Bourbon-l'Archambault. — 1822. BRACONNOT. *Examen d'un sédiment des Eaux de Luxeuil* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VII, p. 198). — 1837. LONGCHAMPS. *Sur les eaux minérales de Luxeuil* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XI, p. 462). — 1838. BRACONNOT. *Analyse des eaux minérales de Luxeuil* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIII, p. 628). — 1851. CHAPELAIN. *Luxeuil et ses bains; avec recherches historiques* (Paris, in-8°). — 1855. OSSIAN HENRY. *Note sur la composition de certains dépôts qu'abandonnent les eaux minérales de Luxeuil* (in-8°, Paris). — 1866. MARTIN LANZER (A.). *Les Eaux de Luxeuil. Bibliographie* (in-8°, 164 p. Paris, Delahaye). — 1867. DORMOY. *Étude sur les eaux thermales de Luxeuil* (Ann. d. M., 6^e sér., t. XII, p. 461).

Voir encore, sur la région vosgienne: 1860. GRANDEAU. *Méthode générale d'analyse des eaux. Recherches sur la nature et la composition de l'eau minérale de Pont-à-Mousson (Meurthe)* (in-4°, 30 p. Paris, Mallet-Bachelier).

de Bains, on retrouve également de l'oligiste et de la barytine, soit en cristaux dans les géodes du granite, soit en nodules dans le grès bigarré.

Aux *Fontaines-Chaudes*, la baryte sulfatée se rencontre en cristaux volumineux sur les fentes des rochers de grès vosgien, par lesquelles s'échappe l'eau minérale.

Elle repose sur une couche mince d'aspect noirâtre, formée par un dépôt métallique.

Revenons maintenant, avec plus de détails, sur les eaux de Plombières¹

Plombières (420 mètres d'altitude) est situé sur les bords de l'Eaugrogne, au fond d'une vallée abrupte. Les sources de Plombières, qui sont au nombre de 45, fournissant, par 24 heures, 730 m³ entre 11°,43 et 69°,53, sont, comme nous l'avons dit ailleurs, de trois catégories² :

1° Sources très chaudes, au-dessus de 62°, sortant dans le thalweg du torrent, au milieu des alluvions, où elles ont été captées, d'abord par les Romains, puis vers 1858 par M. Jutier, sans qu'on soit arrivé à la roche en place³.

2° Sources chaudes, de 49 à 55°, un peu plus élevées sur les

¹ 1615. BERTHEMEN. *Discours des Eaux Chaudes et Bains de Plombières* (A Nancy. in-12). — 1833. THIRRIA. *Statistique générale de la Haute-Saône*, avec carte au 1 263.000. — 1855. O. HENRY et LHERITIER. *Hydrologie de Plombières*. — 1858. JUTIER. *Note sur les résultats, au point de vue géologique, des travaux de captage des sources minérales de Plombières* (Ann. d. M., t. XV, p. 547 et C. R., 21 juin et 2 août 1858; Ann. Soc. d'Emul. des Vosges, 8 juin 1858). — 1859. DAUBRÉE. *Mém. sur les relations des sources de Plombières avec les filons métallifères* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XVI, p. 562, et Ann. d. M., 5^e s., t. III, 227). — 1859. ED. LEMOINE. *Plombières* (Guide). 1 vol. de 179 p., chez Hachette; 2^e édition en 1867. — 1860. NICLÈS. *Remarques sur le Mémoire de M. Daubrée sur la relation des sources thermales de Plombières avec les filons métallifères* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XVII, p. 15). — 1860. D^r DELACROIX. *Notice sur Plombières et ses bains* (73 p. et une carte; voir, p. 3 à 22, la mention de divers ouvrages anciens). — 1862. JUTIER et LEFORT. *Études sur les eaux minérales et thermales de Plombières* (Extrait des Ann. de la Soc. d'Hydrol. méd., t. VII, 1 vol. in-8^o de 230 p. et 2 pl.; chez J.-B. Baillièrre, avec bibliographie étendue, p. 219 à 222). — 1^{er} av. 1862. JUTIER. *Notice manuscrite* (à l'École des Mines) *sur les travaux de captage et d'aménagement des sources de Plombières, à l'occasion de l'exposition de Londres*. — 1866. *Bibliographie de Plombières* (Lettres vosgiennes, Remiremont, 43 p.). — *Dictionnaire DURAND-FARDEL*. Article Plombières. — 1875. D^r DAVILLER. *Notice sur les eaux thermales de Plombières* (36 p. in-8^o, chez Berger-Levrault, Nancy). — JACQUOT. *Mémoire sur les eaux minérales*. — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines* (I, 280 et passim). — *Feuille au 1 80 000^e de Lure*.

Voir plus haut, p. 81. On a supposé que ce nom de Plombières (*aguæ quasi plumbeæ*) pouvait venir du réseau considérable de tuyaux de plomb, que les Romains y avaient établi pour capter les eaux.

³ Voir, plus loin, le captage de ces sources.

flancs de la vallée, et résultant du mélange d'infiltrations superficielles avec les eaux chaudes.

3° Sources tièdes ou savonneuses (de 13 à 33°), encore plus hautes et plus éloignées du thalweg, dues à la même cause que les précédentes, mais arrivant nettement au jour par un réseau de filons de quartz et de fluorine, que l'on a pu suivre et étudier¹. Ce sont, par suite, ces eaux, qui, au point de vue géologique, nous présentent le plus grand intérêt. Leur nom de savonneuses est dû à l'abondance des dépôts d'halloysite (ou saponine, ou savon minéral) souvent colorée en rose par du silicate de manganèse, qui se dépose à leur émergence².

Leur mode d'émergence est bien mis en évidence par les figures 10 et 43, dues à M. Daubrée, où l'on voit comment ces sources sont en relation avec les intersections de filons de quartz et de fluorine, visibles sur le flanc gauche de la vallée.

Sur la figure 10, et sur la ligne 43, qui en représente un détail à plus grande échelle, on voit la source Simon au milieu d'un réseau de filons, les uns presque exclusivement formés de fluorine, les autres à quartz prédominant. Le filon principal, qui a 0,20 m. à 0,30 m. d'épaisseur, est N. 150° E., avec plongement de 25° vers N. 30° E. La fluorine a, en outre, pénétré dans d'innombrables fissures du granite, de sorte que les fragments détachés de cette roche sont souvent enduits de fluorine sur toutes les faces : caractère qu'on retrouve nettement à Nérès.

La source savonneuse, dite de Luxeuil, à 35 m. au N.-E. de la source Simon, sort de veines de même nature, mais moins développées.

Enfin, à 20 m. ou 30 m. du filon de la source Simon, la route de Metz à Besançon a recoupé des filons de fluorine, le long desquels sourdaient autrefois des eaux thermales, qu'une galerie construite à un niveau plus bas a détournées en 1858.

Le captage de ces sources savonneuses a été fait par un système de galeries, où l'on a également constaté la connexité des venues thermales avec les filons de quartz, fluorine, etc.³.

Toutes les sources de Plombières sont très peu minéralisées. Les plus thermales ne renferment pas plus de 0,41 gr de matières

JUTIER. *Etude de 1862*, p. 21.

¹ Voir leur captage, dans le second livre de cet ouvrage.

³ JUTIER. (C. R., 21 juin et 2 août 1858.)

fixes par litre. D'après des analyses de M. Willm en 1880, elles contiennent :

Bicarbonate de soude.	0,0896 gr.
Bicarbonate de CaO, MgO et fer	0,0309 —
Silicate de soude.	0,0362 —
Silice en excès.	0,0707 —
Sulfates de Na ² O et K ² O.	0,1338 —
Chlorures de sodium et lithium	0,0142 —
Azotate de soude.	0,0080 —
Arseniate de soude	0,0002 —
Matière organique et perte.	0,0055 —
	<hr/>
	0,4091 gr.

§ 5. — *Forêt-Noire*¹ : *Baden, Rippoldsau, Wildbad, Cannstadt.*

Parmi les eaux les plus connues de la Forêt-Noire, les unes sont simplement salines, comme *Baden* (eaux à 70°), ou *Cannstadt* près Stuttgart (20°); d'autres sont gazeuses, comme *Rippoldsau* (sources froides ferrugineuses. au sud de Bade), ou *Wildbad* (Wurtemberg, entre Baden et Stuttgart).

La position de Baden sur le grès bigarré (à l'extrémité d'un pointement granitique²) et de Cannstadt sur le Keuper explique aisément leur minéralisation saline (29,87 gr. de résidu à Baden ; 3,85 gr. à Cannstadt).

Quant à l'acide carbonique de Rippoldsau et de Wildbad, il est peut-être en rapport avec les pointements basaltiques, qui existent dans la même région, soit à l'est (Jura souabe), soit au sud-ouest (Kaiserstuhl).

Dans la vallée de Wildbad, le granite, accompagné de porphyre, reparait au milieu du grès bigarré. Les sources, très nombreuses, y sont, en grande partie, le produit de forages artésiens, allant chercher une nappe minérale à 20 ou 25 mètres de profondeur. A Rippoldsau, on est sur le gneiss.

¹ Voir fig. 26, p. 238. — 1883. PROF. OSC. FRAAS. *Geogn. Wandkarte von Württemberg, Baden und Hohenzollern* au 1 200 000^e. Stuttgart. — 1893. RICHARD LEPSIUS. Carte géolog. de l'empire allemand au 1 500 000^e, en 27 feuilles, feuilles 23 et 25.

² Voir plus haut, p. 61 et fig. 8.

§ 6. — *Bohême : Franzensbad, Karlsbad, Marienbad, Pullna, Sedlitz, Seidschutz, Teplitz, etc...*

La richesse métallifère de cette arête montagneuse, qu'on nomme *Erzgebirge*, entre la Saxe et la Bohême, est bien connue. Là sont les mines classiques de Freiberg, Altenberg, Zinnwald, Graupen, Marienberg, Annaberg, Joachimsthal, Schneeberg, etc... Les sources thermales y sont, en même temps, nombreuses et célèbres; mais, par un phénomène, qui n'est pas simplement accidentel, tandis que tous les gîtes métallifères sont du côté nord, vers la Saxe, toutes les sources thermales actuelles sont sur le versant sud, en Bohême¹. La raison en paraît claire, lorsque l'on étudie une carte géologique (fig. 44) : c'est que ces sources thermales sont en relation directe et manifeste avec le bassin d'effondrement tertiaire, qui va d'Eger à Teplitz et avec les manifestations basaltiques qui l'accompagnent, tandis que les fractures métallisées du granite ou des terrains archéens ont dû s'ouvrir, à une époque antérieure, alors que l'axe de la chaîne était probablement plus au nord².

On sait que la Bohême, dont l'analogie avec notre Plateau Central est, à tous égards, si manifeste, offre, comme lui, un coude brusque dans les plis anciens, l'intersection de deux directions de plissements nord-est et nord-ouest, accusées ici, à l'ouest et à l'est, par les deux arêtes de l'*Erzgebirge* et du *Riesengebirge*.

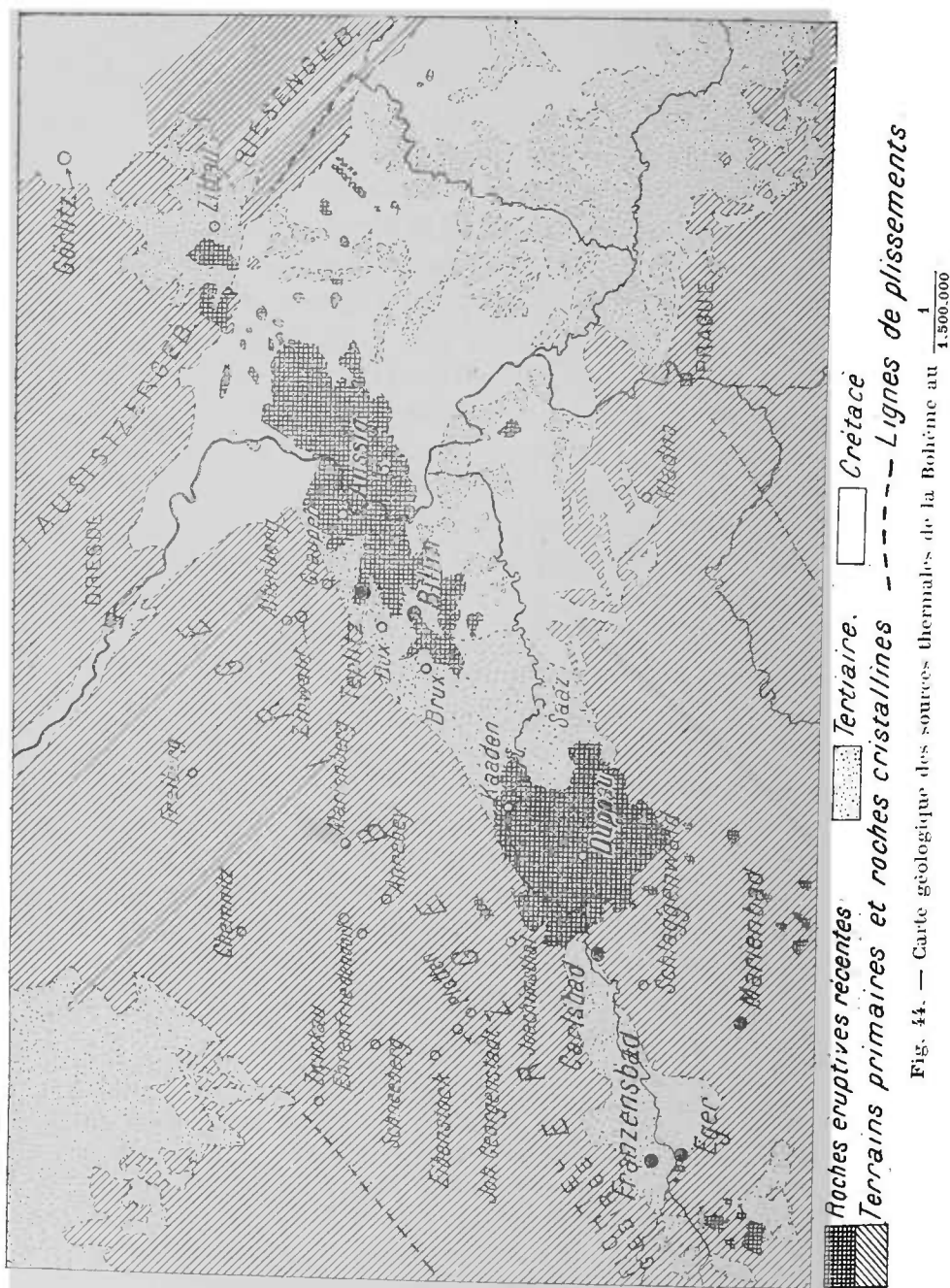
Dans toute la partie de la Bohême, située à l'ouest de l'Elbe, qui est la seule intéressante pour notre sujet spécial, la direction N. 50° à 60° E. est de beaucoup prédominante dans les plis hercyniens et cette direction, anciennement accusée, se retrouve même dans les effondrements de l'époque oligocène³, ainsi que dans

¹ Cependant les travaux profonds de certaines mines saxonnes (Freiberg, Joachimsthal, etc.), ont rencontré des veines hydrothermales, qui suivaient les anciens filons métallifères. A Zwickau (Saxe), il existe des eaux fortement chlorurées sodiques (DAUBRÉE, *Eaux souterraines*, II, 39).

² Les sources thermales sont sur le bord escarpé de l'*Erzgebirge*, dont la coupe présente la dissymétrie si fréquente dans les chaînes montagneuses (Alpes, Pyrénées, etc.) : un versant escarpé au sud, un versant adouci au nord. D'après M. Fouqué, les roches volcaniques de Bohême ont percé l'éocène, avant la fin du pliocène. Les leucites, néphélinites, etc., sont Nord-Est, comme les massifs similaires de Saxe, du *Fichtelgebirge*, de la Forêt Noire et du *Kaiserstuhl*; les phonolites et basaltes sont N.O.-S.E., ou se relie à la Thuringe.

³ Comparez, à ce propos, les vallées de l'Ebre et du Tage dans la Meseta espagnole.

les épanchements de basaltes et phonolithes, qui leur ont succédé.
Le bassin tertiaire d'Eger, que suivent les sources thermales, dans



des conditions analogues à celles que nous avons rencontrées pour le tertiaire de la Limagne, commence en Bavière vers Eger,

suit le haut cours de l'Eger jusqu'à Karlsbad, entre l'Erzgebirge et le Karlsbader Gebirge, prend là, par suite d'un décrochement perpendiculaire, une largeur triple et se continue, le long de la Bila, vers Brux, Dux, Teplitz, Aussig, jusqu'à Zittau en Saxe : après quoi, il traverse obliquement le Riesengebirge, vers Görlitz et vient aboutir en Silésie.

Si l'on se reporte à l'histoire géologique de la Bohême, on sait que ce massif est resté complètement émergé pendant l'éocène ; puis, des couches lacustres à niveaux de lignite se sont déposées pendant l'oligocène et le miocène, avec premières éruptions de basalte entre l'aquitainien et l'helvétien ¹

Les sources thermales sont en relation, soit avec les cassures limites de ce bassin tertiaire, soit avec des dislocations des roches cristallines, parallèles aux deux grandes directions de la Bohême N. 140° E. et N. 60° E., mais particulièrement, ce semble, avec les décrochements transversaux aux plis, c'est-à-dire avec des filons N. 140° E., souvent incrustés de quartz ² (Karlsbad, Marienbad, etc.).

Leur composition chimique est, comme en Limagne et ainsi qu'on pouvait s'y attendre dans une région basaltique, caractérisée, avant tout, par l'abondance de l'acide carbonique : soit qu'on ait simplement affaire à des sources froides acidulées (Sauerlinge), soit que l'eau, descendue plus profondément et par suite, plus échauffée, ait, à la faveur de cet acide carbonique, dissous les alcalis des roches et particulièrement la soude. Dans les sources les plus chaudes, il est remarquable que l'acide sulfurique et le chlore tendent à prédominer, probablement associés à la soude. Ainsi, à Karlsbad, sur 5,45 gr. de sels par litre, il y a : 2,587 gr. de sulfate de soude ; 1,262 gr. de carbonate et 1,038 gr. de chlorure de sodium ; à Marienbad, sur 9,19 gr. : 4,916 gr. de sulfate, 1,50 gr., de chlorure et 1,225 gr., de carbonate.

Une partie de ces éléments doit être simplement empruntée aux roches anciennes du pays, dont la composition est, d'après un résumé de M. de Morgan, représentée par le tableau suivant et l'on peut, notamment, expliquer l'abondance de l'acide sulfurique par

¹ En même temps, se déposaient, plus au sud, les couches tertiaires, également lacustres, de Budweis. (Voir VON HAUER, *Explication de la carte géologique d'Autriche* 1873, feuilles 1 et 2, p. 47.) Dans le sud et l'est de la Bohême, il y a eu, de Brünn à Märish Trübau, une longue lagune N.-S., où ont pénétré les eaux de la mer miocène.

² Voir *Gîtes minéraux et métallifères*, II, 585.

la présence de pyrites dans les filons mêmes que suivent les eaux de Karlsbad, Marienbad, etc...

Il est cependant probable, pour certaines eaux très minéralisées, que les sels dissous doivent provenir plutôt de quelques résidus d'évaporation tertiaire, ou de terrains contenant des débris basaltiques.

Quand la magnésie abonde en même temps que la soude, comme à Pullna, Sedlitz, etc... c'est presque toujours que les eaux ont été en contact avec des basaltes décomposés.

	SiO ²	Al ² O ³	Fe	CaO	MgO	K ² O	Na ² O
Granite	62 à 81	7 à 17	0,5 à 6	0,1 à 0,55	0,1 à 3	2 à 7	0,04 à 6
Gneiss.	65 à 76	13 à 15	2 à 7,5	1 à 3,5	0,2 à 2	2 à 5	1 à 3,5
Leptynite	63,16	23,16	»	3	0,17	9,72	0,79
Phyllites (sch. micacés argileux).	47 à 74	8 à 25	4 à 19	0 à 9	0 à 9	1 à 6	0,3 à 4
Schistes argileux primitifs.	62	26		traces	1,40	2,10	
Sch. chloriteux	52,40	38,80		6,40	»	0,40	
Sch. amphibol.	48,62	20,19	12,15	11,93	1,90	1,27	0,21
Diabases.	50	11 à 17	12 à 20	6 à 10	0,40 à 2,40	traces	3 à 4
Porphyres	60 à 81	9 à 16	1 à 10	0 à 2,80	0 à 2,80	1,30 à 8	0 à 5
Diorites	46 à 63	13 à 18	4 à 16	2 à 8	0 à 7,50	0 à 3,70	2 à 8
Mélaphyres	50 à 59	15 à 26	4 à 14,60	2 à 10,50	1 à 6,40	1,20 à 3,30	2,40 à 3

Voici, avant de passer à la description plus détaillée des sources principales, quelle est la disposition générale de l'ensemble :

En partant de l'ouest, on trouve d'abord les sources de l'Eger (*Franzensbad, Luisenquelle, Salzquelle*, etc.)¹ ; puis, dans les tourbières de la vallée de l'Eger, une foule de petites sources acidulées.

Plus loin, viennent les importantes sources carbonatées de *Karlsbad*, dont les sels principaux (sulfate de soude et chlorure de sodium) peuvent, comme nous l'indiquons plus haut, provenir du tertiaire voisin.

Les sources de *Marienbad* sont, une vingtaine de kilomètres au sud de cet alignement, en plein granite, mais encore dans la zone des éruptions basaltiques²

¹ REUSS. *Die Bäder von Teplitz*, p. 3. — 1839. ROSE (II.). *Eaux de Franzensbad* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XV, p. 568).

² De nombreux sondages faits, dans ces dernières années, dans la région de Karlsbad,

A l'est de Karlsbad, l'Eger traverse le grand massif basaltique de Duppau et, depuis son entrée avant Rodisport, jusqu'à sa sortie vers Kaaden, dans la plaine de Saaz, il n'est guère de village qui n'ait sa source minérale acidulée ou chargée de carbonate de soude (*Petersdorf, Dörfles. Wart. etc...*). Partout la soude domine, comme il arrive dans les eaux qui empruntent leurs éléments à des roches cristallines, la soude passant toujours dans les dissolutions avant la potasse.

Une fois dans la plaine de Saaz, les sources minérales changent de composition : ce qui doit être attribué à ce que les terrains tertiaires traversés ont une influence prédominante dans leurs éléments. On voit alors reparaître, comme à Karlsbad, les sels des lagunes d'évaporation, tels que le sulfate et le chlorure de sodium ou de magnésium, en même temps que l'acide carbonique diminue à mesure que l'on s'éloigne des basaltes. Comme éléments accessoires, les sources de *Stecknitz* tiennent de l'alun et du sulfate de fer; celle de *Sadschitz* et la source acidulée de *Kummern*, du sulfate et du chlorure de sodium; les sources des environs de *Pullna*, du sulfate de soude et celles de *Saidschütz, Sedlitz, Steinwasser* (au bord des marais de Gezero et Serpina), des sels amers magnésiens. Quand on arrive à l'autre bout de la plaine tertiaire de Saaz, et que, vers Bilin, reparaissent les roches primitives, on voit, en même temps, reparaître le carbonate de soude, abondant à *Bilin* et *Teplitz*.

Nous allons maintenant revenir un peu plus longuement sur les principales de ces sources, dont un tableau ci-joint (p. 292) résume les analyses :

Karlsbad². — Les nombreuses sources de Karlsbad (on en compte plus de 12) ont toutes leur griffon dans le granite (fig. 43); mais, comme elles déposent des quantités notables d'aragonite, quelques-unes sont forcées, pour arriver au jour, de traverser, naturellement

ont constaté la présence, dans les eaux, de sables de basalte. Pour certains géologues, l'eau minérale arriverait dans le basalte, à son contact avec le porphyre sous-jacent.

¹ C'est cette relation, très naturelle, de la composition chimique des eaux avec celle des roches voisines, où l'on a voulu voir un extraordinaire phénomène électrique. Pour Steffens (*Geognost. geolog. Aufsätze*, Hamburg, 1810, p. 335) et Reuss (*Loc. cit.*, p. 4), chacune des dépressions Eger Karlsbad et Rodisport Teplitz serait assimilable à une batterie galvanique, dans laquelle le pôle positif, à l'ouest, serait marqué par l'acide carbonique (Eger, Rodisport), le pôle négatif, à l'est, par la base sodique (Karlsbad, Teplitz), la recomposition des sels neutres se produisant au milieu (!).

² Voir plus haut, p. 52, 65, 74, 82 et 108.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃ Ph ₂ O ₅	FeO CO ₂	CaO CO ₂	CaF ₂	3CaO Ph ₂ O ₅	MgO CO ₂	K ₂ O	Na Cl	Na ₂ OSO ₂	Na ₂ OCO ₂	SO ₂ CO ₂	MnO CO ₂
Karlsbad (Sprudel) (1).	0,0751	0,0003	0,0036	0,3086	0,0032	0,0002	0,1784		1,0385	2,5870	1,2625	0,0010	0,0008
Marienbad (Kreutzbrunnen) (2).	„	„	0,038	0,341		„	0,636	„	1,510	4,916	1,225		„
1 Karlsbad.	Niveau au-dessus de la mer 390 ^m												
	Température. 73°,7												
	Poids spécifique. 1,00197												
2 Marienbad.	Poids spécifique 4,0091												
	Poids total des sels 5,4593												
	Poids des sels p. 100 9.19												
(1) D'après BERZELIUS (<i>Liebig-Poggendorf-Wöhler's Handwörterb. d. Chemie</i> , t. V ; cf. Ludwig, <i>Natur Wasser</i> , p. 151).													
(2) D'après TH. PETERS (<i>Liebig-Kopp's-Jahresb.</i> , p. 655).													

ou artificiellement, de véritables bancs de travertin. Les études de Von Hochstetter ont montré (fig. 46) que les eaux remontaient de la profondeur par une grande fracture dirigée N. 140° E. (H¹⁰), la *Sprudel Spalte*, à partir de laquelle, environ à 270 m. de la superficie,

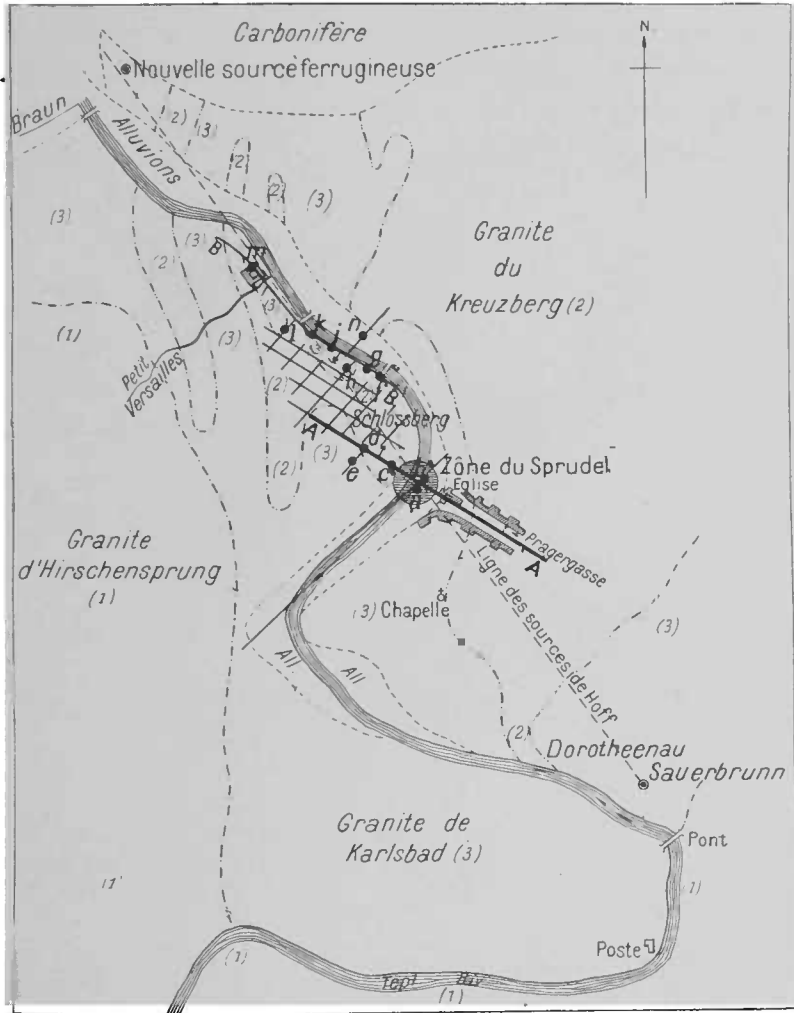


Fig. 45. — Carte géologique de la région de Karlsbad (d'après von Hochstetter).

elles se dispersent dans les lithoclastes parallèles ou transversales N. 145 à 160° E. et N. 30 à 60° E., qui découpent le granite. Beaucoup de ces fractures, qu'on a rattachées à l'époque des éruptions basaltiques, ont été, d'ailleurs, antérieurement à la venue thermique, incrustées de silice, avec un peu de pyrite et de barytine : remplissage considéré par Von Hochstetter (sans raison absolue) comme

venant des eaux superficielles et qui pourrait être également rattaché au grand système de filons de quartz, existant, sur le prolongement de ces cassures, vers Bäringen, Platten, Johan-Georgenstadt.

Pour arriver à cette conception générale, qui n'a pas été admise du premier coup, il convient de distinguer, parmi les sources de Karlsbad, les véritables sources thermales, des sources froides acidulées, parfois ferrugineuses, qui sortent de divers côtés et qui, n'étant pas chaudes, ont une origine indépendante.

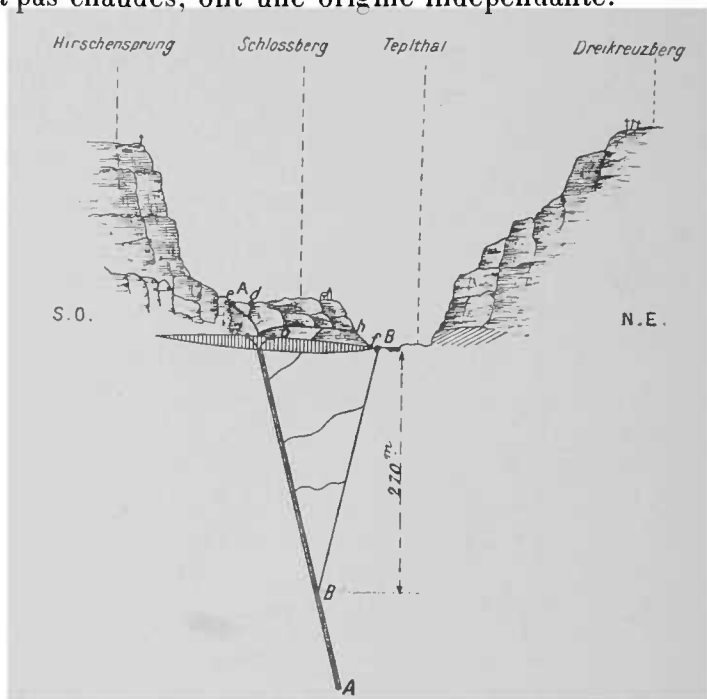


Fig. 46. — Coupe théorique des sources thermales de Karlsbad (d'après Hochstetter).

AA, fente principale du Sprudel. — abf, dépôt de travertin du sprudel. — a, Springer. — b, Hygiensquelle. — d, Schlossbrunn (fontaine du château). — e, source « zur russischen Krone ».

BB, fente secondaire de Mühlbrunnen. — f, Mühlbrunnen. — h, Theresienbrunnen.

Les principales sources chaudes (fig. 47) sont, du sud au nord, le groupe du *Sprudel* avec l'*Hygiensquelle*, le *Markibrunnen* (source du marché), le *Schlosbrunnen* (source du château), le *Mühlbrunnen*, l'*Hospital Brunnen* et la *Stefansquelle*. Elles se trouvent dans un espace assez restreint, d'environ 500 m. de long, sur une zone, dirigée dans son ensemble N. 160° E, que l'on considéra d'abord comme marquant une grande fracture du sol, appelée, du nom de son inventeur von Hoff (1825), la *Hoff'sche Quellen Linie* (ligne des sources de Hoff) (fig. 45). En vertu du principe général de la moindre pression, elles sortent toutes à un niveau très bas,

voisin de celui de la rivière la Tepl, au maximum à 15 mètres de haut, au Schossbrunnen.

Le principal point d'émergence est sur la rive droite de la Tepl, le *Sprudel* (fig. 47), qui fournit 2.800 litres à la minute et dont la tem-

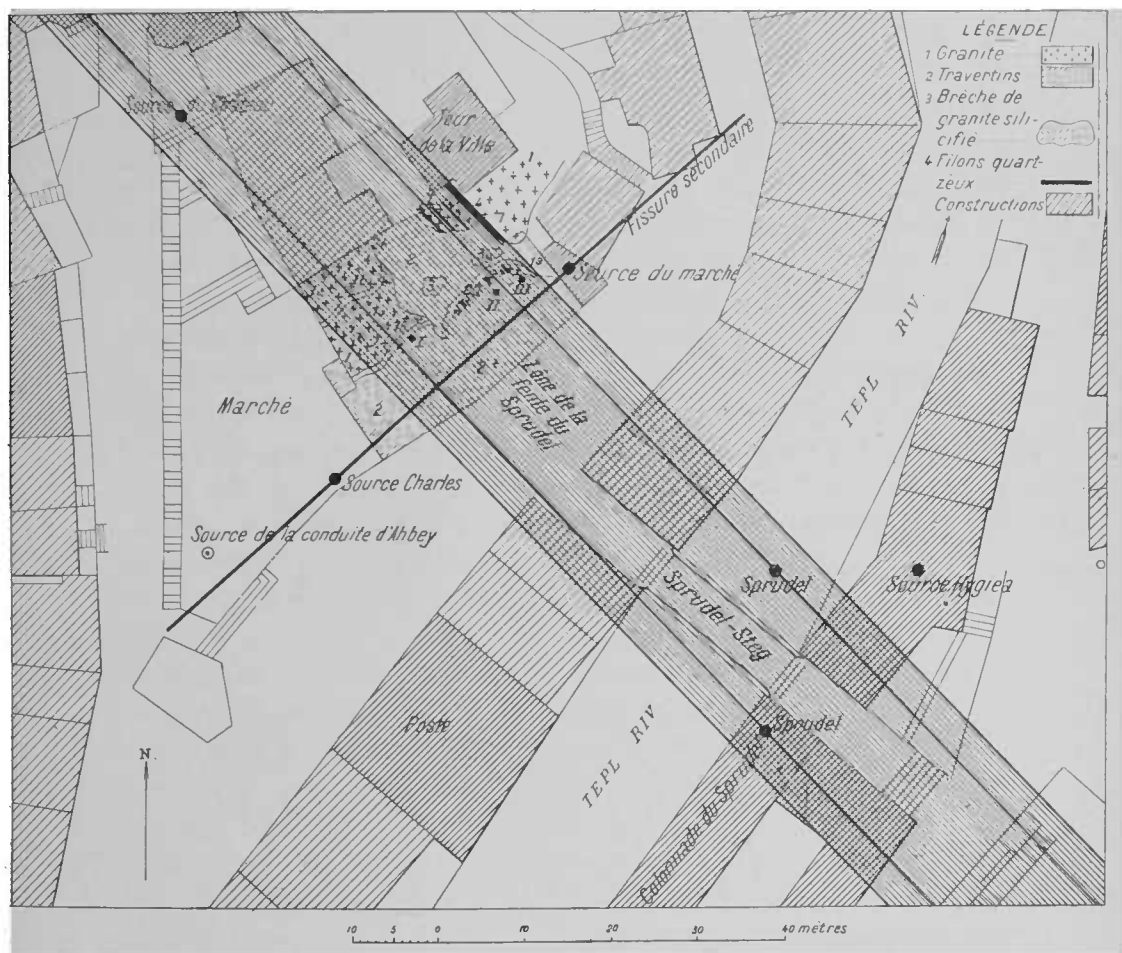


Fig. 47. — Disposition générale des zones de fractures hydrothermales à Karlsbad (d'après von Hochstetter).

Les chiffres romains I, II, III, désignent les sources découvertes en 1878 et représentées de même sur la figure 48.

pérature moyenne est de 75°. Sous ce nom de *Sprudel*, on comprend un ensemble de sources, qui, sur une superficie d'environ 100 mètres carrés, sortent en bouillonnant violemment d'un banc de travertin, la *Sprudel Schale* (fig. 46). Au-dessous de ce travertin, on a constaté, paraît-il, en 1717, d'après Becher, l'existence d'une longue et étroite vasque d'eau bouillante, ayant au moins 60 mètres

de long. Les émissions du Sprudel sont, tantôt artificielles et produites au moyen de sondages ayant percé le travertin, tantôt naturelles; mais on est obligé d'élargir, de temps à autre, ces dernières, pour les débarrasser des incrustations, qui finiraient par les obstruer.

Parmi les autres sources, quelques-unes présentent des dépôts semblables, notamment celle qui fut trouvée en 1841 au Schlossberg et celles, sur lesquelles nous insisterons bientôt, découvertes en 1878 près du beffroi; mais presque toutes sortent directement des fissures du granite, ou des veines de quartz corné (hornstein), qui, nous l'avons dit, incrustent souvent celles-ci

Toutes les autres sources présentent, avec le Sprudel et entre elles, une remarquable identité de composition, qui a été constatée par toutes les analyses (David Becher, en 1770; Klaproth, en 1789; Reuss, en 1809; Berzelius, en 1823, etc.). Seule, la proportion d'acide carbonique libre diffère notablement et, d'après une remarque de Klaproth, semblerait être en raison inverse de la température, comme si les eaux trop chaudes dégageaient, à une certaine profondeur, leur acide et ne le récupéraient qu'en partie, une fois refroidies par le voisinage de la surface, dans les couches superficielles où il se serait concentré. De cette identité de composition résulte immédiatement l'idée logique que les sources de Karlsbad ont toutes une même origine profonde.

Par contre, leur température et leur débit diffèrent beaucoup et sont même presque indépendants: la source la plus chaude après le Sprudel, le *Bernhardts Brunnen*, qui a 68°, a pu apparaître brusquement en 1783, sans que le débit des autres fût aucunement modifié. C'est ce qu'on explique en admettant que les eaux profondes, arrivées par la grande cassure du Sprudel AA (fig. 46), se dispersent dans les nombreuses cassures superficielles, où elles accomplissent des trajets indépendants, particulièrement dans une autre cassure secondaire BB, celle du *Mühlbrunnen* et de la vallée de la Tepel. Ce sont ces cassures qu'il nous reste à examiner.

Les granites du massif de Karlsbad, qui forment, au sud du bassin tertiaire, un massif symétrique de l'Erzgebirge, le Karlsbader Gebirge, présentent un certain nombre de variétés, qu'on a tour à tour considérées comme du même âge (von Hoff en 1825, Naumann vers 1870¹), ou comme d'un âge différent (von Warnsdorf en 1846, von Hochstetter, 1856-1879, etc.), sans bien trancher,

¹ Dans von HAUER. *Explic. de la carte géol.*, p. 21.

semble-t-il, la question. Ces variétés sont (fig. 45) : le granite à gros grains (grob Körnig Krystall granit) d'Hirchensprung, à l'ouest ; le granite à grains fins du Kreuzberg, à l'est, et le granite intermédiaire, à grains fins, à structure porphyrique (granit porphyr) de Karlsbad, qu'avant Hochstetter on avait confondu, soit avec l'un, soit avec l'autre des deux précédents.

Ce granite de Karlsbad, où sont concentrées toutes les sources, présente un remarquable réseau de lithoclastes très nettes, très prolongées, très planes (comme on en trouve dans le porphyre, plus souvent que dans le granite), lithoclastes dirigées H^{9-12} (135°) et H^{1-4} (45°), c'est-à-dire parallèlement aux deux grandes directions de la Bohême, qui ont joué un rôle capital dans le relief du pays et, notamment, déterminé les deux directions presque à angle droit de la Tepel, ainsi que de ses petits affluents¹. Elles sont d'un âge relativement ancien, puisque von Hochstetter croit pouvoir les rattacher au dernier grand mouvement miocène, qui a été marqué par la venue des basaltes. Leur profondeur, parfois notable, est décelée par ce fait que l'une d'elles donne issue à la source du Sprudel, qui a 73° : ce qui, en admettant un degré géothermique de 31 m., suppose au moins une profondeur de 2.300 m. ; enfin, elles présentent, très souvent, un remplissage siliceux, avec pyrite et accidentellement barytine².

Si nous ajoutons à cela que la carte géologique de von Hauer marque, sur le prolongement, de l'autre côté du bassin tertiaire, un grand faisceau de filons de quartz, on n'aura pas de répugnance à admettre qu'il y a là des filons incrustés par en bas. Cependant, von Hochstetter préfère supposer³ un remplissage par en haut, résultant de l'action des eaux lacustres tertiaires, qui contenaient de la silice, puisqu'elles en ont déposé dans des couches au mur du lignite et du sulfure de fer, puisque le lignite lui-même en renferme. Son grand argument nous paraît être que les eaux de

¹ VON HOCHSTETTER voit, dans les vallées de Karlsbad, des cassures profondes suivies par les eaux, ce qui n'est évidemment pas impossible ; on a cependant constaté, en général, que les vallées s'approfondissaient peu à peu par le travail des eaux, le long de premières cassures, tout à fait superficielles et qu'en dessous de leur lit, à une époque donnée du creusement, il n'y avait pas de cassure préexistante.

² Sur la barytine, voir : 1854. HÄNDIGER : *Barytkristalle als Absatz der neuen Militärbadhausquelle in Karlsbad* (Jahrb. der k. k. geol. Reichs., p. 146). Il n'est pas démontré que la barytine ait été déposée dans les sources ; elle paraît plutôt, comme la silice, avoir incrusté des fentes du granite. A Teplitz, on en retrouve dans les mêmes conditions dans le porphyre (Cf. REUSS, 1840).

³ *Sitzungsberichte de l'Ac. de Vienne*, t. XX, p. 24.

Karlsbad, aujourd'hui, déposent de la chaux et non de la silice ; mais il n'y a aucune raison pour que les eaux de la période tertiaire, qui ont déposé le quartz, aient eu une même composition que celles qui circulent aujourd'hui dans certaines de ces anciennes fractures réouvertes.

Quoi qu'il en soit, l'existence de la grande cassure du Sprudel et celle de veines de quartz la jalonnant et suivies par les eaux thermales se sont trouvées nettement confirmées par la mise à jour, en 1878, de griffons chauds sur la ligne désignée, vingt ans auparavant, par von Hochstetter comme représentant cette cassure (entre le Sprudel et le Schlossbrunnen) ¹

L'allure, assez curieuse, de ces nouveaux griffons est représentée en perspective par la figure ci-jointe 48.

On y voit, au-dessous du beffroi, un rocher de granite 1, traversé par de nombreuses veines de quartz ⁴, dirigées H⁹ et, au pied, des bancs concrétionnés de travertin d'aragonite 2 (sprudelstein), d'une épaisseur totale de 1,50 m., au milieu desquels sortent les sources I, II, III.

Ce travertin, dans la partie située en avant de la figure, s'est absolument moulé sur le granite, dont il renferme, à sa base, de nombreux fragments altérés et parfois pénétrés d'un réseau d'aragonite² ; à droite et à gauche, il pénètre même dans le granite. Au contraire, vers le fond, on voit s'interposer, entre le granite et lui, une masse bréchiiforme de quartz (3_a, 3_b) gris ou bleuâtre, conservant des débris de granite, qui paraît en relation évidente : d'une part, avec les veines de quartz du fond ; de l'autre, avec les sources. Ce quartz présente une particularité remarquable : il renferme jusqu'à 60 p. 100 de carbonate de fer, ce qu'il faut rapprocher de la présence de nombreuses mouches de pyrite dans certaines parties du granite.

L'importance de ce travertin ³, en ce point relativement élevé, paraîtrait prouver qu'il y a eu là jadis une source beaucoup plus importante qu'aujourd'hui⁴ ; il n'est pas impossible que, par une loi souvent vérifiée dans les sources thermales (Piatigorsk, Ragaz,

Voir fig. 47, p. 293.

² Dans d'autres points de Karlsbad, en 1713, 1717, 1842, on a trouvé, entre des travertins semblables et le granite sous-jacent, des vides non remplis.

³ On a trouvé, en d'autres points de Karlsbad, des formations pisolithiques, qui n'existent pas là. La présence des pisolithes paraît due à une source jaillissante, où le carbonate de chaux précipité est en mouvement constant.

Voir plus haut, p. 74.

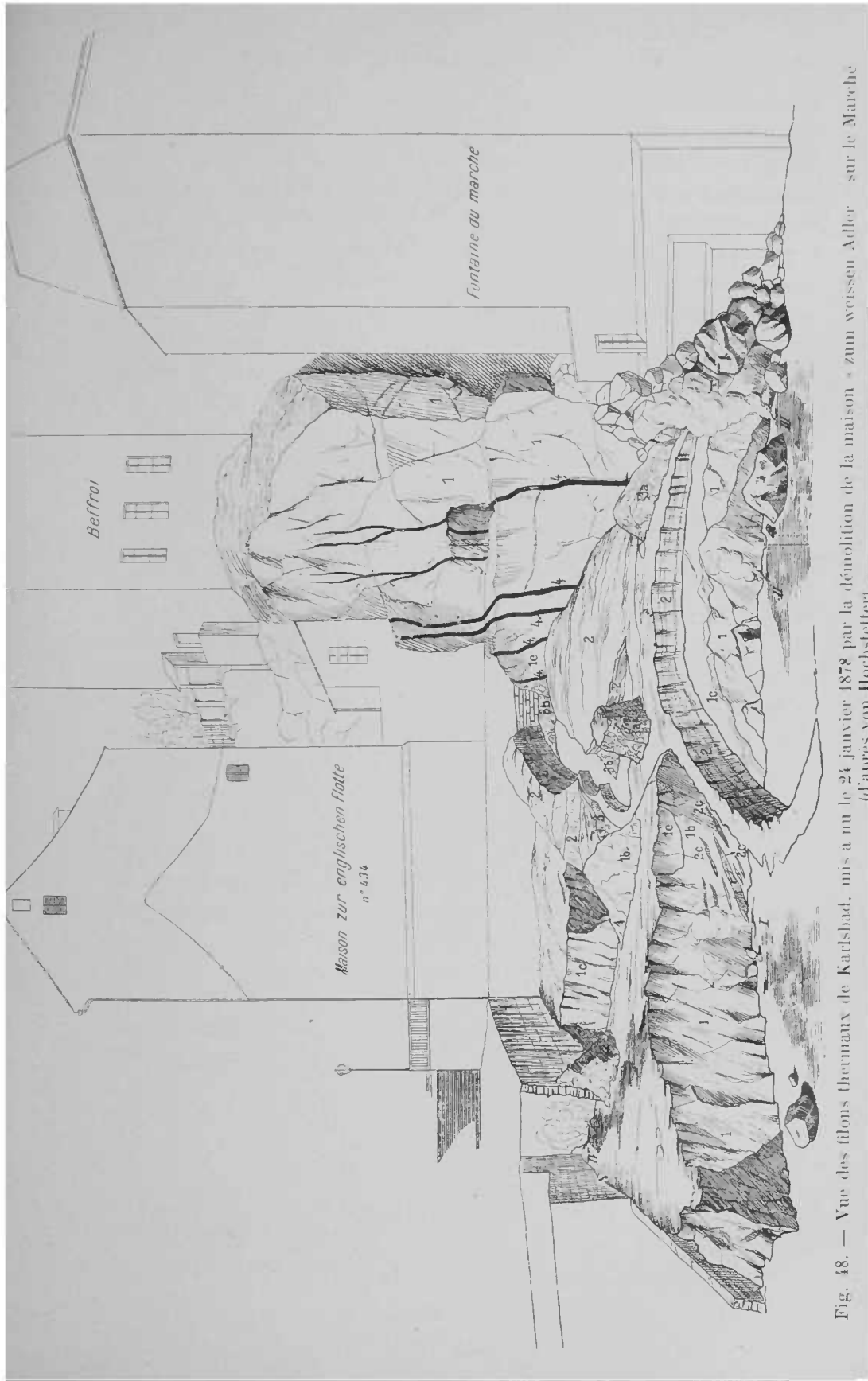


Fig. 48. — Vue des filons thermaux de Karlsbad, mis à nu le 24 janvier 1878 par la démolition de la maison « zum weissen Auler » sur le Marché (d'après von Hochstetter).

1, *granite gris* (variété granite de Karlsbad de Hochstetter) [1. granite altéré, verdâtre, à joints siliceux; 1b. granite altéré rougeâtre; 1c. granite verdâtre pyriteux — 2. *tuf d'aragonite* zoné, déposé par les sources (sprudelstein)]. — [2c. veines d'aragonite dans le granite.] — 3, *quartz Hornstein*, englobant une brèche de granite. — [3a. au toit du tuf; 3b. au mur du tuf.] — 4, veines de *hornstein* dans le granite. — I, II, III, sources thermales. — IV, canal d'écoulement de l'eau thermale.

Châtelguyon, etc.) et dont il est intéressant de mentionner des exemples à l'occasion, la source principale se soit, avec le temps, déplacée le long de la fracture, à mesure qu'elle obstruait d'incrustations ses anciens griffons, avec une tendance constante à descendre vers la vallée, qui devait s'approfondir en même temps.

Les veines de quartz, de 0,40 m. à 0,70 de large, que l'on a trouvées là, ne sont, d'ailleurs, pas un fait accidentel dans le pays; depuis longtemps, von Warnsdorf avait montré qu'il en existait deux systèmes, aux environs de Karlsbad, suivant les deux systèmes de lithoclasses : les plus gros, N. 135 à 160° E, ayant 0,25 m. et plus; les moindres, N. S. à N. 60° E, ayant 0,05 m. à 0,10 m.¹

En résumé, les eaux de Karlsbad paraissent provenir surtout d'un massif situé au S.-E. entre la Tepel à l'ouest et le basalte de Duppau à l'est : massif que va couper en deux le prolongement de la fente du Sprudel. Sur ce plateau, les nombreux dykes de basalte donnent aux eaux superficielles toutes facilités de s'enfoncer en les suivant². Ces eaux, à une profondeur d'environ 2.300 m., doivent rencontrer, après s'être minéralisées, la fente du Sprudel, le long de laquelle elles remontent; puis, comme l'indique la coupe 46, elles passent, en partie, dans les fentes secondaires du Mühlbrunnen et enveloppent ainsi tout le massif du Schlossberg, découpé en coin par ces deux fractures : massif où elles s'infiltrèrent par toutes les fissures.

Le même plateau, dans sa partie ouest, serait l'origine des sources de Marienbad, où l'on retrouve des filons de quartz analogues et de même direction.

L'importance du Sprudel tiendrait à ce qu'il se trouve à l'intersection de la cassure principale, avec une autre cassure transverse, suivant la vallée de la Tepel. Il est probable que sa position, au point le plus bas de l'intersection de la fracture avec le sol, a également une influence.

Voir fig. 45, p. 293. VON HOCHSTETTER, pour expliquer la formation superficielle des veines de quartz, a fait remarquer (*loc. cit.*, 1879, p. 15) que l'altération du granite, en même temps qu'elle produit la kaolinisation des feldspaths, met en liberté de la silice. On peut constater, d'autre part, qu'une eau superficielle, chargée d'acide carbonique et d'oxygène, produit, à la fois, une oxydation et, par l'intervention des matières organiques, une réduction : ce qui peut amener cette conséquence paradoxale de minéraux oxydés (Fe^2O^3 , FeOCO^2), etc., produits en même temps que des corps réduits (FeS , etc...) et ce qui suffit pour faire comprendre la présence de pyrites dans ce quartz.

VON WARNSDORF, au contraire (*loc. cit.*, 1846, p. 403), considérait comme incontestable que les veines siliceuses et la silicification du granite, au contact, résultaient d'anciennes sources chaudes filoniennes.

Nous retrouverons quelque chose d'analogue à Teplitz.

Marienbad. — A 30 kil. S.O. de Karlsbad, se trouvent les sources, également importantes, de *Marienbad* (fig. 49), au fond d'une dépression, où le granite reparaît, au milieu des gneiss et amphibolites (avec serpentines, etc.). A l'est de Marienbad, les terrains primitifs ont la direction N. 45 à 60° E. de l'Erzgebirge, qui prédomine

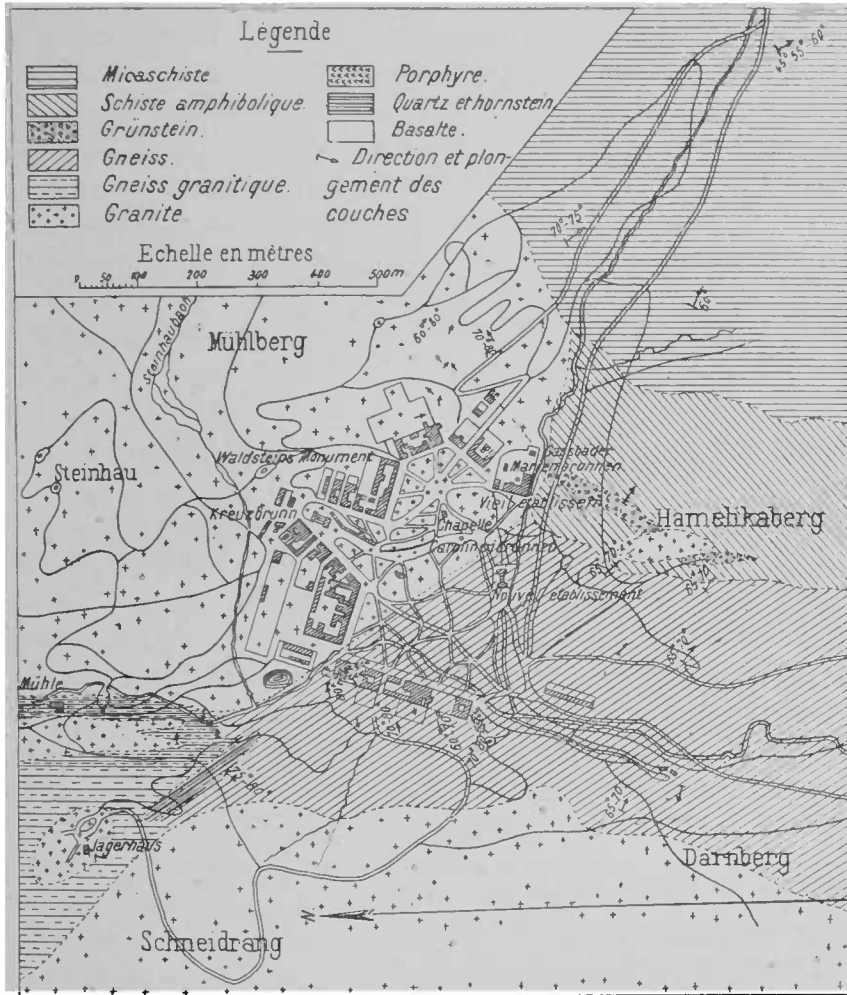


Fig. 49. — Carte géologique de la région de Marienbad (d'après von Warnsdorf).

dans l'ouest de la Bohême ; immédiatement à l'ouest, au contraire, les gneiss et les massifs de granite s'incurvent, suivant la direction N. 150° E. du Böhmerwald. Les sources de Marienbad émergent dans des conditions qui rappellent singulièrement celles où l'on trouve les eaux de Karlsbad.

Là également, on voit les sources en relation avec une série

de veines quartzieuses, qui présentent même ici une importance, qu'elles n'avaient pas à Karlsbad. Il suffit d'examiner une carte de l'ouest de la Bohême pour voir que cette région est traversée par tout un système de filons de quartz sinueux, dont la direction d'ensemble est N.-S. Le plus important suit, sur environ 60 kilomètres de long, la bordure des schistes amphiboliques et des gneiss de Furth (au sud) jusqu'à Tachau et se prolonge, peut-être, par des filons situés à l'ouest de Marienbad¹.

A Marienbad, il existe, dans le gneiss et le granite, de très nombreuses veines de quartz corné ferrugineux N. 145 à 160° E., ayant jusqu'à 1 mètre d'épaisseur et se rattachant à un grand dyke quartzieux, situé plus au nord, au Jägerhaus, dans le prolongement des sources Marie, Ambrosius, Caroline. Ce dyke a jusqu'à 10 mètres de large et contient des parties bréchiformes, composées de granite, ou d'un premier remplissage quartzieux, ressoudé par de la silice souvent ferrugineuse ou manganésifère. De l'autre côté des sources et un peu obliquement, N. 120° E., on retrouve, dans l'Hamelikaberg, un filon de quartz de 1 m. 50. De nombreuses veines latérales se ramifient dans divers sens.

A Marienbad même, cette direction de fracture ancienne, jalonnée par des veines quartzieuses, épouse précisément le contact du granite² et du gneiss, dont les schistosités lui sont à peu près parallèles et il semble que ce soit le long de ce contact que remontent les sources chaudes, à l'exception du Kreuzbrunnen, situé un peu plus à l'Est. La position des sources sur cette fracture est, d'ailleurs, déterminée par la dépression profonde, où se trouve Marienbad, à l'intersection des ruisseaux d'Hamelika, d'Auschwitz, etc.

Saidschütz, Sedlitz et Pullna. — Ces eaux, dont nous avons indiqué plus haut la situation, doivent, paraît-il, leur composition aux marnes tertiaires, provenant en partie de la décomposition du basalte, qu'elles rencontrent, sur une épaisseur de 6 à 7 mètres, à leur émergence³

¹ Les filons métallifères de Mies N. 140° E. et même ceux de Pzibram N.-S. ont, tout au moins, avec ces systèmes quartzieux, un rapprochement de direction.

² Le granite est altéré, sur une dizaine de mètres de large, comme cela arrive très fréquemment le long des filons de quartz, qui servent de plan directeur pour toutes les eaux superficielles ou profondes.

³ EM. REUSS. *Umgeb. von Teplitz*, p. 161. — DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, II, 98.

Teplitz. — Enfin, à Teplitz, les sources jaillissent, à 216 m. d'altitude, du porphyre, par une série de fentes parallèles à la direction moyenne du versant sud de l'Erzgebirge.

On peut observer, comme à Karlsbad, que les sources, assez nombreuses et de température variable, mais de composition identique, semblent toutes provenir d'une même fracture profonde, à partir de laquelle elles se dispersent dans les lithoclastes, qui découpent le porphyre de Teplitz comme le granite de Karlsbad et dont quelques-unes présentent également des incrustations de silice et, exceptionnellement, de barytine¹. Il est, d'ailleurs, certain que les eaux ont traversé d'autres roches avant d'arriver au porphyre; car quelques-unes ont apporté au jour des fragments de gneiss, granite, basalte, quartz.

D'autre part, on a constaté, à diverses reprises, que, dans la mine de lignite d'Ossegg (à l'est) (fig. 50), lorsqu'une galerie venait recouper le porphyre, elle produisait aussitôt un appel sur l'eau minérale, qui abandonnait les sources naturelles pour se précipiter sur cette issue, située à un niveau moins élevé et il en est même résulté des accidents, dont nous aurons à reparler. C'est-à-dire qu'il paraît très vraisemblable que les eaux remontent au jour, le long du contact du porphyre et du terrain tertiaire, en profitant des fissures de ce porphyre. Mais on discute encore sur l'origine première des eaux et sur leur trajet souterrain.

Pour les uns (notamment pour un géologue de Teplitz, M. Manischler), les eaux se sont infiltrées au sud, sur le plateau basaltique; pour d'autres, elles viennent de l'Erzgebirge, au nord et ont franchi en siphon le bassin tertiaire, en suivant son contact inférieur avec le soubassement de porphyre (voir fig. 50 et 51).

Les arguments en faveur de la première hypothèse sont les suivants :

1° Les eaux, comme nous l'avons dit, apportent des fragments,

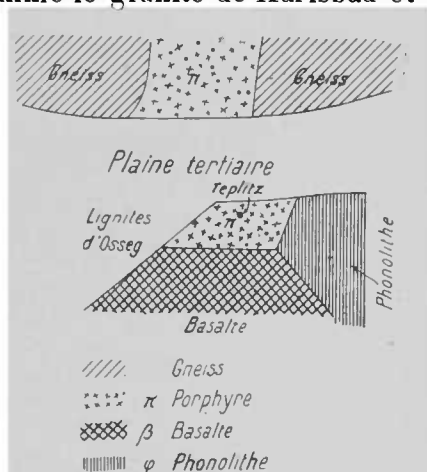


Fig. 50. — Croquis géologique de la région de Teplitz (d'après M. Brisse).

¹ REUSS. *Loc. cit.*, p. 75 et 77. Les cassures de ce porphyre (microgranulite) sont très nettes et influent notablement sur le processus de sa décomposition.

non seulement de porphyre, mais d'autres roches (quartz, basalte, granite et gneiss, au Männerbad) ¹ Lors de la catastrophe de 1887, où les eaux se précipitèrent dans la mine d'Ossegg, on a purecueillir, dans les boues ocreuses d'une des sources, des basaltes, dont l'olivine était très décomposée (d'où peut-être l'ocre des eaux) dans une pâte assez intacte.

2° Dans le fonçage d'un puits sur l'une des sources en 1879, on a recueilli un sable formé, pour 60 p. 100 de quartz et 40 p. 100

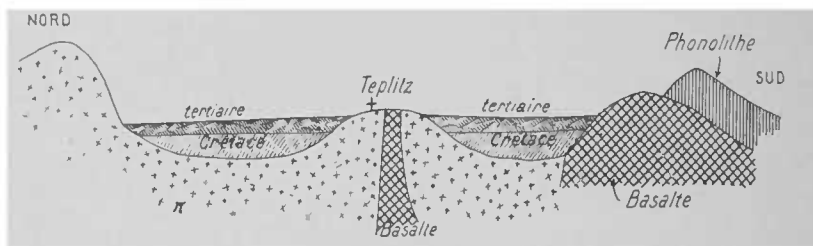


Fig. 31. — Coupe géologique théorique de la région de Teplitz (d'après M. Brisse).

de magnétite : magnétite qui ne peut guère avoir été empruntée qu'au basalte.

3° La région basaltique au sud, d'où l'on suppose que les eaux auraient pu venir, est, en effet, très aride et toutes les pluies y disparaissent par les fissures de la roche.

4° Les eaux de Teplitz contiennent 40 de soude pour 1 de potasse. Or, des expériences de Struve, en 1824, ont bien montré que, pour une roche contenant autant de potasse que de soude, la dissolution, obtenue sous l'action de la chaleur et de l'acide carbonique, renfermait 6 de soude pour 1 de potasse. Mais, en parlant des porphyres (microgranulites), qui tiennent 3 de potasse pour 2 de soude, on n'arrive encore qu'à une proportion de 4 pour 1, tandis qu'avec les basaltes (5 de soude pour 1 de potasse) on atteint 13 de soude pour 1 de potasse.

Ces sources de Teplitz, dont nous aurons à reparler pour leur captage, se trouvent : les unes à Teplitz même, les autres dans le village de Schönau, à l'est.

Les sources de Teplitz (sur lesquelles, dès 1589, on avait construit des piscines) sont : la Hauptquelle, ou Sprudel, sortant, au point le plus bas de la ville, du Syenit porphyr avec un débit très constant ; le Männerbad, la Frauenquelle, la Weiberq (au S.-E. de

¹ REUSS. *Loc. cit.*, p. 74.

la première), dans le même porphyre ; la Frauenzimmerquelle, la Sandquelle, la Gartenquelle, etc.

A *Schönau*, les sources (captées en 1759) sortent également du porphyre : Steinbad, Tempelbad, Wiesenq., Gemeinsambadq., Schlangenbadq., Schweifelbadq., etc.

BIBLIOGRAPHIE DES SOURCES DE BOHÈME :
KARLSBAD (OU CARLSBAD), MARIENBAD, TEPLITZ, ETC.

1755. JOSEPH STEPLING. *Meditatio de causa mutationis thermarum Teplicensium (factæ november 1751)*.
1792. VON BUCH. Sur **Karlsbad** (Bergm. Journ. 1792, p. 383).
1810. H. STEFFENS. *Geognos. geol. Aufsätze* (Hamburg), p. 335.
1823. BERZELIUS. *Die Quellen von Karlsbad, Teplitz und Königswart* (Gilbert; Annalen der Physik).
- 1823-1824. BERZELIUS. *Sur les eaux de Karlsbad* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VIII, p. 298 et t. IX, p. 371).
1824. BERZELIUS. *Analyse des eaux minérales de Teplitz* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. IX, p. 371).
1825. VON HOFF. *Geognost. Bemerkungen über Karlsbad* (Gotha).
1825. DR NAUMANN. *Bemerkungen über den Porphyr von Teplitz* (Zeitsch. f. Mineralogie, oct. 1825, p. 289).
- BERZÉLIUS. *Analyse des eaux minérales des environs d'Eger (en Bohême)* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. XII, p. 273).
1829. GERLE. *Böhmens Heilquellen* (in-8°, Prague).
1835. REUSS. *Die Bäder von Teplitz* (1 vol. à Prague). — Cet ouvrage contient, p. 126, une bibliographie détaillée, qui, pour le xvi^e siècle, est une bibliographie générale des eaux d'Allemagne, mais ensuite spéciale à Teplitz.
- 1835-1838. COTTA. Sur **Karlsbad, Marienbad**, etc. (*von Leonhard's Jahrb.*, p. 31 : 1838, fasc. 5).
1837. HEIDLER et V. GUTBIER. **Marienbad** (Prague).
1838. L. FLECKLES. **Karlsbad** (*seine Gesundbrunnen* (Stuttgart).
1838. NÖGGERATH. *Ausflug nach Böhmen* (Jahrb. d. k. k. geol. Reichs., t. V, p. 146, Bonn. 1838).
1839. H. ROSE. *Remarques sur les eaux minérales de Franzensbad (Bohême)* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XV, p. 568).
1842. E. HLAWACZEK. **Karlsbad** (Prague).
1843. KAPP. *Sur les granites de Karlsbad* (N. Jahrb. f. Mineral., 1840, p. 379 et 1843, p. 317).
1843. SCHMIDT. Sur **Marienbad** (Berg und Hüttenmannische Zeitung).
1844. V. WARNSDORF. *Geognostische Erinnerungen an Marienbad* (avec carte géologique) (*Leonhard's Jahrb.*, 1844, p. 409, et 1846, p. 401).
1845. Q. BISCHOF. Sur **Marienbad** (*Leonhard's Jahrb.*, 1845, p. 419), discussion avec V. Warnsdorf.
1845. KERSTEN. *Chem. Untersuchung Marienbader Mineralien* (*Leonhard's Jahrb.*, p. 659).
1845. KOCH. *Die Mineralquellen des gesammten österreichischen Kaiserstaats* (in-8°, Vienne, avec bibliographie pour chaque source thermale).
1846. V. WARNSDORF. *Einige Bemerkungen ueber die Granite von Karlsbad* (N. Jahrb. für Mineralogie de Leonhard, 1846, p. 385).
1854. HADINGER. *Barytkristalle als Absatz der neuen Militärbadhausquelle in Karlsbad*.

1854. D^s FRANZ BERTHOLD et JOSEPH SEICHE. *Medicinische Jahrbuch der Thermal Quellen von Teplitz Schönau* (contient une bibliographie complète et chronologique sur Teplitz).

1855. C. JAMES. *Etude sur les eaux minérales de la Bohême* (in-8°, Paris, Malteste).

1856. VON HOCHSTETTER. *Karlsbad, seine geognostischen Verhältnisse und seine Quellen* (Karlsbad). — Sitzungsber. der. Ak. des Wissensch., t. XX, p. 13, avec carte géologique).

1858. JOKÉLI. *Der nördliche Theil des Liesener Vulcan Mittelgeb. in Böhmen* (Jahrb. l. k. k. geol. Reichs. 1858, IX, 432).

1862. REUSS. *Carlsbad, Marienbad und Franzensbad* (Prague et Karlsbad).

1862. LUDWIG. *Die natürlichen Wässer*, passim (composition chimique de Karlsbad, Marienbad, Teplitz).

1866. C. NAUMANN. *Ueber den Granit des Kreuzberges bei Karlsbad* (N. J. f. Miner., 4^e année).

1876. SCHINDLER. *Situations Plan der Stadt Karlsbad*.

1879. V. HOCHSTETTER. *Ueber einen neuen geolog. Aufschluss im Gebiete der Karlsbader Thermen* (Denks der Ak. des Wissensch. Wien., 1879, t. XXXIX, p. 1).

LABAT. Sur **Teplitz** (*Soc. d'hydrologie médicale de Paris*).

1881. LAGRANGE. *La marée souterraine de Dux* (Ann. de Chimie et Physique).

1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, I, 285 à 288 ; sur **Teplitz**, II, 488 ; sur **Marienbad** et **Karlsbad**.

1889. *Sondage de Teplitz* (OEst. Zeits. f. Berg und Hüttenwesen, n° 26).

CHAPITRE III

LA CHAÎNE ALPESTRE ET SES RAMEAUX SECONDAIRES : PYRÉNÉES, ALPES, APENNINS, CARPATHES, ATLAS, CAUCASE, ETC.

La chaîne alpestre, dont M. Suess a, dans une synthèse célèbre, montré l'unité sur toute la bordure méridionale de l'Eurasie, comprend, on le sait, quand on l'entend au sens géologique, non seulement les Alpes proprement dites, mais aussi leurs prolon-

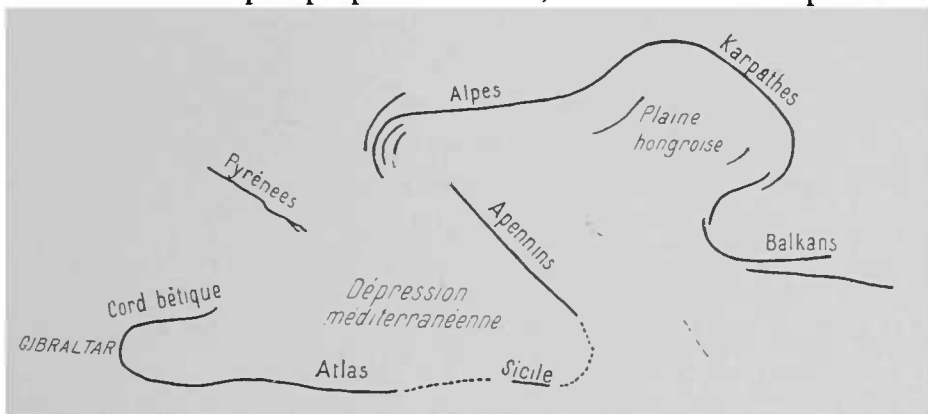


Fig. 52. — Schéma des lignes directrices du système alpin (d'après M. Suess).

gements des deux parts : Carpathes et Balkans, enveloppant d'un demi-cercle la dépression hongroise ; Apennins, Atlas et chaîne bétique, encadrant de même la fosse méditerranéenne (fig. 52).

Dans cet ensemble si homogène, les Pyrénées, qu'on peut raccorder, d'un côté aux Alpes par les plis de la Provence, de l'autre à la Meseta espagnole par les Asturies et la Galice, jouent un rôle tout à fait spécial, qui correspond, en partie, avec l'existence probable, sur leur emplacement même, d'un premier pli hercynien, auquel s'est superposé le grand plissement éocène et avec l'âge du dernier plissement tertiaire de cette chaîne, plus ancien que celui des Alpes. C'est un chaînon divergent, de sens

O.-N.-O.-E.-S.-E., dont la rectilignité plus grande que celle des autres chaînes (pour la plupart fortement incurvées), se traduit, à tous égards, par plus de symétrie entre les deux versants. Nous commencerons par l'étude des sources pyrénéennes, — qui sont, d'ailleurs, chimiquement, d'un type très spécial —, avant de passer à celle des Alpes proprement dites.

§ 1. — Pyrénées¹

1° Sources sulfurées sodiques : *Amélie-les-Bains, Ax, Bagnères-de-Luchon, Barèges, Saint-Sauveur, Cauterets, Eaux-Chaudes et Eaux-Bonnes* ;

2° Sources salines : *Reunnes-les-Bains, Ussat, Aulus, Salies, Bagnères-de-Bigorre, etc.*

La chaîne des Pyrénées proprement dite est, surtout sur son versant français, remarquablement riche en sources thermales, qui sont, pour la plupart, d'un type assez spécial et qu'on ne retrouve guère dans les autres parties de notre pays : le type des eaux sulfurées sodiques. Dans l'est seulement, où l'existence de manifestations éruptives récentes est prouvée, notamment, par des

¹ Nous donnerons ultérieurement la bibliographie spéciale des diverses sources pyrénéennes. Comme ouvrages généraux, on peut consulter :

1748. THÉOPHILE DE BORDEU : *Lettres contenant des essais sur l'histoire des eaux minérales du Béarn*. — 1756. CARRÈRE : *Traité des eaux minérales du Roussillon*. — 1762. RAYMOND-FRANÇOIS CASTETBERT : *Traité des eaux minérales de la Guyenne et du Béarn* (Bordeaux). — 1832. DUFRÉNOY : *Sur les relations des ophiles, des gypses et des sources des Pyrénées et sur l'époque à laquelle remonte leur apparition* (B. S. G. F., 1^{re} sér., t. II, p. 410). — 1837. FORLIES : *Sur les températures et les rapports géologiques de certaines sources thermales et particulièrement de celles des Pyrénées* (B. S. G. F., 1^{re} sér., t. VIII, p. 250). — 1853. J. DUCROCHER : *Sur le gisement et l'origine des eaux sulfureuses pyrénéennes* (B. S. G. F., 2^e sér., t. X, p. 424). — 1857. D'ARCHIAC : *Sur les sources minérales et thermales des départements de l'Aude et des Pyrénées-Orientales* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XIV, p. 505). — 1858. LALLIER : *Bains des Pyrénées*. — 1859. FILHOL : *Recherches sur l'alcalinité comparée des eaux sulfureuses des Pyrénées* (in-8°, 49 p., Toulouse, Douladour). — 1866. LOUIS MARTIN et FÉLIX GARRIGOU : *Application du réseau d'Él. de Beaumont aux eaux*. — 1867. GARRIGOU : *Travaux divers sur les eaux des Pyrénées* (B. S. G. F., 2^e s., XXIV). — 1867. NAUSSENAT : *Bibliographie pyrénéenne* (Soc. Ramond). — 1868. *Eaux minérales de l'Ariège* (Ann. d. M., 6^e s., t. XIV, p. 570). — 1873. GARRIGOU : *Généralités sur les eaux minérales des Pyrénées* (in-8°, 46 p., Paris). — 1876. A. D'ASSIER : *Les eaux du Caucase et les eaux des Pyrénées* (Revue scientifique de la France et de l'étranger, 2^e sér., 6^e année, p. 515). — 1882. BONNANS II : *Eaux minérales de l'Ariège* (Thèse à la faculté de Médecine, avec bibliographies). — 1886. GARRIGOU : *Relations entre les sources thermales et les failles. Direction générale des Pyrénées* (Congrès d'hydrologie et de climatologie. Paris, Doin). — 1892. DE MARGERIE et SCHRADER : *Aperçu de la structure géologique des Pyrénées* (Ann. du Club alpin).

effondrements tertiaires et par les volcans de Catalogne, on rencontre quelques sources bicarbonatées, qui se développent surtout, plus au nord, vers les Cévennes, dans la région basaltique comprise entre Béziers et Lodève, au sud de la Montagne Noire. Enfin, la présence du trias, avec des gisements de gypse et de sel, amène, sur les deux versants, l'existence de toute une série de sources salines froides ou chaudes (Petites-Pyrénées, Corbières, etc.).

Les sources chaudes sulfurées sodiques, les plus intéressantes pour nous par leur thermalité, forment, soit en France, soit en Espagne, une trainée presque continue le long des Pyrénées, partout où apparaissent les terrains primaires, dont la présence paraît être nécessaire à leur production. Si on se borne toutefois aux sources françaises, qui sont de beaucoup les plus fameuses, on les trouve rassemblées en deux groupes principaux : le premier à l'est, allant du bord est du Canigou au Val d'Andorre (fig. 53); le second entre Bagnères-de-Luchon et les Eaux-Bonnes.

Quelques-unes d'entre elles ont un débit d'une abondance tout à fait extraordinaire, comme Ax, Cauterets ou les Graus d'Olette (22 000 hectolitres par jour pour cette dernière source) : ce qui montre l'importance et les dimensions des fractures, par lesquelles les eaux remontent au jour.

On peut, d'ailleurs, remarquer que, tout en étant très caractérisées, chimiquement et médicalement, par la présence du sulfure de sodium et de l'hydrogène sulfuré libre, les eaux thermales des Pyrénées rentrent, en réalité, par leur très faible minéralisation, dans le type des eaux indifférentes ou alpestres.

La géologie de la chaîne pyrénéenne est malheureusement encore trop peu connue pour que nous puissions essayer de rattacher, d'une façon bien rigoureuse et précise, les accidents de détail, qui donnent lieu aux sources thermales, à l'ensemble des mouvements tectoniques de la région. Néanmoins, l'examen d'une carte géologique d'ensemble, telle que celle de MM. de Margerie et Schrader¹ met en évidence quelques faits très généraux qu'il peut être intéressant de rappeler.

Ce qui domine tout d'abord dans les Pyrénées, c'est la disposition par bandes O.-N.-O.-E.-S.-E. de tous les terrains cristallophylliens,

Aperçu de la structure géologique des Pyrénées (Ann. du Club alpin, 1891), avec carte au 1/800 000^e. Voir encore la thèse de M. ROUSSEL (Bull., carte géol., n° 35, 1893), le mémoire complémentaire du même (Bull., carte géol., n° 52) et la feuille 30 de la carte d'Europe au 1/4 500 000^e, parue en 1897.

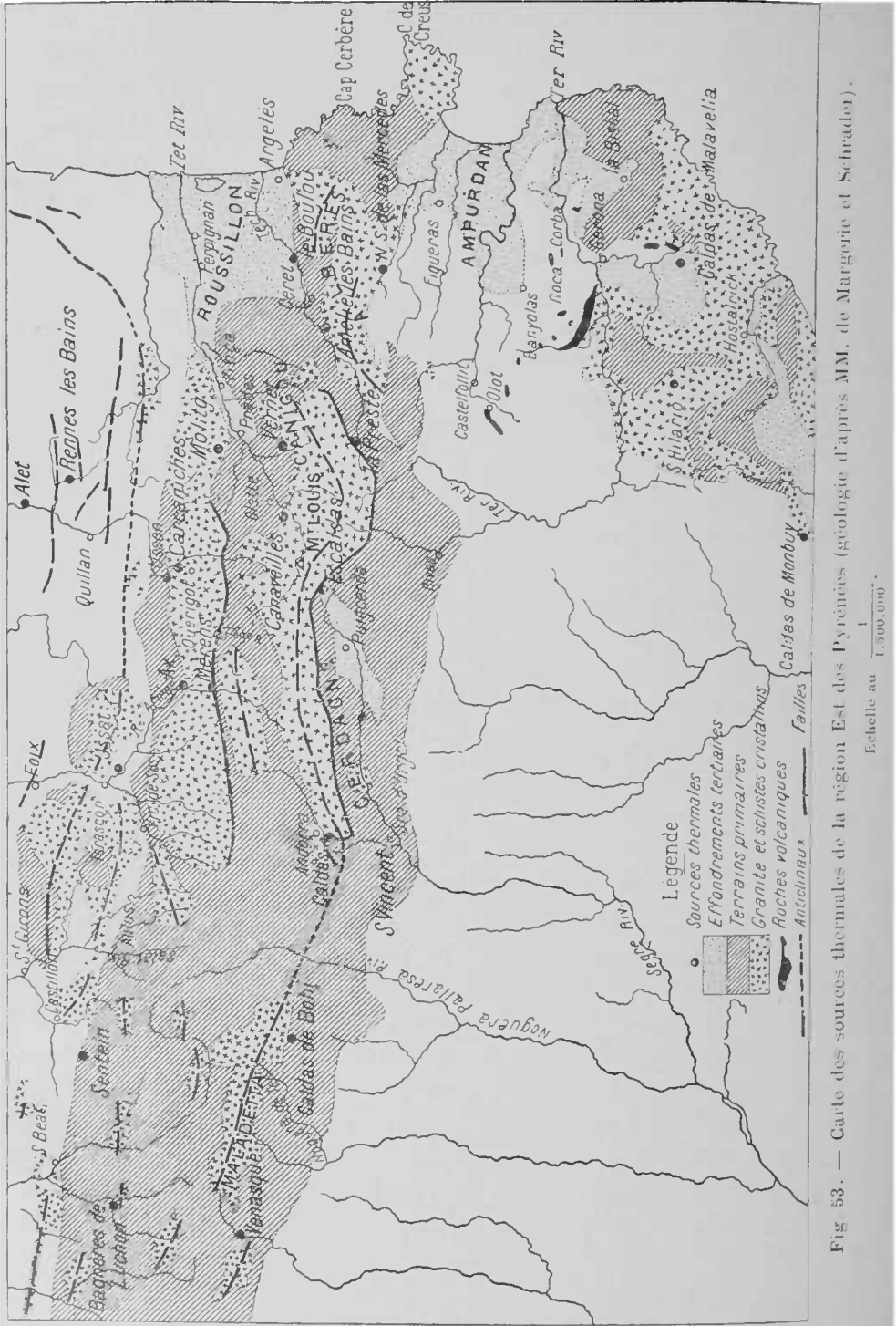


Fig 53. — Carte des sources thermales de la région Est des Pyrénées (géologie d'après MM. de Margerie et Schröder).

Echelle au 1/300.000.

primaires, triasiques, jurassiques, créacés ou tertiaries, qui cons-

tituent la chaîne ¹ et l'allure, également N.-O.-S.-E., de la plupart des accidents, qui mettent ces terrains en contact anormal en les disloquant et qui, par suite, sont, avec les contacts de roches cristallines et de schistes, dont nous parlerons plus loin, fréquemment intervenus pour la production des sources thermales.

Cette allure se prolonge assez loin au nord-est des Pyrénées, vers la Montagne Noire et l'on peut remarquer, incidemment, combien le raccordement des Pyrénées avec le Plateau Central, — qui semble, au premier abord, sur une carte orographique, se faire si facilement par les Cévennes et les Corbières, — est, en réalité, contredit par la direction transversale des chaînons locaux.

Les Corbières forment, géologiquement, un massif tout à fait isolé entre deux géosynclinaux anciens, représentés : l'un, par la dépression du canal du Midi et de Carcassonne, où reposent des assises éocènes non dérangées ² ; l'autre, par l'emplacement actuel des Petites-Pyrénées (de Tuchan au Mas d'Azil), où se sont déposées de grandes épaisseurs de trias, jurassique et crétacé ³.

Au contraire, malgré la coupure récente, qui tranche les Pyrénées à l'est et amène la Méditerranée au cap de Creus, on peut imaginer le raccordement des Pyrénées avec les Alpes : les Basses Cévennes se relieraient alors à la zone subalpine dauphinoise ⁴ et les plis de l'Aude et du Roussillon iraient, à travers le golfe de Lyon, rejoindre ceux du Var et des Bouches-du-Rhône.

Une carte schématique de M. de Margerie, que nous reproduisons (fig. 53), met en évidence une série d'anticlinaux, marqués par des massifs granitiques ou cristallophylliens. C'est, d'une façon très générale, à la périphérie de ces massifs cristallins, sur leur contact avec les schistes paléozoïques ou le long de filons granulitiques recoupant ces schistes, que se trouvent les principales sources thermales sulfurées. Leur haute température et l'abon-

¹ Ces zones géologiques sont obliques sur la direction orographique de la chaîne.

² DE MARGERIE. *Note sur la structure des Corbières* (Bull., carte géol. n° 17, 1890).

³ DE MARGERIE. *Structure des Pyrénées*.

⁴ KILIAN. *Description de la montagne de Lure*, 1888, p. 399 (carte schématique). — DE MARGERIE. *Note sur les Corbières*, p. 32 et carte. Pour ce dernier géologue, l'existence du golfe du Lion ne daterait que de la fin de la période oligocène et se serait, par conséquent, produite en même temps que l'effondrement du bassin de Vienne, dont nous avons déjà signalé, d'après M. Suess, l'analogie tectonique avec lui (Cf. *Antlitz der Erde*, I, 337, 425). Mais, peut-être, y avait-il eu, au contraire, antérieurement, deux chaînes distinctes : Plateau Central, Montagnes Noires, Pyrénées ; Alpes, Apennins, dont la jonction ne se serait faite que momentanément, pour être bientôt interrompue.

dance de leur débit semblent montrer leur relation avec d'importantes fractures du sol. Quant à leur minéralisation, qui comprend, en général, sulfure de sodium, chlorure de sodium, carbonate de soude, silice libre, avec des traces assez constantes de bore et de lithine, on pourrait peut-être la rattacher simplement à la composition habituelle de ces roches en contact : d'une part, les granites et granulites, fournissant les alcalis, avec le bore, la lithine, la silice en excès ; d'autre part, les schistes paléozoïques, où la présence des sulfures métalliques, et spécialement de pyrite, est constante, donnant le soufre qui se combine au sodium¹

Dans la plupart des cas, les eaux sembleraient s'être infiltrées par les fractures des massifs granitiques et remonter de 2 ou 3 000 mètres de profondeur, sur la faille du contact de ces granites, en dissolvant les sulfures des schistes à la faveur de leurs alcalis.

Nous allons maintenant parcourir la chaîne de l'est à l'ouest, en décrivant, au fur et à mesure, les sources principales et laissant seulement de côté, pour le moment, les sources salines de la zone secondaire.

Si nous partons de l'est des Pyrénées, nous trouvons, le long de la Méditerranée, une ligne d'effondrements et de manifestations éruptives N.-S., caractérisée par les *trous* du Roussillon, de l'Empordan, entre Figueras, Banyolas et la mer, de la Bisbal, de Gérone à Caldas de Malavella, puis d'Hostalrich et Tarrasa, ainsi que par les volcans quaternaires d'Olot, Castelfollit, Rocca Corba, etc.²

Cette zone de fractures, qui se prolonge au sud le long de la côte espagnole, est, comme nous le rappelions plus haut, la seule région de sources carbonatées dans les Pyrénées.

Là se trouvent, en Espagne, à partir de Barcelone (fig. 28, page 243, et fig. 53), les eaux de *Caldas de Monbuy*, *San Hilario*, *Caldas de Malavella*, déjà mentionnées plus haut, puis *Valle de Rivas* (près Puigcerda), et, en France,

¹ Il n'est pas probable que ces eaux rencontrent en profondeur des gîtes salins de sulfate de soude, comme on en connaît dans diverses régions et le volcanisme n'a, évidemment, rien à voir dans les eaux des Pyrénées. Nous avons rappelé, plus haut page 134, les innombrables théories, auxquelles a donné lieu l'explication des sources sulfurées sodiques, dont il est essentiel de ne pas oublier la très faible minéralisation. Voir, à ce sujet, JACQUOT et WILLM. *Eaux minérales de la France*, p. 127 à 339. Les matières réductrices, que contiennent généralement les schistes paléozoïques et surtout les organismes contenus dans le griffon même doivent intervenir, en premier lieu, pour la réduction du sulfate de soude.

² DE MARGERIE. *Pyrénées* (*loc. cit.*).

le *Boulou* (près Céret)¹, *Alet* dans les Corbières; enfin, les eaux, déjà étudiées à propos du Parc Central (p. 273), de *Gabian*, *Lamalou*, *Capus*, *Arènes*, *Sylvanès*, *Camarès*, etc., sur le flanc sud de la Montagne Noire, au voisinage d'une importante trainée basaltique.

Après quoi, nous entrons dans la série des sources sulfurées sodiques.

Un premier groupe enveloppe les massifs granitiques des Albères et du Canigou, séparés par les terrains primaires de la vallée du Tech², comme si ces amygdales résistantes de terrains cristallins, enveloppées de schistes paléozoïques plus souples, avaient, dans les plissements tertiaires, amené des ruptures à leur contact.

A l'ouest des Albères, c'est, le long du Tech, le *Boulou* (source bicarbonatée citée plus haut) et *Amélie-les-Bains*; au sud, en Espagne, *Nuestra Señora de las Mercedes*; au nord du massif du Canigou, le *Vernet*, *Canaveilles*, *Graus d'Olette*; au sud, *la Preste*, *Escaldas de Mont Louis*, *Escaldas du Val d'Andorre*; enfin, sur le massif granitique plus septentrional du Quérigut : *Ax*, *Usson*, *Carcanières*, *Escouloubre* au nord, *Nossa*, *Molity* et *Merens* au sud.

D'après M. Roussel, les trois massifs granitiques des Albères, du Canigou et du Quérigut seraient séparés par deux synclinaux primaires, comprenant, du sud au nord, des terrains de plus en plus récents, du cambrien au carbonifère, avec contact anormal contre le massif de granite situé au nord du pli.

*Amélie-les-Bains*³ est située à 250 m. d'altitude, au débouché de la gorge de Mondoni dans le Tech. Les sources, qui atteignent 62° et ont un débit de 353 litres par minute, prennent naissance au pied de la paroi rocheuse de gneiss (précambrien⁴), à laquelle le village est adossé du côté sud. Au nord, le gneiss est, presque immédiatement, recouvert par des schistes lustrés et injectés de

¹ Ces eaux contiennent des traces de cuivre, de glucine, de baryte, etc.

² Voir la carte d'ensemble de la vallée du Tech et la carte plus détaillée des massifs du Canigou et de l'Albère par M. ROUSSEL (Bull. de la carte géol. n° 52, 1896).

* 1843. J.-V. PUJADE : *Notice sur les nouveaux thermes d'Amélie-les-Bains* (Br. in-8° de 40 p., à Perpignan, imp. A. Tastu). — 1860. LEYMERIE : *Notice géologique sur Amélie-les-Bains* (Ann. de la Soc. linnéenne de Bordeaux, t. XXIII, p. 445). — 1864. Dr ARTIGUES : *Amélie-les-Bains, son climat et ses thermes* (1 vol. in-8° de 268 p., Paris, Germer-Baillière). — 1894. JACQUOT et WILLM : *Eaux minérales de la France*, p. 383 à 386. — 1896. ROUSSEL (Bull. carte géol., n° 52, carte de détail, p. 12). — *Feuille au 1/80 000° de Prades*.

⁴ Le précambrien, distingué par M. Roussel des gneiss archéens, comprend des gneiss, avec lentilles calcaires et minerais de fer.

quartz (cambrien ?); à l'est, commencent des zones successives de trias, jurassique, cénomanién, etc.

Les sources du Canigou, moins fréquentées que la précédente, n'en constituent pas moins un groupe très intéressant à étudier.

Le Canigou¹ (2 785) forme la pointe la plus avancée d'un massif de granite et terrains archéens, dirigé de ce côté N.-E.-S.-O. Sur son flanc nord-est, il est recouvert, jusqu'à 1 200 ou 1 300 mètres d'altitude, par des terrains métamorphiques non fossilifères, schisteux ou calcaires, rattachés au cambrien, où se trouvent un grand nombre des gîtes de fer de la région (Olette, Escaro, le Vernet, Fillols, Ballestay). Les sources thermales sont, pour la plupart, au contact des terrains cristallophylliens avec des terrains primaires : ainsi aux Bains de La Preste², entre le gneiss et le calcaire dévonien, devenu cristallin au voisinage du granite.

Leur température est généralement élevée : 44° à la Preste (1100 m. d'altitude) ; 58° au Vernet (620 m.) ; 60° à Canaveilles ; 79°,5 aux Graus d'Olette ; 42° à las Escaldas (1 350 m.).

Au Vernet, les sources sont à la base d'escarpements granitiques, qui s'élèvent brusquement à près de 1 000 m., à leur contact avec le cambrien.

Aux Graus-d'Olette, elles émergent de roches gneissiques, traversées par des filons de granulite, au contact même des calcaires métamorphiques.

Nous avons déjà dit que cette station des Graus-d'Olette est remarquable par l'abondance des eaux, non moins que par leur haute température : on n'y compte pas moins de 42 sources produisant 22.000 hectolitres par vingt-quatre heures. La composition chimique comprend environ 0,08 gr. de silice, 0,03 gr. de silicate de soude, 0,04 de carbonate de soude, 0,02 de sulfure de sodium, et 0,015 d'hyposulfite de soude, sur 0,23 gr. de résidu fixe.

Les Escaldas³, situées au-dessus de la plaine miocène de la Cerdagne, sont au contact d'un granite, englobant des débris de gneiss et injecté de granulite, avec le permocarbonifère.

Au nord du Canigou, on retrouve des sources, situées dans des conditions analogues sur la périphérie du massif granitique du Quérigut : Nossa (Vinça), Molitg, et Mérens au sud; Ax, Usson, Carcanières⁴, Escouloubre au nord⁵.

Les sources de Molitg⁶ (37°,5) et de Nossa (Vinça) sont encore au contact du

¹ Feuille de Prades.

² ROUSSEL. *Loc. cit.*, p. 270, et profils 299 et 300.

³ Feuille de Prades, en bordure sur l'Hospitalet.

⁴ Dr CONSTANT ALIBERT : *Notice sur les eaux minérales de Carcanières.*

⁵ Usson, Escouloubre et Carcanières se succèdent, sur 3 kilomètres de long, dans la vallée de l'Aude, aux confins des départements de l'Aude et de l'Ariège (Feuille de Quillan).

⁶ 1822. JULIA. *Analyse des eaux minérales de Molitg (Pyrénées)* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VII, p. 200). — 1861. BÉCHAMP et SAINT-PIERRE : *Étude chimique des matières glai-reuses déposées dans les eaux de Molitg (Pyrénées-Orientales)* (in-8°, 13 p., Montpellier, Bahen).

granite avec des terrains primaires, qui sont là de l'ordovicien injecté de granulite.

A Usson, un profil de M. Roussel¹ montre le carbonifère renversé passant sous le granite.

A Ax², les sources sont situées sur le contact du gneiss et du cambrien, au confluent des vallées de l'Ariège, de l'Oriège et du R. d'Ascou.

Suivant M. Jacquot, la vallée de l'Ariège serait, d'Ax à Ussat et Tarascon, une vallée de faille et il semble, en effet, que, dans la région d'Ussat, sur laquelle nous reviendrons plus tard, un accident de ce genre, dirigé N.-O.-S.-E., soit caractérisé par le décrochement des plis jurassiques et crétacés d'une rive à l'autre : décrochement, qui se poursuit, jusqu'à Foix, dans le coude N.-S. de l'Ariège. Mais, à Ax même, s'il existe une faille, ce ne doit pas être suivant l'Ariège³ ; d'après la carte de M. Roussel, Ax se trouverait sur le flanc est d'un pli, transversal à la chaîne, qu'il a appelé le pli transverse des Pyrénées de l'Ariège (prolongement de celui des Cévennes) et l'on pourrait, peut-être, attribuer à la rencontre d'une cassure N.-S. accompagnant ce pli, l'abondance particulière des sources.

Quoi qu'il en soit, ces sources sont, comme toutes les précédentes, au contact des schistes cambriens, modifiées par de très nombreux filons de granulite à tourmaline et des micaschistes et gneiss, qui leur succèdent au sud, vers l'Hospitalet. Elles sont tout particulièrement chaudes et abondantes (77°.5 à la source Rossignol supérieure ; 13 300 hectolitres par vingt-quatre heures, produits par 53 sources).

A l'ouest des massifs cristallins que nous venons d'étudier, la carte géologique des Pyrénées met en évidence une large zone de terrains paléozoïques, sans roches granitiques, où manquent, du même coup, les sources sulfurées sodiques. Puis celles-ci reparaissent en Espagne sur les deux versants du massif granitique de la Maladetta : au sud, à *Caldas de Bohi* (province de Lerida), et *Vénasque* ; au nord, à *Les y Arties*, dans le val d'Aran et l'on arrive à

Loc. cit., profil 132.

² 1862. GARRIGOU. *Étude chimique et médicale des eaux d'Ax, précédée d'une notice historique* (Paris, G. Baillière, 1 vol. in-8° de 246 p.). — 1867. E. GARRIGOU. *Géologie de la station thermale d'Ax (Ariège)* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XXIV, p. 245). — *Feuille de Foix*. — ROUSSEL. *Loc. cit.*, profil 133.

³ M. JACQUOT considère, comme un indice de cette faille, la présence de la bande jurassique de Verdun, près les Cabanes : ce qui est peu concluant.

la très importante station de Bagnères-de-Luchon (Hautes-Pyrénées).

*Bagnères-de-Luchon*¹, dont nous aurons plus tard à décrire en détail les travaux de captage, est située au pied de la montagne schisteuse de Superbagnères, à une altitude de 629 mètres, dans la vallée de la Pique. Ses sources sulfurées sodiques à 68° sortent de schistes métamorphiques siliceux mâclifères et micacés, alternant avec des calcschistes ou des grauwackes (silurien supérieur?), sur leur contact avec une série de filons granulitiques, qui les recourent²

Puis *Barèges*³ est sur un affluent du gave de Pau, à peu de distance de Luz (1 232 m. d'altitude), dans une vallée d'alluvions glaciaires, au milieu du cambrien. Il existe là dix sources sulfurées sodiques, dont la plus chaude et la plus minéralisée est à 45° avec 0,04 gr. de sulfure de sodium.

*Saint-Sauveur*⁴ un peu au sud de Luz (770 m. d'altitude), offre des eaux analogues à 22°.

Enfin *Cauterets*⁵ (Hautes-Pyrénées, 930 m. d'altitude) est dans

1836. FONTANET-BOUBÉE. *Écho du monde savant* (31 janv. et 19 juin 1836). — 1841. ELIE DE BEAUMONT. *Rapport sur les travaux exécutés par M. François à Bagnères-de-Luchon* (C. R. 20 déc. 1841 : 16 p. in-4°). — 1842. FRANÇOIS. *Mém. sur les trav. de recherche et d'aménagement des eaux thermales de Bagnères-de-Luchon exécutés de 1838 à 1841* (Ann. d. M., 4^e sér., t. I, 557 ; 23 p. et 2 pl.). — 1842. H. CASTILLOX. *Histoire spéciale et pittoresque de Bagnères-de-Luchon* (1 vol. in-8°, 298 p., avec carte. Toulouse, chez Delbois). — 1851. *Thermes de Bagnères-de-Luchon*. Toulouse. — 1853. DUROCHER. *Sur le gisement et l'origine des eaux sulfureuses pyrénéennes* (B. S. G. F., 2^e sér., t. X, p. 424, 471). — 1860. Article « Luchon » du dictionnaire DURAND-FARDEL. — 1860. LAMBON. *Les Pyrénées et les eaux thermales de Bagnères-de-Luchon* (624 p., in-8°, Paris, Chaix). — 1862. FRANÇOIS. *Plan des travaux de Luchon* (Exposition de Londres). — 27 mars 1862. FRANÇOIS. *Rapport manuscrit à l'École des Mines*. — 1868. GARRIGOU et L. MARTIN. *Géologie de la station thermale de Luchon (Haute-Garonne)* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XXV, p. 624). — 1872. GARRIGOU. *Bagnères-de-Luchon*, chez Masson. — 1884. FURIET. *Étude sur les sources thermales, particulièrement celle de Luchon* (in-8°, 40 p., 2^e édit., Toulouse). — 1886. JACQUOT et WILLM. *Revision de l'Annuaire des eaux minérales*. — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines* (II, 6, 11, 31, 41, 65, 94). — LAMBON. *Notice histor. et médic. sur Bagnères-de-Luchon*. — 1894. ROUSSEL. *Loc. cit.*, profil 270. — *Feuille au 1 800 000^e de Bagnères*. — Voir, plus haut, p. 60, 69, 192.

² La carte de M. Roussel figure, à Luchon, un anticlinal est-ouest, comprenant la série des terrains depuis le silurien moyen jusqu'au perméo-carbonifère, plus au sud.

³ 1824. LONGCHAMPS. *Note sur les eaux sulfureuses de Barèges, Cauterets et Saint-Sauveur (Hautes-Pyrénées)* (Ann. d. M., 4^e sér., t. IX, p. 367). — 1843. BOULLAY et HENRY. *Analyse de l'eau minérale de Barzan, près Barèges* (Ann. d. M., 4^e sér., t. III, p. 722). — *Feuille au 1 800 000^e de Luz*. — Voir plus haut, p. 110 et 169.

⁴ 1834. J.-M. PEYRAMALE. *Aperçu sur les eaux minérales de Saint-Sauveur-les-Bains*, (in-18°). — LABAT (D^r). *Étude sur Saint-Sauveur* (in-8°, 16 p., Paris).

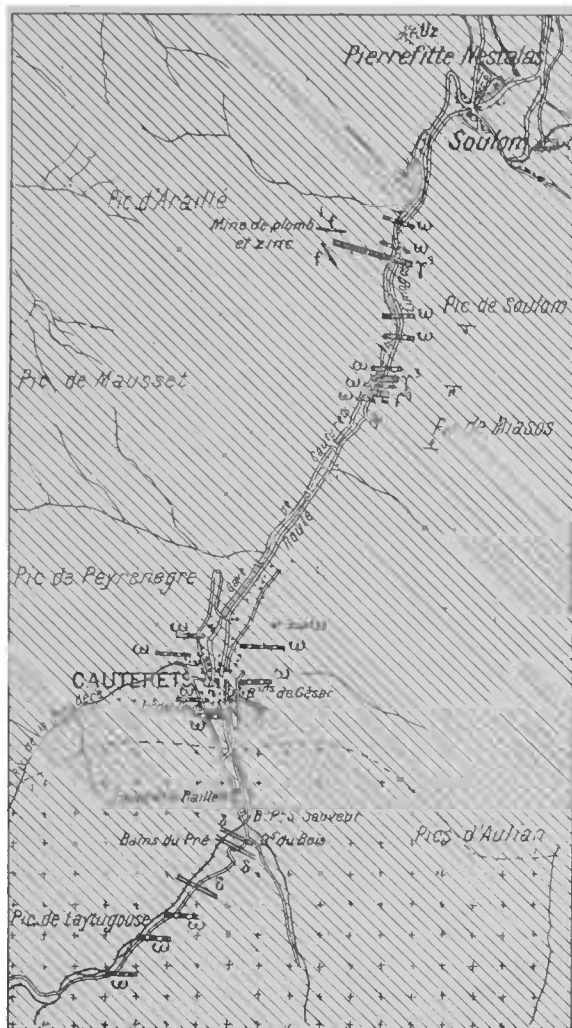
⁵ 1861. FILHOL et REVELL. *Analyse chimique des eaux sulfureuses thermales de Cauterets* (in-8°, 304 p., Tarbes, Talmion). — D^r LABILLONNE. *Histoire des fontaines de Cauterets et des variations de leur emploi* (154 p. in-8°, chez Germer-Baillière). — 1873. D^r DUHOURCAU. *Thèse sur les eaux de Cauterets*. — 1879. D^r J.-C. MOINET. *Des eaux thermales sulfureuses de Cauterets (Hautes-Pyrénées)* (Paris, in-12). — 1880.

la vallée du gave du même nom, au voisinage des confins du granite amphibolique du Péguère et du dévonien de Pierrefitte, métamorphisé par ce granite : certaines sources (groupe de César) étant dans le granite, les autres (groupe des Œufs et de la Raillère) dans le dévonien (schistes siliceux et calcschistes, avec lentilles de marbre).

Les eaux semblent arriver de la profondeur par des fentes N.-E., dans des zones limitées par des filons généralement E.-O. ou N.-O. S.-E. de microgranulite-diorite, diabase et porphyrite et, spécialement, d'après M. Beaughey, au contact de ces derniers.

Ainsi, les sources César et du Rocher, à 50 m. de distance (cotes 1060 et 1030), paraissent en relation avec un même dyke de porphyrite N. 110° E.

La source César, qui est la seule ascendante (c'est-à-dire la seule arrivant directement de la profondeur), émerge par une fente N. 18° E. et semble alimenter, par des ramifications, les sources descendantes des Espagnols, du Rocher, etc. Elle a été captée, en



Légende (Devonien, Granite, Microgranulite, Diorites, Diabases et porphyrites, Filons métallifères de Pierrefitte)

Fig. 54. — Carte géologique des environs de Caunterets (d'après un mémoire de M. Beaughey).

Echelle au $\frac{1}{110.000}$.

D^r DUHOURCAU. *Aperçu historique sur la station de Caunterets*. — 1881. D^r DUHOURCAU. *Esquisse géologique sur Caunterets* (du même auteur, nombreuses brochures médicales sur Caunterets). — 1889. BEAUGHEY. *Formation du quartz par la source de Maouhourat à Caunterets* (C. R., t. CX, p. 300 et 10 fév. 1890; B. S. G. F., 1890,

1859-1860, par M. François, dans une galerie et donne 210 m.³, à 47° 8, par vingt-quatre heures.

Les sources de la Raillère (110 m³, entre 27 et 39°, par vingt-quatre heures) émergent du granite par une fente N. 44° E.

Les sources du Pré et des Œufs sortent également du granite, au contact de filons de diorite quartzifère N. 100° E. et de fentes les rencontrant sous un angle d'environ 60°. La source de Maouhourat, qui paraît se rattacher à la source des Œufs, suit un filon de quartz E.-O. et donne encore naissance à du quartz, du gypse, etc. La source des Œufs produit 590 m.³ à 55', 8 par vingt-quatre heures.

Quant à la source du Bois, elle suinte dans des éboulis nommés *tafs*, plus ou moins cimentés par les dépôts d'eau thermale, au-dessus du granite. Comme elle doit une partie de ses propriétés médicales à la dégénérescence qu'elle subit en circulant dans ce terrain de taf, on n'a pas cherché à pousser le captage jusqu'à la roche en place.

Le même massif granitique, sur le flanc N.-E. duquel se trouvent les eaux de Cauterets et de Saint Sauveur, produit, au sud du Marmoré en Espagne, les eaux sulfurées sodiques de *Panticosa*.

A l'extrémité d'une de ses ramifications vers l'ouest, on a, sur le gave d'Ossau et sur un de ses affluents, les *Eaux-Chaudes* et les *Eaux Bonnes*¹

D'après M. Jacquot², la station des Eaux-Chaudes est située, au sud du défilé du Hourat, à la limite de la dalle cambrienne, fortement inclinée, qui constitue ce défilé et du crétacé, reposant sur du granite amphibolique ; son émergence serait, suivant lui, en relation avec le contact de ce granite et des terrains primaires (dalle et schistes quartzeux situés au-dessous).

La source des Eaux-Bonnes se distingue des sources sulfurées sodiques précédemment étudiées, par la présence d'une certaine quantité de chlorure de sodium (0,27 gr.) et de sulfate de chaux (0,45 gr.), venant s'ajouter au sulfure de sodium. Leur présence

p. 94). — 1892. BEAUGEY. *Étude sur les sources minérales de Cauterets* (Ann. d. M., 9^e sér., t. I, p. 319). — 1893. LABAT (Dr). *Efflorescence de gypse dans les galeries des sources sulfureuses de Cauterets* (B. S. G. F., t. XXI, p. xxvii). — *Feuille au 1.80 000^e de Luz*. — Voir, plus haut, p. 60, 154, 167, 193 et fig. 7.

¹ 1872. MARTIN. *Mémoire sur l'altération des eaux minérales des Eaux-Bonnes* (Ann. d. M., 7^e sér., t. I, p. 307). — PIDOUX (M.). *The Eaux-Bonnes*, London, 1879. — 1888-1889. D. P. OEHLERT. *Note sur les terrains paléozoïques des environs des Eaux-Bonnes* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XVIII, p. 425). — 1891. OEHLERT et LIOTARD. *Sur les calcaires des environs d'Eaux-Bonnes* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XIX, p. 175). — 1892. STUART-MENTEATH. *Sur la géologie des environs d'Eaux-Bonnes* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XX, p. 371). — 1892. STUART-MENTEATH. *Sur la dalle des Eaux-Chaudes et de la vallée d'Aspe* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XX, p. clxxvi). — 1893. BERTRAND (M.). *Sur la géologie des environs d'Eaux-Bonnes* (B. S. G. F., t. XX, p. 371-374). — Voir, plus haut, p. 59, 69.

² 1894. *Eaux minérales de la France*, p. 330, et carte géologique, fig. 18.

peut s'expliquer par le voisinage d'un petit bassin triasique au col de Lurdé.

Au delà de cette station thermale, la traînée des sources sulfurées cesse en France et en Espagne, en même temps que disparaissent les terrains cristallins, avec lesquels elles semblent liées et l'on n'a plus, jusqu'en Galice, que des sources salines, dont nous parlerons un peu plus loin, ou quelques rares sources carbonatées, comme *Larrauri*, au nord de Bilbao.

Laissons maintenant la chaîne centrale des Pyrénées, avec ses sources sulfurées sodiques, pour examiner les sources salines, qui se trouvent sur les chaînons secondaires parallèles (Petites-Pyrénées, Corbières, etc.), soit au nord, soit au sud.

Nous commencerons par la région des *Corbières*¹, dont nous avons déjà précédemment indiqué la situation entre les Pyrénées et la montagne Noire.

D'après M. Carez, une partie de la structure actuelle des Corbières a été causée par le noyau paléozoïque du Mouthoumet, placé entre Alet et Durban, sur 45 kilom. de long. Ce chaînon, situé entre les deux synclinaux de Carcassonne et des Petites-Pyrénées, a exercé une action capitale sur les plissements éocènes, qui sont venus du sud. Il apparaît comme un double anticlinal, dont le bord septentrional, fortement étiré, se renverse par dessus le garumnien et l'éocène de sa base. De ce côté, on arrive aussitôt à la dépression géosynclinale de Carcassonne, qui a été comparée à la vallée du Guadalquivir, entre la Meseta ancienne et les chaînes bétiques récentes, c'est-à-dire qu'elle marque la limite, vers le nord, des plis tertiaires venant buter contre le Plateau Central.

Au sud, au contraire, on passe des Pyrénées aux Corbières par une série de plis déversés vers le Nord et arrivant, dans la zone Nord, aux renversements signalés par M. Carez à Bugarach. Ces

¹ 1857-59. D'ARCHIAC. *Les Corbières* (Mém. Soc. géol. de Fr., 2^e sér., VI, n^o 2). — 1887. VIGUIER. *Études géologiques sur le département de l'Aude* (in-8^o, Montpellier, avec bibliographie antérieure). — 1889. CAREZ. *Le trias de Sougraigne (Aude)* (B. S. G. F., 3^e série, t. XVII). — 1890. DE MARGERIE. *Structure des Corbières* (Bull. carte géol., n^o 17). — 1891. CAREZ. *Sur la géologie des Corbières* (B. S. G. F., t. XIX, p. 480 et 702). — 1892. *Réunion de la Soc. géol. dans les Corbières* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XX), avec bibliographie antérieure. — M. Carez a bien voulu, en outre, nous envoyer des renseignements personnels inédits sur les sources de cette région, qu'il connaît si complètement.

² Cette dépression, d'après M. Carez (*loc. cit.*, p. 505), se serait creusée pendant le danien. Nous n'avons pas à insister ici sur la structure compliquée des Corbières. De nombreuses lacunes dans les terrains semblent dues à des oscillations des eaux, resserrées depuis le trias dans un sillon, dont l'axe était marqué par le Tet.

plissements éocènes ont dû venir s'accumuler contre l'obstacle résistant des Hautes-Corbières paléozoïques.

C'est dans l'ouest de ce massif ancien que se sont produites les fractures, accompagnées de sources thermales. Nous avons là, à la limite des terrains primaires et secondaires, des sources bicarbonatées calciques comme *Alet*, ou salines comme *Rennes-les-Bains* et *Campagne*. *Sougraigne*, au sud du même massif, est un groupe de sources froides salines à 9°, sortant, à 707 m. d'altitude, par plusieurs fractures très nettes, au voisinage du trias.

*Alet*¹ est au bord de la vallée de l'Aude, sur le grès quartzeux d'Alet, rattaché au danien, entre deux failles N.-E. S.-O. qui font buter ce terrain contre le paléozoïque, et à une très faible distance de l'une de ces failles, avec laquelle la source est probablement en relation. Les eaux, très abondantes (8 à 10 000 hectolitres par jour) et atteignant 32°, sont surtout minéralisées par des bicarbonates de chaux et magnésie, avec 0,10 gr. d'acide carbonique libre.

Campagne, un peu plus au sud, sur la vallée de l'Aude, sort d'un affleurement restreint de grès d'Alet, recouvert, presque de suite, par les marnes rouges garumniennes, au sommet d'un petit anticlinal. Sa minéralisation comprend, sur 0,81 gr. de résidu, 0,08 de chlorure de sodium, 0,03 de sulfate de chaux et 0,40 de carbonates.

Ginols, près Quillan, est au voisinage d'une légère faille est-ouest, mettant en contact le gault et l'urgonien.

Les sources très chaudes du *Pont-de-la-Foux*, près Saint-Paul-de-Vernouillent, sortent, d'après M. Carez, de l'urgonien et du gneiss, à quelques mètres de la grande faille de Lesquerde, qui suit un filon de quartz non continu.

*Rennes-les-Bains*², plus à l'est, est une station thermale de plus grande importance, dont les eaux chlorurées sodiques et sulfatées calciques à 46° débitent 16 500 hectolitres par jour.

D'après M. Carez, elles sortent du turonien non disloqué, qui doit reposer,

1876. M. GOURDON. *Stations thermales de l'Aude : Rennes-les-Bains, Campagne, Alet*, guide médical et topographique. Toulouse. — 1892. CAREZ. *Réunion des Corbières* (B. S. G. F., 3^e, t. XX, p. 522, et pl. XV, fig. 1) — Feuille au $\frac{1}{80\ 000}$ de Quillan.

1814. JULIA. *Dissertation sur les eaux minérales connues sous le nom de Bains de Rennes* (Toulouse). — 1833. CAZAINTE. *Notice sur les eaux thermales et minérales de Rennes* (Toulouse). — 1853. CAZAINTE. *Analyse des eaux de Rennes* (in-8°, 13 p., Limoux, chez Bouté). — 1854. D'ARCHIAC. *Coupe géologique des environs de Bains-de-Rennes* (B. S. G. F., 2^e s., t. XI, p. 185). — 1858. CAZAINTE. *Observ. médic. relatives à l'emploi de l'eau salée de la Salz à Rennes-les-Bains* (Limoux). — 1873. M. GOURDON. *Aperçu sur la géologie de Rennes-les-Bains* (Bul. Soc. Hist. Nat. Toulouse). — 1876. M. GOURDON. *Stations thermales de l'Aude : Rennes-les-Bains, etc.*, Toulouse. — 1877. A. PÉRON. *Sur la place des calcaires à échinides de Rennes-les-Bains* (B. S. G. F., 3^e s., t. V, p. 469). — 1878. COQUAND et LEYMERIE. *Observ. sur la note de M. Péron* (B. S. G. F. 3^e s., t. VI, p. 326 et p. 616). — 1890. DE MARGERIE. *Notes sur la structure des Corbières* (B. C. G., t. II, n° 17, fig. 6 et 7). — 1892. CAREZ. *Réunion des Corbières* (B. S. G. F., 3^e s., t. XX). — Feuille au $\frac{1}{80\ 000}$ de Quillan.

presque immédiatement, sur le primaire, dont les affleurements commencent à un kilomètre de là.

Les sources salines froides de la *Salz* sortent d'un bombement triasique, à 300 m. environ d'une faille assez importante, qui limite, au nord, cet affleurement de trias.

Vers l'ouest des Corbières, nous trouvons, en longeant le flanc nord des Pyrénées, sur les zones est-ouest de terrains secondaires, une série de sources salines, dont les premières et les plus méridionales sont Ussat et Aulus.

*Ussat*¹ est dans la vallée de l'Ariège, à 3 km. au sud de Tarascon, à environ 450 m. d'altitude. Les eaux, à 38°, sont abondantes (8.000 hectolitres par jour). Leur composition les distingue immédiatement des sources sulfurées sodiques, dont elles sont peu éloignées, en même temps que leur gisement est différent. Ce sont des sources salines sulfatées calciques, à rapprocher de celles d'Audinac, Salies-du-Salat, etc., dans les petites Pyrénées.

A Ussat, l'Ariège recoupe un anticlinal jurassique, dans une vallée étroite, dominée par des escarpements de néocomien, d'aptien et d'albien. Cet anticlinal, dirigé 120° E., vient de l'ouest de Gourbit et, arrivé à Ussat, est rejeté de 3 km. au nord jusqu'à Tarascon, d'où il revient former des crêtes à l'est d'Ussat. Les sources émergent, au pied des escarpements, dans une brèche à éléments calcaires, à l'intersection de la faille de l'Ariège avec l'anticlinal jurassique, d'où les eaux paraissent provenir.

Il semble vraisemblable que leur minéralisation (sulfate de chaux et sel de magnésie, avec un peu de carbonate calcaire) est due au trias, qui doit exister en profondeur sous la voûte jurassique et qui reparait au jour, à peu de distance, notamment à 4 km. au nord, à Arnave, où on y exploite du plâtre.

*Aulus*² est situé à 776 m. d'altitude, sur la vallée du Garbet, affluent du Sarlat. Les sources se trouvent sur la rive gauche, au milieu de schistes talqueux, lustrés et remplis de veinules de quartz, que M. Jacquot a rapportés à

Voir, plus loin, la description du captage d'Ussat. — 1810. *Journal des bains d'Ussat dans le département de l'Ariège* pour l'année 1810 (Foix, impr. J. Pomiès, in-8°), avec analyse par Figuié. — 1848. D^r DIEULAFOY. *Notice sur l'établ. des bains d'Ussat*. (Toulouse, impr. Manavit; in-8°, 20 p., avec plan du captage.) — 1887. D^r ART. CENAC. *Sources thermominérales d'Ussat-les-Bains* (Ariège), (Foix, impr. Pomiès; in-8°, 67 p.). — 1859. D^r OURGAUD. *Précis sur les eaux d'Ussat-les-Bains* (Ariège). Paris, chez Germer Baillière. — 1862. FRANÇOIS. *Rapport pour l'exposition universelle de Londres* (manuscrit 17 à l'École des Mines). — 1867. FILHOL. *Eaux minérales des Pyrénées*. — BONNANS. *Guide du méd. aux eaux therm. d'Ussat*. — *Dict. DURAND-FARDEL*. Article *Ussat*. — 1886. LABAT (D^r). *Etude sur Ussat* (Ariège) (Paris, 14 p., in-8°). — DAUBRÉE. *Eaux Sout.*, I, 55, et II, 52. — 1893. ROUSSEL. *Loc. cit.*, profil 182 — *Feuille de Foix*.

* 1880. D^r ALPH. ALRICQ. *Les eaux d'Aulus*. *Revue clinique* (Paris; Alex. Coccoz, in-8°, 96 p.). — 1881. D^r GARRIGOU. *Nouvelle analyse complète de la source des Trois Césarès à Aulus* (Ariège). Toulouse, typ. Durand, Fillous et Lagarde; in-8°, 60 p. — 1890. JACQUOT. *Constit. géol. des Pyrénées. Le système cambrien* (B. S. G. F., 3^e s., t. XVIII, p. 655). — 1893. ROUSSEL. *Loc. cit.*, prof. 221. — Feuille au $\frac{1}{80\,000}$ de Foix.

la dalle cambrienne, et M. Roussel au carbonifère. D'après ce dernier, la vallée du Garbet recouperait, au nord d'Aulus, un synclinal de trias, oolithe et néocomien, qui, à Aulus, serait en contact avec les terrains primaires redressés.

Les sources, presque froides, et surtout minéralisées par des sulfates de chaux et de magnésie, paraissent devoir l'acide sulfurique à des pyrites, qui sont abondantes dans des calcaires dolomitiques, recoupés par les galeries de captage. Ces sources n'ont donc qu'une minéralisation accidentelle, opérée au voisinage de la surface et se rapprochent par là de celles de Gransac.

Sur le prolongement de la zone paléozoïque d'Aulus, les eaux ferrugineuses de *Sentein*¹, dans la vallée du Léz (Ariège), émergent de schistes pyriteux siluriens, auxquels elles empruntent évidemment leur fer, par une réaction toute superficielle.

Plus au nord, dans les petites Pyrénées, on trouve, en relation avec le trias, toute une série de sources salines, chlorurées sodiques ou sulfatées calciques, qui sont, de l'est à l'ouest : *Audinac*, *Salies-du-Salat*, *Encausse*, *Labarthe*, *Barbazan*, *Siradan*, *Capvern*, et surtout *Bagnères-de-Bigorre* ; puis, dans le Béarn, *Saint-Christau*, *Ogeu*, *Salies-de-Béarn*, *Bidaous*, *Dax*², etc.

Les sources d'*Audinac* (Ariège) sont à 5 km. nord-est de Saint-Girons³, à 450 m. d'altitude, sur un petit affluent de droite du Salat. Leur température maxima est de 21°5 ; leur minéralisation est surtout formée de sulfate de chaux et sels de magnésie.

Ces sources sortent des marnes schisteuses du lias moyen, à faible distance d'affleurements triasiques, qui s'associent, notamment, à une trainée de pointements ophitiques, dirigés N. 80° E. entre Pégoumas et la Bastide-de-Serou.

A *Salies-du-Salat*, on est sur le trias lui-même, au contact d'un affleurement d'ophite très restreint, qui est recouvert de suite par le crétacé. La région, ici comme à Audinac, est, d'après M. Carez, légèrement plissée, mais non faillée.

Les sources d'*Encausse* sortent de l'urgonien ou du gault ; celles de *Barbazan*, du gault.

Les sources salines chaudes de *Bagnères-de-Bigorre*⁴ (Hautes-Pyrénées) sont à 380 mètres d'altitude, au débouché de l'Adour sur

¹ 1882. CAUDERAU. *Visite géologique aux eaux minérales de Sentein* (Ariège), in-8°, 4 p.

² BARTHE DE SANDFORT. *Dax pittoresque et thermal*, in-8°, 405 p. Paris, Dentu.

Angle N.-O. de la feuille de Foix. — Profil 232 de M. ROUSSEL.

⁴ 1841. FONTAN et FRANÇOIS. *Bagnères-de-Bigorre*. — 1843. BOULLAY et HENRY. *Nouvelle analyse de l'eau minérale de Bagnères-de-Bigorre (source d'Angoulême)*. (Ann. d. M., 4^e sér., t. III, p. 723). — 1878. MIEG. *Sur Bagnères-de-Bigorre et ses environs* (Soc. ind. de l'Alsace-Lorraine, XLVIII, p. 123). — 1884. FILHOL (E.) et J.-B. SENDERENS. *Analyse des nouvelles sources minérales de Bagnères-de-Bigorre*, in-8°, 19 p. Bagnères-de-Bigorre. — 1885. *Bagnères-de-Bigorre* (Explor. pyrénéennes. Bull. Soc. Ramond, Savy). — 1896. CAREZ. *Sur l'âge des schistes ardoisiers des environs de Bagnères-de-Bigorre* (B. S. G. F., 3^e s., t. XXIV, p. 379 à 392). M. Carez arrive à cette conclusion que les schistes ardoisiers des environs de Bagnères-de-Bigorre sont primaires : ce qui, avec les observations antérieures de M. Lacroix sur le granite de Lesquerde, fait disparaître la prétendue anomalie d'un granite secondaire dans les

la plaine de Tarbes, sur une zone de terrains d'âge contesté, au milieu desquels reparaissent des pointements isolés de terrain cristallophyllien et d'ophite, marquant probablement la place d'un anticlinal caché.

Les eaux paraissent toutes dériver d'un même filon principal très puissant, qui se disperse à la surface, dans les graviers de la vallée. Leur débit est de 22.700 hectolitres par vingt-quatre heures et leur température atteint 51° (2,60 gr. de résidu, dont 1,83 gr. de sulfate de chaux, 0,38 gr. de sulfate de magnésie et 0,16 gr. de chlorure de sodium).

Quant aux sources de *Salies-de-Béarn*, leur relation avec des gîtes de sel triasiques est des plus nettes¹.

Le sel gemme existe en plusieurs points des Basses-Pyrénées, notamment à *Salies-de-Béarn* et *Oraas*, où le banc, situé à 63 m. de profondeur, a plus de 15 mètres d'épaisseur. On le retrouve à *Briscons* et *Camarade* (Ariège), mélangé de sulfates de chaux et magnésie.

Il donne lieu à des sources salifères, toujours en relation avec les ophites².

Les sources de *Salies* sourdent à la base d'une colline gypseuse et se réunissent, au centre de la ville, dans un réservoir souterrain.

Enfin, si nous passons sur le versant espagnol, nous retrouvons, de même, de l'est à l'ouest, une série de sources salines, telles que les sulfatées calciques de *Bagnolas* et sulfatées magnésiennes du *Valle de Rivas*, au voisinage du Puigmal; puis, dans le Guipuzcoa, les sources sulfatées calciques froides de *Ataun* et *Cegama*, *Ormaiztegui*, *San Juan de Azcoitia*; la source chlorurée sodique chaude, à 36°, de *Cestona*, à peu de distance de la côte; *Otalora* (chlorure de sodium); *Archevalata* et *Santa Agueda* (sulfate de chaux); plus loin, en Biscaye, *Elorrio* (sulfate de chaux); *Zaldívar* (chlorure de sodium et sulfate de chaux); *Cortezubi* (id.) près de la côte; *Molinar* (chlorure de sodium), aux sources du Rio Mayor.

Toutes ces sources de Biscaye sont données comme sortant du crétacé, au

Pyrénées. Pour lui, les ophites sont toujours triasiques ou liasiques, jamais crétacées ni tertiaires.

LEYMERIE. *Sur l'origine des sources salées des Pyrénées* (Mém. Ac. Toulouse, 3^e s., t. V, p. 11). — 1860. RÉVEIL et O. HENRY. *Notice sur les eaux-mères et les sels de Salies-de-Béarn* (G. Baillière). — 1865. D^r DE LARROQUE. *Etude théor. et clinique sur les eaux de Salies-de-Béarn* (Delahaye, 144 p., in-8°).

Voir, sur cette question : 1890. SEUNES. *Thèse sur les terrains secondaires et l'éocène inférieur des Basses-Pyrénées et des Landes* (Ann. d. M., 8^e sér., t. XVIII, avec carte géol.). — 1893. CH. GORCEIX. *Sur le bassin salifère de Bayonne et de Briscons* (B. S. G. F., 3^e s., t. XXI, p. 375).

milieu duquel reparaisent, de place en place, des pointements triasiques.

Enfin, dans la province de Santander, on a : *Solares y Lierganes* (chlorure de sodium, à 30°); *Caldas de Besaya* (chlorure de sodium, à 56°), à l'ouest de Santander, etc.

§ 2. — Alpes.

1° Versant français (*Uriage, Allevard, Salins-Moutiers, Aix, etc.*).

2° Versant suisse (*Bex, Lavey, Louèche, Heustrich, Baden, Schinznach, Birmenstorff, Pfäfers, Tarasp, etc.*).

3° Tyrol (*Ischl, Gastein*).

4° Versant italien : *Lombardie, Vicentin, Istrie, Croatie, Dalmatie, etc.*

Afin de décrire méthodiquement les diverses sources thermales en relation avec la chaîne des Alpes proprement dite, nous suivrons d'abord le versant extérieur, c'est-à-dire le versant ouest, puis nord, en France, en Suisse et dans le Tyrol; ensuite, le versant intérieur en Lombardie, en Vénétie, dans le Vicentin, et enfin le flanc ouest des Alpes dinariques, en Dalmatie.

Par un phénomène, qui ne doit pas être seulement accidentel, nous trouverons, ici comme dans les Pyrénées, une abondance plus grande de sources thermales sur le versant nord, qui, pour les Alpes comme pour les Pyrénées, est le versant adouci (le côté abrupt étant, au contraire, tourné vers l'Espagne et l'Italie) et qui, en même temps, dans la grande courbure des Alpes, représente le côté convexe.

Il était, en effet, assez naturel à priori que ce côté convexe correspondant à un effort d'extension, tandis que le côté concave a dû être comprimé, les fractures, susceptibles de se prêter à de notables circulations hydrothermales souterraines, y fussent plus nombreuses.

Par contre, le côté méridional et abrupt est celui des effondrements, donc des manifestations éruptives placées à une distance plus ou moins grande de l'axe de la chaîne, sur des rameaux latéraux. C'est, dès lors, de ce côté seulement que nous pourrons trouver ce genre de sources en relation avec l'activité éruptive, dont l'acide carbonique abondant est l'élément caractéristique.

D'une façon générale, il y a lieu de remarquer une certaine rareté des sources thermales dans toute cette chaîne alpestre si abrupte

et qui semblerait, d'abord, si propre à les présenter en abondance¹. Les Alpes sont infiniment moins riches en sources thermo-minérales que l'Auvergne, la Prusse rhénane, l'Erzgebirge ou les Pyrénées et ne doivent la majeure partie d'entre elles qu'à la présence accidentelle d'une zone triasique très continue, avec gîtes de sel et de gypse. Cela peut s'expliquer, en grande partie, par le fait que nous sommes ici dans une zone plissée de l'écorce terrestre, où des fractures importantes et profondes ont eu peu de chances de se produire, tandis que ces fractures sont le cas ordinaire dans les massifs anciens, soumis postérieurement à l'effort de dislocation venu des plissements alpestres, ou dans les zones d'effondrements, situées : soit en avant de la chaîne, le long des butoirs de l'Avant-pays ; soit en arrière, dans la zone que semble avoir affaiblie le départ de ces grandes masses de terrains, portées plus au nord par le fait même des plissements (dépression méditerranéenne, plaine hongroise, etc.) ; mais non dans l'axe même de la chaîne.

D'autre part, c'est précisément dans ces zones d'effondrements ainsi définies que se sont produites les manifestations éruptives, peut-être parce que le jeu relatif des vousoirs terrestres affaissés déterminait, par la pression exercée en profondeur, la remontée des magmas en ignition. La chaîne proprement dite, qui est une zone de compression interne, — puisque cette compression seule a pu déterminer le surgissement de la montagne, — ne renferme pas, ou pour ainsi dire pas, de ces roches éruptives tertiaires, si abondantes au nord comme au sud, à une certaine distance de son axe et sur ses rameaux latéraux.

C'est là une raison de plus pour que les eaux thermales de la chaîne proprement dite manquent de cet élément, bien propre à les minéraliser, qui est l'acide carbonique. Il en résulte qu'en dehors des sources salines ces eaux sont peu minéralisées, et n'attirent spécialement l'attention que lorsque leur température est particulièrement élevée.

En ce qui concerne la composition chimique des sources thermales situées dans les Alpes, nous venons déjà de faire remarquer ce qui les distingue immédiatement, de la façon la plus tranchée,

¹ L'absence complète de sources thermales (en dehors de quelques eaux-mères de salines, comme Salins) dans le Jura, qui offre un type parfait de chaîne plissée, montre bien comment ces plissements sont peu propres à la circulation hydrothermale.

Voir, pour Salins : 1893. GIRARDOT (L.-Abel). *Sur la coupe géologique des environs de Salins* (Ass. franç. Congrès de Besançon, 1^o p., p. 226-227).

des sources du Plateau Central. Les sources carbonatées, qui sont le cas ordinaire en Auvergne, n'existent dans les Alpes que sur le flanc sud, par exemple dans le Vicentin, et cette absence de sources carbonatées dans toute la chaîne même, où, comme nous l'avons dit, les roches éruptives tertiaires font également défaut, est encore indirectement une preuve de la relation que nous avons admise, en général, entre ce genre de sources et les volcans récents¹

Les sources sulfurées sodiques du type pyrénéen font également à peu près défaut, ou ne se présentent que d'une façon toute secondaire, ainsi que nous le verrons bientôt pour Saint-Martin-Lantosque et Aix en Savoie.

Ce qui caractérise souvent les sources alpestres, plus que leur minéralisation, c'est l'abondance de leur débit et leur haute thermalité. Nous sommes là dans des régions fracturées, à fortes dénivellations extérieures, où l'infiltration de grandes quantités d'eau à 2 ou 3 000 mètres de profondeur et leur sortie au jour sous forme de sources thermales doivent présenter des facilités particulières. Pendant ce trajet, qui paraît se faire, en bien des cas, très rapidement, par suite des circonstances orographiques spéciales, les eaux chaudes, mises en contact avec les roches cristallines, ou les terrains de schistes et calcaires métamorphiques, qui constituent une grande partie des Alpes, peuvent n'exercer qu'une action dissolvante insignifiante et remonter au jour presque aussi pures que de l'eau distillée. C'est le type de ce qu'on appelle les eaux alpestres, ou indifférentes (*wildbäder*), telles que Pfäfers, Gastein, etc.

Il arrive, cependant, pour un très grand nombre de ces eaux thermales, et l'on peut même dire pour la majorité, que leur trajet souterrain rencontre des gîtes salins, par exemple ceux du Keuper triasique, qui existe sur presque toute la longueur de la chaîne. Elles deviennent alors salines, en se chargeant, soit de chlorure de sodium, soit de sulfates de chaux ou de magnésie, soit de sulfate de soude, ces derniers sulfates pouvant même, par une réduction superficielle, être ramenés à l'état de sulfures. Ce type de sources salines chaudes est tellement fréquent dans les Alpes qu'on l'a parfois considéré comme véritablement caractéristique de la chaîne. (Voir la carte, fig. 55.)

¹ On ne peut réellement compter comme sources carbonatées dans les statistiques, des eaux telles que celles de *Chens*, *Thonon* et *Evian* sur le lac de Genève, dont la faible minéralisation bicarbonatée calcique et magnésienne doit être directement empruntée aux terrains superficiels.

Il nous suffira de citer : comme chlorurées sodiques, Brides,

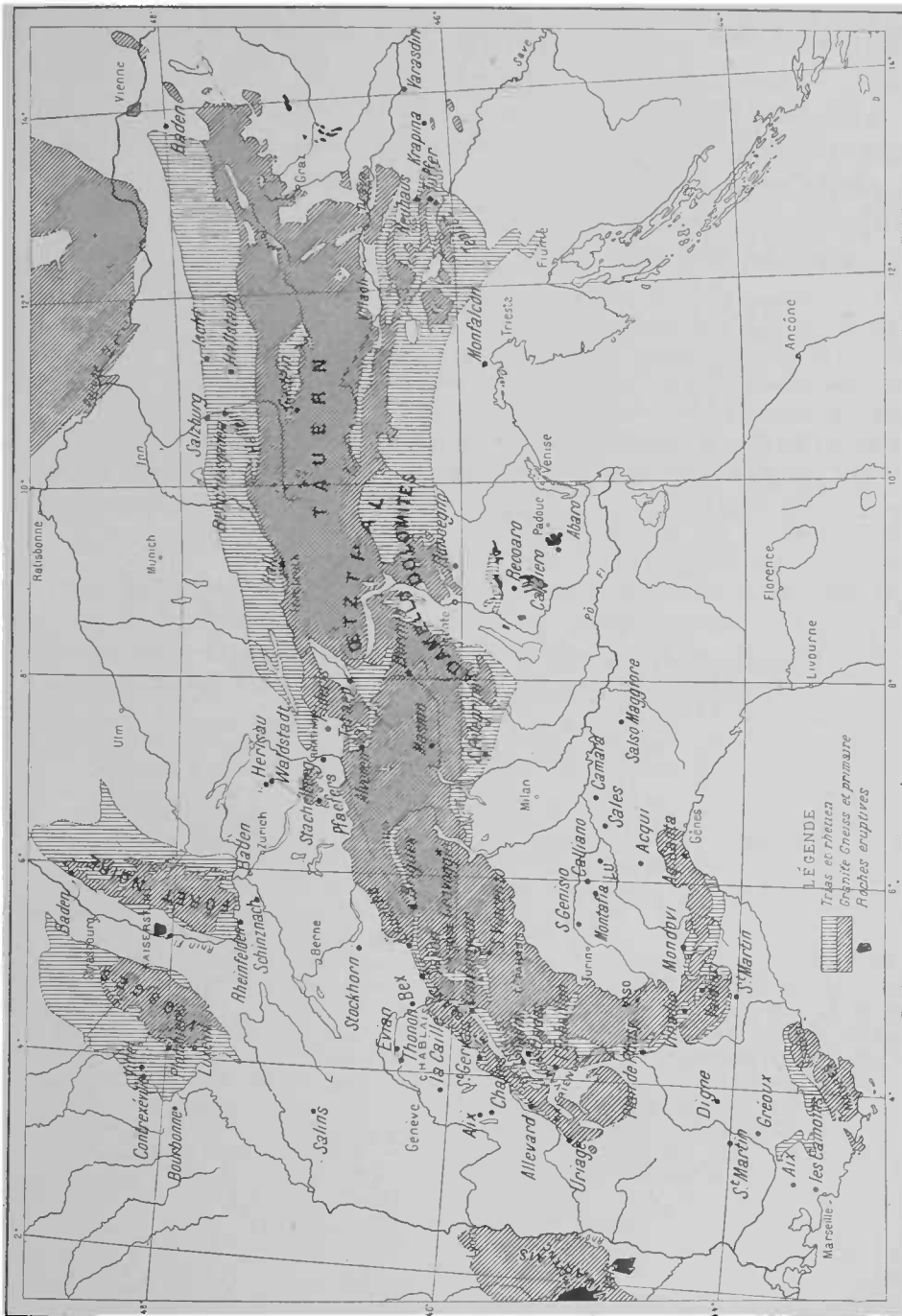


Fig. 55. — Carte des sources thermales alpines, montrant leurs relations avec la géologie des Alpes.

Echelle au 1/6.000.000

Salins, Bex, Rheinfelden ; comme sulfatées calciques, la Caille,

Heustrich, Schinznach, Baden ; comme sulfatée magnésienne, Bismenstorff ; comme sulfatées ou sulfurées sodiques, Saint-Gervais, Lavey, Louèche, Aix-les-Bains, Saint-Martin-Lantosque, etc.

1° Versant français des Alpes¹ : Uriage, Allevard, Salins-Moutiers, Aix, etc. — En suivant le versant français des Alpes du sud au nord, les premières sources que nous rencontrons sont celles de *Berthemont* ou de *Roquebillière*, et de *Saint-Martin-Lantosque*, dans les Alpes-Maritimes².

Ces sources, en relation avec les terrains permo-triasiques, sont, avec celles d'Aix que nous étudierons plus loin, les seuls exemples d'eaux sulfurées sodiques dans les Alpes. Mais, contrairement à ce qui se passe ordinairement pour les sources semblables des Pyrénées, il faut remarquer que leur température est faible : à peine 30° à Berthemont (1 006 m. d'altitude), 40° à Saint-Martin-Lantosque, et l'on peut se demander si la présence d'une faible quantité de sulfure de sodium, (0,03 gr. par litre, avec 0,06 de sulfate de soude) n'est pas due à une simple dissolution saline superficielle, portant sur du sulfate de soude déposé avec les terrains du trias.

Plus à l'ouest, les diverses sources salines des Basses-Alpes, *Digne, Gréoulx, Saint-Martin, Castellane, Moriès, Gévaudan*, ont été spécialement étudiées par M. Dieulafait, en vue de la recherche de l'acide borique, qui y accompagne fréquemment, par traces, le chlorure de sodium, provenant lui-même, très certainement, du trias.

Vers le nord, nous trouvons, dans les Hautes-Alpes, le *Plan-de-Phazy*³ et le

Comme ouvrages généraux sur les eaux thermales des Alpes françaises, consulter : 1861. HERVIER et SAINT-LAGER. *Guide aux eaux minérales du département de l'Isère et aux Alpes dauphinoises* (in-12, X, 378 p., Paris, Savy). — 1862. G. DE MORTILLET. *Origine des sources sulfureuses de la Savoie* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XIX, p. 802). — 1867. TH. EBRAY. *Sur la classification des eaux minérales de la Savoie en groupes coïncidant avec les failles* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XXIV, p. 401).

En outre des sources décrites plus loin, voir : 1824. SOCQUET. *Eaux minérales de la Perrière* (Savoie). — 1824. DESFOSES. *Analyse de l'eau minérale de Guillon, près Baume-les-Dames (Doubs)* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. IX, p. 391.) — 1825. MARCAUTON. *Analyse des eaux minérales de Bex* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. X, p. 262). — 1859. HENRY. *Considérations historiques sur les eaux minérales de Montbrun (Drôme), suivies de l'analyse des eaux* (in-8°, 8 p., Avignon, Jacquet). — 1860. PERRET. *Etudes chimiques sur l'eau minérale de Bourdonneau (Drôme)* (in-8°, 16 p., Lyon, Vingtrinier). — 1862. DUMOULIN. *De l'eau de la source de Salins et de son emploi en thérapeutique* (in-8°, 58 p., Paris, Germer-Baillièrre). — 1881. VILLOT. *Notes sur le régime de la source d'eau minérale sulfurée calcique accidentelle de Camoins-les-Bains (Bouches-du-Rhône)* (Ann. d. M., 7^e sér., t. XIX, p. 5 et 157). — 1886. HOLLANDE. *La source des Eparres* (in-8°, 11 p., Annecy, imp. Abry). — 1888. PLANCHUD (E.). *Source sulfureuse des mines de Biabaux* (in-8°, 11 p., Digne, imp. Chaspoul, Constans et Barbaroux).

Feuille au $\frac{1}{80\,000}$ de *Saint-Martin-Lantosque*.

³ 1838. TRIPIER. *Mémoire sur les eaux minérales du Plan-de-Phazy, près le Mont-Dauphin* (Hautes-Alpes) (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIII, p. 633).

Monestier-de-Briançon; dans l'Isère, *Monestier*¹, *la Molle*², *la Garde*, *Uriage*, *l'Echaillon* et *Allevard*. Toutes ces sources sont salines et en relations presque certaines avec le trias.

La source d'*Uriage*³ (27°), à 12 km. de Grenoble, est, comme beaucoup de sources alpestres, captée, non dans la roche en place, mais dans les alluvions qui recouvrent là le lias. Il semble cependant que sa minéralisation (6,11 gr. de chlorure de sodium, 1,53 gr. de sulfate de soude et 0,01 d'hydrogène sulfuré) doive être attribuée à l'étage des marnes irisées triasiques, dans lesquelles on exploite du plâtre entre Uriage et Vizille, aux Combes-de-Champ.

A *Allevard*⁴, une eau chlorurée, sulfatée et sulfurée accidentelle (0,54 gr. NaCl; 0,41 Na²OSO³; 0,22 CaOSO³; 0,24 MgOSO³), sort, à environ 17°, avec un débit de 1 300 hectolitres par jour, au milieu du lias. Son origine est évidemment due au trias, qui affleure à très peu de distance à l'est (cargneules, marnes bariolées avec gypse, etc.). On suppose que la réduction partielle du sulfate de soude est due au bitume, dont les terrains du lias sont imprégnés.

Cette région est, on le sait, remarquable pour l'abondance de ses filons de sidérose, de chalcopryrite ou de cuivre gris.

Au nord d'*Allevard*, le groupe des sources de la Savoie et de la Haute-Savoie est encore formé de sources salines, en relation avec les mêmes terrains triasiques.

C'est *Brides*, *Salins-Moutiers*, *Bonneval*⁵ (Bourg Saint-Maurice), *Challes*, *Aix-les-Bains*, *Saint-Gervais*, *La Caille*, etc.

Les deux sources de *Brides*⁶ et de *Salins-Moutiers*⁷ rentrent encore très nettement dans la catégorie des sources chaudes alpestres, ayant rencontré des

1860. EYMARD. *Quelques mots sur les eaux minérales gazeuses, ferro-alcalines et salines du Monestier-de-Clermont* (Isère), in-8°, 24 p., Grenoble, Baratier.

² 1837. GUEYMARD. *Analyse des eaux minérales de la Motte* (Isère) (Ann. d. M., 3^e sér., t. XI, p. 388).

³ 1826. *L'eau minérale d'Uriage, près Grenoble* (Isère) (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. XII, p. 282). Voir, plus loin, le captage de cette source.

⁴ 1837. GUEYMARD. *Analyse des eaux minérales d'Allevard* (Ann. d. M., 3^e sér., t. XI, p. 387). — 1847. DUPASQUIER. *Histoire chimique, médicale et topographique de l'établissement thermal d'Allevard* (Ann. d. M., 4^e sér., t. II, p. 428). — 1893. KILIAN, etc., *Feuille de Saint-Jean de Maurienne*.

Feuille de Bonneval, par M. BERTRAND. — 1876. D^r LAISSUS. *Notice sur les eaux minérales de la Tarentaise* (Réunion des Sociétés savantes) et — 1879. Id. *Note sur les eaux thermales de Bonneval* (Savoie).

Notices par le D^r LAISSUS (1869, 1881), le D^r PHILBERT (1883). — *Nord de la feuille de Saint-Jean de Maurienne*.

Sud de la feuille d'Albertville. — 1827. J.-M. SOQUET. *Analyse des eaux minérales de la Perrière, près Mouliers en Savoie* (Ann. d. M., 2^e sér., t. I, p. 237).

dépôts salins de gypse et chlorure de sodium du Keuper. Leur température est de 35°. Leur minéralisation (5,72 gr. par litre à Brides, 16 à Salins) se compose de sulfates de chaux, soude et magnésie, avec chlorure de sodium (prédominant à Salins).

La source de *Brides* (à 5 km. de Moutiers) paraît se produire au contact des schistes houillers et du Keuper gypseux. On suppose que les eaux proviennent du plateau de Montagny, rive droite du Doron; elles sortent, en plusieurs points, dans le lit du torrent, mais principalement sur sa rive gauche. On a constaté que la pression hydrostatique des eaux du torrent agissait directement sur le débit de la source, qui augmente quand les eaux sont hautes, c'est-à-dire quand la charge est plus forte.

La température, qui était de 35° jusqu'en juillet 1881, est passée, dit-on, à 36°, en même temps que la minéralisation s'est un peu augmentée, à la suite de secousses de tremblement de terre; le débit est de 272 litres par minute.

La source de *Salins--Moutiers*, très anciennement connue, est en relation directe avec des gîtes de sel, qui ont alimenté, jusqu'en 1866, les salines de Moutiers. Elle sort, sur la rive droite du torrent, par plusieurs ouvertures, qui sont captées dans deux grands bassins souterrains.

La température est de 25°; le débit, très considérable, atteint 35 000 hectolitres par 24 heures.

EAU DE BRIDES (Anal. de l'École des mines).		EAU DE SALINS	
1875 Résidu par litre 3,72.	1882 Résidu par litre. 6,18.	(Analyse de Berthier 1809.) Résidu par litre 16 gr.	(Analyse de l'Ac. de méd. bull. du 15 janv. 1864.) Résidu par lit. : 15 gr. 133
NaCl.	1,3601	10,22	11,317
CaOSO ⁵	1,8200	2,40	1,392
Na ² OSO ³	1,6113	0,98	0,641
MgOSO ³	0,4941	0,52	0,752
CaO, 2CO ² .	0,4380	0,75	0,005
CO ² libre.	0,0837	»	0,68
Petites quantités de FeO 2CO ² , MgCl ² KCl; traces d'iode, arsenic, lithium.		Traces de brome, iode, arsenic, po- tasse, lithine, etc.	

L'eau de Salins se comporte comme une sorte d'eau-mère de celle de Brides.

Les eaux d'*Aix-les-Bains* (Savoie)¹ sont, de beaucoup, les plus

1829. FRANCOEUR. *Sur la présence de l'acide sulfurique libre dans les eaux d'Aix* (Savoie) (Ann. d. M., 2^e sér., t. V, p. 284). — 1839. BONJEAN. *Histoire chimique des eaux minérales d'Aix* (Savoie) (Ann. d. M., 3^e sér., t. XVI, p. 299). — 1844. BONJEAN. *Analyses des eaux d'Aix et de Challes* (Savoie) (B. S. G. F., 2^e sér., t. I, p. 751). — 1878. WILLM. *Analyse des eaux minérales sulfureuses d'Aix-en-Savoie et de Marlioz* (C. R. t. LXXXVI, p. 543). — *Feuille de Chambéry*.

importantes de cette région et comptent même parmi les principales de France.

Il existe, à Aix, deux sources à 45 et 47°, fournissant un débit total de 30 000 hectolitres par jour : l'eau de soufre et l'eau d'alun, cette deuxième située dans une grotte naturelle, au dessus de l'établissement.

Leur minéralisation est des plus faibles (0,49 gr. par litre, dont 0,18 de carbonate de chaux, 0,08 de sulfate de chaux, autant de sulfate de magnésie, 0,03 de chlorure de sodium et une petite quantité d'hydrogène sulfuré et d'hyposulfites, résultant de la réduction superficielle des sulfates). Ce sont, en somme, des sources d'un type analogue à celui des Wildbäder, bien que, pour l'emploi médical, on attache une grande importance à leur sulfuration.

On les a considérées comme en relation avec un accident, qui, d'après Lory, limiterait le massif des Bauges¹ ; elles sortent de l'urgonien, recouvert par le terrain glaciaire.

Les eaux de *Challes*², à 5 km. de Chambéry, sont froides, mais remarquables par leur sulfuration exceptionnellement forte (0,36 gr. de sulfhydrate de soude), avec une forte proportion d'iodure (0,01 gr. par litre) et du bromure de sodium (0,003).

A *Saint-Gervais*³ (Haute-Savoie), il existe, sur les calcaires dolomitiques souvent gypseux du trias, disloqués au voisinage par des failles N.-S., trois sources chaudes à 40°, tenant 0,023 gr. à 0,024 gr. de sulfure de calcium, avec une quantité notable de chlorure et sulfate de soude, en tout plus de 5 grammes de résidu fixe.

Ces sources sont, au bord du Bonnant, non loin de son confluent avec l'Arve qui descend de Chamonix ; elles sont séparées de Moutiers par le col du Bonhomme.

A *la Caille*⁴, des sources, à 26°, chargées de sulfure de calcium et d'hydrogène sulfuré (8,90 gr. d'hydrogène sulfuré) sortent des marnes néocomiennes.

Enfin, pour terminer ce qui est relatif à la Savoie, il y a lieu de mentionner les sources de *Chens*, *Thonon*, *Amphion* et *Evian*⁵ sur les bords du lac de Genève, qui, lorsqu'on examine une carte hydrominérale de la France, appa-

¹ JACQUOT. *Loc. cit.*, p. 281, figure 15.

² 1843. O. HENRY. *Analyse de l'eau minérale de Challes* (Savoie) (Ann. d. M., 4^e sér., t. III, p. 724).

³ 1854. D^r J.-F. PAVEN. *Notice sur les eaux minérales de Saint-Gervais* (Savoie), in-8°. — FAVRE. *Recherch. géolog. sur les environs de Chamonix* (B. S. G. F., 2^e sér., t. V, p. 260). — 1897. E. RITTER. *La bordure sud-ouest du mont Blanc et les plis couchés du mont Joly*. (Bull. carte géol., t. IX, p. 445 à 476), avec carte géologique.

⁴ 1842. P. MORIN. *Analyse de l'eau minérale de Lacaille* (Savoie) (Ann. d. M., 4^e sér., t. II, p. 426).

⁵ D^r BORDET. *Notice sur Evian*. — 1876-77. EBRAY. *Etude sur les eaux minérales d'Evian* (Haute-Savoie) (B. S. G. F., 3^e sér., t. V, p. 394).

raissent comme un exemple tout à fait isolé et anormal de sources carbonatées dans les Alpes. Quand on étudie les analyses, cette anomalie disparaît ; car les sources du lac de Genève sont à peine des sources minérales et nullement des sources thermales.

Les sources de Chens sont à 10° ; celles de Thonon, à 12° ; d'Amphion et d'Evian, à 12°. La quantité de sels par litres n'est que 0,40 gr. à Evian.

Voici une analyse d'Evian (1870, M. Brun, confirmée par M. Willm, 1882) : CaO , $2\text{CO}_2 = 0,277$ gr. ; MgO , $2\text{CO}_2 = 0,126$; Na_2O , $2\text{CO}_2 = 0,014$; $\text{SiO}_2 = 0,01$; $\text{NaCl} = 0,003$; CO_2 libre (en poids) = 0,025 ; $\text{Az} = 0,02$; $\text{O} = 0,007$.

Toutes ces eaux sortent des alluvions anciennes.

2° Sources thermo-minérales de Suisse¹ : Bex, Lavey, Louèche, Heustrich, Baden, Schinznach, Birmenstorff, Pfæfers, Tarasp, etc.

La plupart des sources thermales suisses sont, comme celles des Alpes françaises, des eaux salines, en relation avec le trias. Quelques-unes sont simplement des eaux indifférentes, ou peu minéralisées.

Quand on remonte la vallée du Rhône, à partir du lac de Genève, on trouve les sources du Valais et du canton de Vaud : Bex, Lavey, Saxon, Louèche, etc.

Bex (Vaud). Les sources de Bex rentrent, comme celles de Brides et de Salins, dans la catégorie des eaux salées, en relation immédiate avec des gisements de sel. Les salines de Bex sont, en effet, exploitées depuis plus de deux siècles et fournissent une grande partie du sel consommé en Suisse. Ces eaux contiennent (d'après Birchoff, de Lausanne) 170 gr. de principes fixes, dont 156,668 gr. de chlorure de sodium ; plus, des sels de magnésium (notamment 0,014 gr. d'iodure et de bromure) et des sels de potassium.

Les eaux-mères des salines arrivent à renfermer 292,49 gr. de principes fixes.

Lavey (Valais)². — Les sources de Lavey sont, un peu au sud de Bex, au voisinage de Saint-Maurice.

Elles doivent un intérêt spécial à l'étude géologique, qui en a été faite par M. Renevier et à des travaux de captage, qui y ont été

¹ 1867. Dr MEYER-REHNS. *Die Heilquellen und Kurorte der Schweiz* (Zürich). — 1879. Dr TH. GSELL-FELS. *Die Bäder und klimatischen Kurorte der Schweiz* (Zürich). — 1895. LABAT (Dr). *Voyage en Suisse : Eaux minérales et stations sanitaires*, in-8°, 66 p., Paris, 1895. — Voir encore : 1834. HERBERGER. *Sources d'Ueberlingen* (lac de Constance) (Ann. d. Mines, 3^e série, t. V, p. 536).

² Voir plus haut, page 172, des remarques sur l'appréciation de leur débit, et, plus loin, le chapitre du captage. — 1836. Dr BEZENCENET. *Notice sur Lavey*. — 23 janv. 1861. FRANÇOIS. *Rapport d'expertise sur Lavey*. — 1881. Dr SUGHARD. *Les eaux thermales de Lavey* (Paris, Delahaye), avec profils géologiques par M. Renevier. — 1883. RENEVIER, FOREL, HEIM, etc... *Rapport d'expertise sur les eaux thermales de Lavey* (56 p. et 7 pl. in-4°, Lausanne). — 1885. OTTO OSSENT. *Source thermale de Lavey* (Bull. de la Soc. vaudoise des ing. et archit., mars 1885 (avec 4 pl.)). — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, I, 58 (avec 2 figures d'après M. Renevier).

le massif de la Dent de Morcles, où il se creusa un nouveau lit.

L'eau est chaude à 46° ; son débit est de 70 litres par minute. Elle contient (d'après les analyses de l'Académie de Lausanne, en 1833, et de M. Borel en 1874).

Résidu fixe par litre : 1,3128 gr.

Na^2OSO^3 : 0,703 ; NaCl : 0,363 ; CaOSO^3 : 0,09 ; CaOCO^2 : 0,07 ; SiO^2 : 0,05 ; gaz (en centimètres cubes à 0° et 0,76 m.) : $\text{Az} = 27,80$; $\text{CO}^2 = 4,34$; $\text{H}^2\text{S} = 3,5$; petites quantités de potasse, lithine, magnésie, strontiane, brome iode, etc. Pesanteur spécifique à 15° = 1,00114.

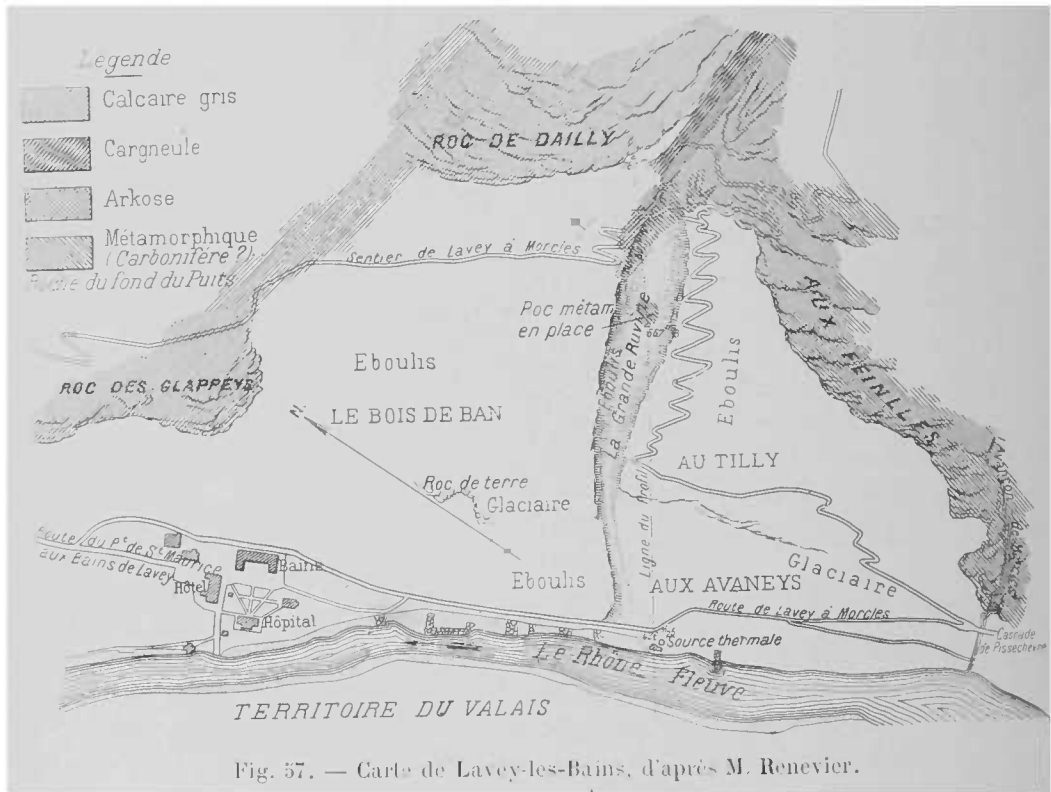


Fig. 57. — Carte de Lavey-les-Bains, d'après M. Renevier.

Echelle au $\frac{1}{11.000}$.

Saxon¹ est une source bromo-iodurée, dont l'origine est également attribuable au trias.

Puis, à Louèche², en face de la Gemmi, de nombreuses sources fournissent

¹ 1844. P. MORIN. *Analyse de l'eau minérale de Saxon (Valais)* (Ann. d. M., 4^e sér., t. V, p. 375). — 1860. CHATIN. *Sur l'eau minérale de Saxon-en-Valais* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XVII, p. 381).

1822. Dr URE. *Notice sur les eaux thermales de Leuck (Valais)*. (Ann. d. M., 1^e sér., t. VII, p. 197.) — 1836. BRUNNER. *Analyse des eaux minérales de Louèche (Valais)* (Ann. d. M., 3^e sér., t. IX, p. 465). — 1845. PYRAME. *Analyse de l'eau miné-*

près de 100 000 hectolitres par 24 heures. La principale, à 51°, est surtout minéralisée par le sulfate de chaux (1,52 gr. par litre), avec quelques carbonates alcalins.

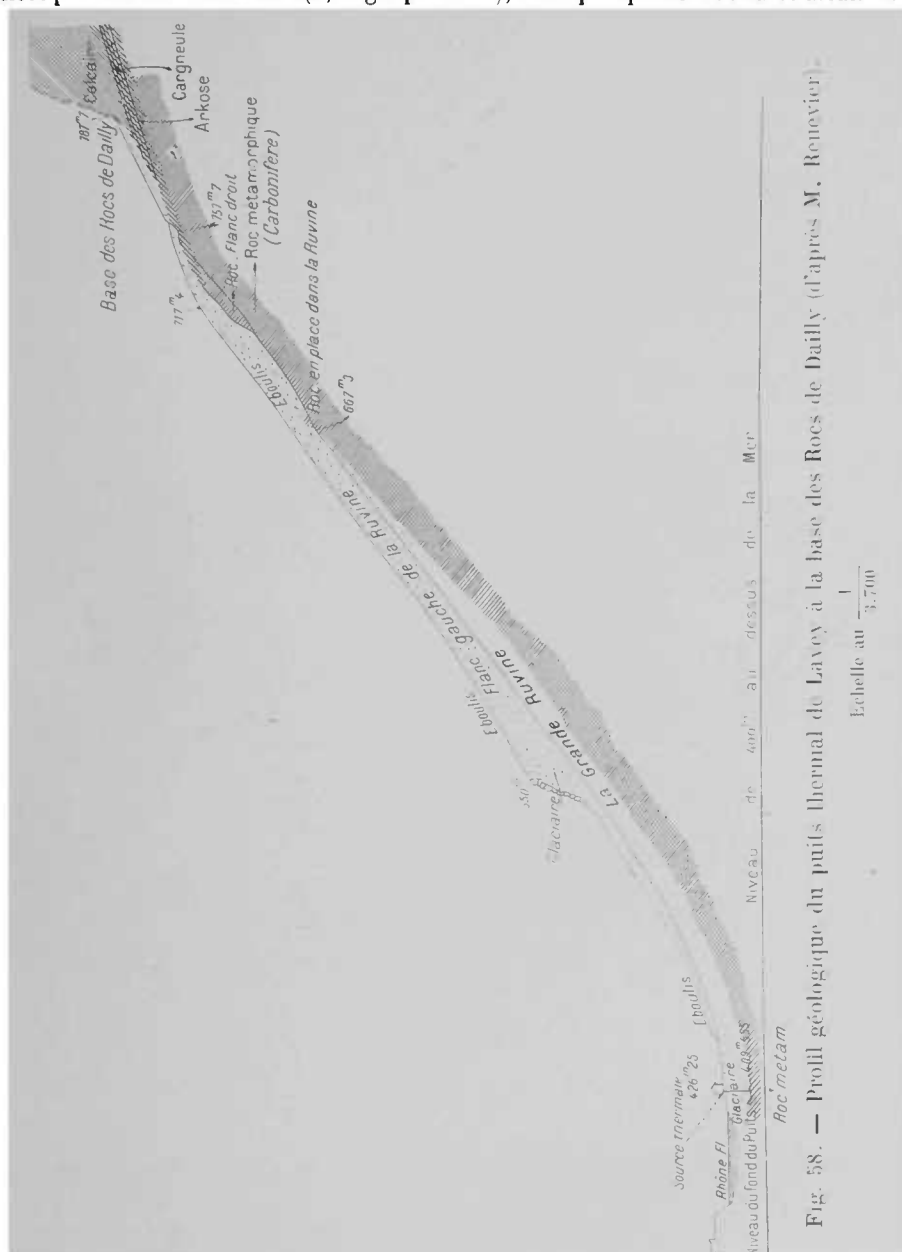


Fig. 58. — Profil géologique du puits thermal de Lavey à la base des Rocs de Dailly (d'après M. Renevier)

*Heustrich*¹, dans l'Oberland, est encore une source saline du même genre.

rale de Louèche (Source Saint-Laurent). (Ann. d. M., 4^e sér., t. VII, p. 473.) — 1877.
 PH. DE LA HARPE. *Note sur la géologie des environs de Louèche-les-Bains* (Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles, 2^e sér., t. XV, n^o 78; Lausanne). — 1883. D^r BRUNNER. *Notice sur Louèche*.

1888. D^r NEUKOMM. — *Notice sur Heustrich* (Berne).

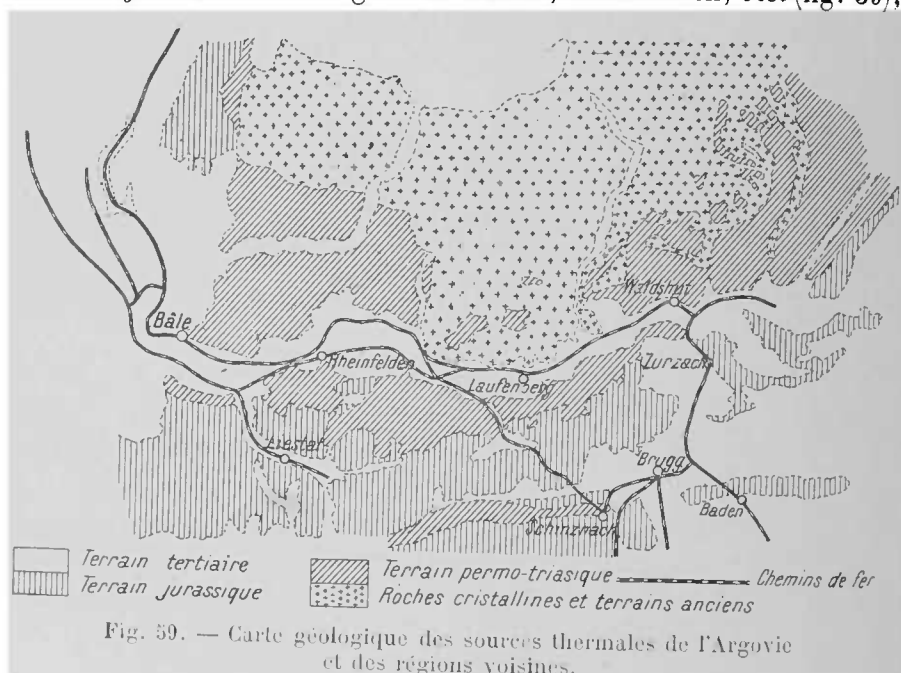
Les massifs du Niesen et du Stockhorn, au sud de Thun (Oberland), renferment, dans le jurassique, des amas de gypse, qui, soit à l'état de sulfate de chaux, soit après réduction, à l'état de sulfure avec hydrogène sulfuré, alimentent des sources froides ou chaudes.

La source d'Heustrich est très froide, à 6° : son débit est de 1 litre 75 par minute. Elle contient (Dr Müller : 1865) : principes fixes : 0,982 gr. ; $\text{Na}^2\text{O}, 2\text{CO}^2 = 0,671$, $\text{Na}^2\text{OSO}^3 = 0,2$; $\text{Na}^2\text{S} : 0,03$; $\text{Na}^2\text{O}, \text{S}^2\text{O}_2 : 0,026$; $\text{CaO}, 2\text{CO}^2 : 0,01$.

L'abondance de la soude est, d'après cette analyse, assez remarquable et ferait de la source une source alcaline.

Dans le canton de Berne, on peut également citer les sources de *Weissembourg*, voisines de Thun comme celles d'Heustrich (à 20 km.), qui sont des sources légèrement alcalines à 24°.

En *Argovie*, dans la région de Baden, Schinznach, etc. (fig. 59),



le Keuper minéralise une série de sources plus ou moins thermales.

La figure 4 (p. 54) montre ce qui se passe à *Baden*¹. Les eaux qui, d'après M. Heim, viendraient peut-être d'un affleurement triasique situé au N.-O. de

¹ 1818. HESS. *Badenfahrt* (Zurich). — 1826. Dr KOTMANN. *Les thermes de Baden*. — 1832. PFLUGER. *Analyse des eaux minérales de Baden (Suisse)* (Ann. d. M., 3^e sér., t. I, p. 415). — 1840. ALBERT MOUSSON. *Geologische Skizze der Umgebungen von Baden*. — 1844. Dr MINNICH. *Baden en Suisse*. — ALB. HEIM. (Congrès international de Bologne.) — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, II, 168.

Baden (au sud de la Forêt-Noire), circulent dans un anticlinal de keuper perméable, sous une voûte imperméable d'argile liasique. Cet anticlinal, qui constitue le chaînon E.-O. de la Lägern, est coupé, en ce point, par la vallée N.-S. de la Limmatt, où les terrains de keuper se sont trouvés mis à jour par l'érosion sur une certaine étendue. C'est au point le plus bas de cet affleurement de keuper que sortent les sources.

Elles sont assez nombreuses, mais en relation évidente les unes avec les autres, comme le montrent leur composition identique, leur température constante, d'environ 50° et l'influence qu'exercent, les uns sur les autres, les sondages successifs.

Elles contiennent 1,06 gr. de résidu par litre, dont 0,34 gr. de sulfate de chaux et 0,33 gr. de carbonate. Leur emploi remonte à l'époque romaine.

Les sources de *Schinznach*¹, utilisées depuis deux siècles, sortent d'une casure transversale du même chaînon de la Lägern, à 14 km. O. de Baden dans le lit de l'Aar.

Ce sont des sources très abondantes (1 000 litres par minute), présentant cette particularité qu'on est obligé de les réchauffer artificiellement. Leur minéralisation comprend : résidu fixe 2,47 gr. ; NaCl = 0,87 ; CaOSO³ = 0,83 ; MgOSO³ = 0,35 ; CaOCO² = 0,189 ; Na²OSO³ = 0,160.

Willegg, à 4 km. de Schinznaeh, est une source froide iodobromée (0,024 gr. d'iode et 0,010 de brome par litre).

*Rheinfelden*² est situé sur la rive gauche du Rhin à 17 km. de Bâle. Sa minéralisation est encore produite par le keuper, qui contient là une couche de sel de 12 m., exploitée à 114 m. de profondeur par les deux salines de Rheinfelden et de Rybourg, et utilisée pour la production d'eaux salées, que l'on pompe et qui arrivent au jour avec une température de 10°.

Ces salines fournissent environ 23 000 tonnes de sel par an.

Eirmenstorff, en Argovie, à 4 km. de Baden, produit des eaux froides très minéralisées en sulfates (32 gr. de résidu, dont MgOSO³ = 22,01 ; Na²OSO³ = 7,03 ; CaOSO³ = 1,27) et, par suite, analogues à celles de Hongrie et de Bohême.

Dans la partie plus orientale de la Suisse, nous rencontrons encore quelques sources du même genre, que nous allons énumérer rapidement :

Stachelberg (Glaris), à la sortie des belles gorges du Linth, au pied du Tœdi, offre des eaux peu abondantes (moins de 1 litre par minute) et peu minéralisées, analogues à celles d'Heustrich, c'est-à-dire contenant carbonate, chlorure, sulfate et sulfure de sodium, chlorure de calcium, etc.

Dans le canton de Saint-Gall, à la limite des Grisons, les sources de *Pfæfers-Ragaz*, que nous avons étudiées autrefois en détail³, sont

La source de Schinznach fut trouvée, en 1658, sur la rive gauche de l'Aar, puis disparut en 1670 à la suite d'un débordement du fleuve et ne reparut que vingt-deux ans plus tard, dans un flot.

Voir : 1854. AMSLER. *Notice sur Schinznach* (Lenzbourg). (Analyses diverses, p. 45). — 1865. HEMMANN. *Sources minérales de Schinznach et Willegg*. — 1866. GRANDEAU. *Rech. chim. sur l'eau de Schinznach* (Paris, Germer-Baillière). — Voir, plus haut, p. 175.

1886. DIETSCHY. *Notice sur Rheinfelden* (Berne).

L. de LAUNAY. *Les eaux minérales de Pfæfers Ragaz* (Ann. des mines, fév. 1894,

un très beau type de sources alpestres à fort débit, haute température et faible minéralisation.

Ces sources sortent des schistes noirs et calcaires nummulitiques du flysch, sur l'intersection d'un système de cassures est-ouest et d'une gorge profonde nord-sud, constituant une ligne de moindre pression hydrostatique bien caractérisée. Leurs griffons, situés au bord du torrent la Tamina, qui suit cette gorge, se sont abaissés d'environ 3 m. en trois siècles, à mesure que ce torrent accomplissait son travail d'érosion.

Leur débit, très variable, chaque année, avec les saisons et, d'année en année, avec l'abondance plus ou moins grande des précipitations neigeuses, est, en moyenne, de 57 600 hectolitres par vingt-quatre heures. C'est, avec la source de Louèche qui atteint 100 000 hectolitres, celles de Gastein (35 000), de Salins-Moutiers (35 000), d'Aix (30 000), un des exemples les plus curieux à citer de ces véritables rivières d'eau chaude, qu'on voit ainsi sourdre de terre en certains points des Alpes. Dans les Pyrénées, les sources les plus abondantes n'atteignent que 22 000 hectolitres aux Graus d'Olette, 13 300 à Ax et, dans nombre de stations thermales fameuses, on n'arrive pas à 2 000 hectolitres.

La température est seulement de 38°,7 et la minéralisation est comparable à celle d'une eau douce : 0,30 gr. de résidu fixe par litre (contre 0,28 gr. à Plombières, 0,49 gr. à Aix-les-Bains, 0,39 gr. à Gastein, 1,14 gr. à Nérís).

Dans la même région, on peut encore citer les eaux de *Fideris* et *Sernaus* dans la vallée de Landquart, *Alvenen* dans la vallée du Schym; puis, en Engadine, l'eau légèrement ferrugineuse et très froide (4 à 5° C.) de *Saint Moritz*, vantée au XVI^e siècle par Paracelse (1 770 m. d'altitude)¹.

*Tarasp*² (à 1185 m. d'altitude), à la limite de la Suisse et du Tyrol, est

33 p. et 2 pl.; avec bibliographie, p. 33, à compléter par : 1876. LABAT. *Etude sur la station et les eaux de Ragatz-Pfäfers* (in-8°, 30 p., Paris).

1893. GUMBEL (W. V.). *Geologische Mittheilungen über die Mineralquellen von Saint-Moritz im Oberengadin und ihre Nachbarschaft, nebst Bemerkungen über das Gebirge bei Bergün und die Therme von Pfäfers*. In-8°, 101 p., Munich, 1893). (Extr. Sitzungsbericht Mat. phys. Classe Akad. Wiss.)

² 1859. V. PLANTA-REICHENAU. *Chem. Untersuch. der Heilquellen zu Schuls* (Coire). — 1864. THEOBALD. *Geol. Beschreibung von Graubünden*, 1864. Bern. J. Dalp. — 1876. HUSEMANN et KILLIAS. *Die Eisensäuerlinge von Val Sinestra*. Coire. — 1876. Dr KILLIAS. *Tarasp-Schuls* (Paris, Delahaye). — 1886. Dr PERNISCH. *Notice sur Tarasp-Schuls* (Coire). — 1879. DE TRIBOLET et L. ROCHAT. *Etudes géologiques sur les sources boueuses de la plaine de Bière* (Bull. de la Soc. des sc. natur. de Neuchâtel, t. XI, n° 3, p. 89 et 329). — 1879. DE TRIBOLET. *Note sur la présence d'une source minérale à Valangin suivie d'une statistique des eaux minérales du canton* (Bull. de la Soc. des sc. naturelles de Neuchâtel, t. XI, n° 3, p. 459).

situé sur des schistes et argiles noirâtres, contenant, paraît-il, une remarquable abondance de pyrite de fer. La minéralisation principale des eaux paraît provenir du trias gypseux, situé au-dessous.

Ces sources, à 6 ou 7°, jaillissent d'une fissure anticlinale de ces schistes des Grisons, par laquelle l'Inn s'est frayé, un moment, un passage, en aval d'Ardez. Elles sont fortement minéralisées en substances salines ($\text{CaO}_2\text{CO}^2 = 24,4$ gr. ; $\text{Na}^2\text{O}, 2\text{CO}^2 = 4,87$; $\text{NaCl} = 3,67$; $\text{Na}^2\text{OSO}^3 = 2,10$; $\text{MgO}_2\text{CO}^2 = 0,97$; $\text{K}^2\text{OSO}^3 = 0,37$; $\text{Na}^2\text{OBo}^2\text{O}^3 = 0,172$).

On peut remarquer l'abondance de l'acide borique, qui, jointe aux dégagements d'acide carbonique libre, parfois décrits sous le nom de mofettes, pourrait faire penser à un phénomène éruptif. En réalité, c'est, au contraire, un cas où ces deux substances paraissent bien n'avoir qu'une origine toute superficielle. L'acide borique doit, comme l'a montré M. Dieulafait, être emprunté aux gisements d'évaporation salins, qui en contiennent, presque toujours, des traces, et l'acide carbonique libre doit résulter, tout simplement, de l'attaque du bicarbonate de chaux contenu dans les eaux, par les éléments acides résultant du lessivage des pyrites.

3° Sources thermo-minérales du Tyrol. — Les sources thermo-minérales du Tyrol présentent, tout naturellement, les deux mêmes types, que nous avons rencontrés dans toute la longueur des Alpes : d'une part, des sources salines, en relation directe avec cette zone de trias gypseuse et salifère, que nous venons de suivre dans les Alpes françaises et en Suisse et qui, en Tyrol, donne lieu à toute la série bien connue des exploitations de sel (*Hall, Berchtesgaden, Hallein, Hallstadt, Ischl, etc.*)¹ ; d'autre part, des eaux chaudes peu minéralisées, telles que celles de *Gastein*.

Le niveau salifère du trias, qui alimente notamment les eaux chlorurées froides de Ischl, est situé dans la Lettenkohle (Keuper), entre les couches de Saint-Cassian et les dolomies du Schlern, à peu près au même niveau que le sel de Franche-Comté et au-dessous de celui de Lorraine et du Cheshire (Gyps Keuper).

Comme source thermale proprement dite, la seule d'une réelle importance, que nous ayons à citer, est celle de Gastein, sur le flanc nord des Tauern, au dessus de la vallée de Pinzgau.

Les sources de *Wildbad Gastein* (fig. 60) sont situées dans la

¹ Voir : *Gîtes minéraux et métallifères*, I, p. 478 à 482. — Cf. 1882. LABAT. *Sur les mines de sel gemme et les eaux salées du pays de Salzbourg* (B. S. G. F., 3^e série, t. X, p. 265). — 1878. C. VON HAUER. *Die Mineralquellen von Ischl* (Verhandlungen der k. k. geologischen Reichsanstalt, 1878, n^{os} 4 à 7, p. 423; Vienne).

1831. WENCESLAS STREINZ. *Bains de Gastein*. — 1874. D^r LABAT. *Etude sur le climat et les eaux de Wildbad-Gastein* (Ann. Soc. hydrolog. médic. de Paris, t. XIX).

province de Salzburg, au pied nord du massif de l'Ankogel (3 253 m.), à environ 1 000 m. d'altitude.

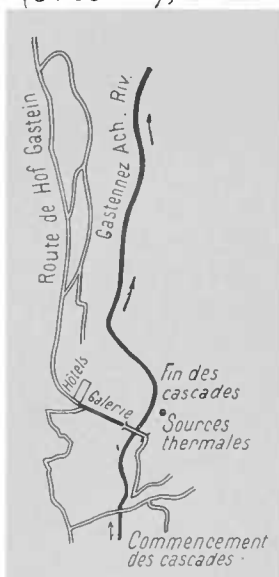


Fig. 60. — Carte des sources de Gastein (Tyrol).

L'Ankogel¹ est constitué par un noyau de gneiss central, qu'entourent des zones périphériques de micaschistes, talcschistes et chloritoschistes, avec intercalation de quelques bancs de calcaire cristallin. Les sources de Wildbad sont, à peu près à la limite du gneiss et des micaschistes, dans le fond du ravin creusé par le torrent, la Gasteinerache, qui, en ce point même, tombe en deux belles cascades de 63 et 85 m. de haut. Vers le nord, ce torrent, qui a une direction nord-sud, recoupe encore, pendant environ 10 km., jusqu'à Luggau, les talcschistes, calcschistes, etc.²; puis il entre dans une zone est-ouest de verucano et de trias, jusqu'à Lend, où il retrouve la dépression est-ouest de la Salzache et de l'Enns, que suit la ligne du chemin de fer.

Les eaux, qui proviennent certainement du massif de l'Ankogel et se sont infiltrées dans les schistosités des gneiss, viennent sortir à Gastein par une série de fissures, sensiblement perpendiculaires à la stratification.

On compte 18 sources, dont 9 seulement employées. Leur débit est d'environ 35 000 à 40 000 hectolitres par jour; leur température varie de 25 à 48°; leur densité est de 1,0003. Leur minéralisation, presque insignifiante, comprend seulement 0,37 gr. de résidu dont: 0,20 gr. de chlorure de sodium, 0,05 gr. de carbonate de chaux, 0,05 gr. de sulfate de soude, etc.

Connues très anciennement, comme la plupart des sources chaudes, et déjà visitées par Paracelse au xvi^e siècle, elles ont acquis, dans ces derniers temps, par les entrevues des souverains, qui s'y sont rencontrés, une grande réputation.

¹ Feuille VI de la carte géologique de Von Hauer au $\frac{1}{576\ 000}$. Le massif de l'Ankogel prolonge, dans la même direction est-ouest si caractéristique des plis de cette partie des Alpes, le Gross Glockner et le Gross Venediger.

² Sur le bord nord de ces talcschistes se trouve, dans la vallée parallèle à l'ouest à celle de Gastein, la mine d'or de Rauris.

4° Versant italien des Alpes¹ : *Lombardie, Vicentin, Istrie, Croatie, Dalmatie, etc.*

Le versant sud des Alpes, que nous abordons maintenant, présente, pour des raisons déjà indiquées, une bien moindre abondance de sources thermales que le versant nord, quoique la présence de manifestations éruptives récentes, et peut-être même post-pliocènes, dans le Vicentin, ramène là les sources carbonatées, qui font si absolument défaut sur tout le flanc nord. Mais, outre l'allure générale des dislocations, dont nous avons déjà montré l'influence, la zone triasique étant beaucoup moins continue sur le versant intérieur des Alpes, — en particulier, dans toute la Lombardie, où elle fait presque complètement défaut — et étant parfois représentée, vers la Vénétie, par des types plus franchement marins, sans gîtes d'évaporation salifère, les sources salines, qui jouaient un rôle si notable au Nord, disparaissent presque ici. Les sources, situées au sud du Pò, que nous étudierons ultérieurement, nous semblent plutôt à rattacher au versant nord des Apennins. Celles, que nous allons décrire dans ce paragraphe, appartiennent donc aux types suivants² :

Eaux chaudes peu minéralisées et renfermant seulement des traces de soude, empruntées aux roches du pays : *Valdieri, Vinadio, Craveggia, Masino* ;

Eaux salines à sulfate de chaux, ou eaux bicarbonatées accidentelles, tenant leur acide carbonique du carbonate de chaux, attaqué par l'acide sulfurique venant des pyrites : *San Vincenzo, Courmayeur, etc.* ;

Eaux bicarbonatées de *Recoaro, Caldiero, etc.*, dans le Vicentin. Dans cette dernière région des collines Euganéennes, fréquemment encore secouée par les tremblements de terre, de nombreuses sources thermales sortent des fissures du basalte et du trachyte.

Si nous suivons les Alpes, comme nous l'avons fait pour le versant nord, de l'ouest à l'est, nous trouvons, d'abord, sur la bordure même de la chaîne :

Valdieri (province de Cuneo) : nombreuses sources, entre 38° et 69°, tenant 0,30 gr. de résidu, dont 0,09 gr. de sulfate de soude, 0,04 gr. de chlorure de sodium, etc.

¹ Voir, pour toutes les sources minérales italiennes. GARELLI. *Delle acque minerali d'Italia*, 1 vol. in-8° de 516 p. avec carte (Torino), 1864. Une bibliographie générale des eaux italiennes sera donnée, page 350, à l'occasion des Apennins.

² Fig. 61, page 352.

Vinadio (province de Cuneo) : nombreuses sources, de température allant de 32° à 63°, contenant du sulfate de soude ou du sulfure de sodium.

*Courmayeur*¹ (province de Turin), altitude 1 218 m. : source à 12°, légèrement bicarbonatée, au voisinage immédiat de gisements de gypse, qui donnent également des eaux sulfatées calciques.

San-Vincenzo (province de Turin) : source à 11°, tenant 6,81 gr. de résidu, dont 4,56 gr. de sulfate de soude et 1,18 de carbonate de soude, avec une certaine proportion d'acide carbonique.

Craveggia (province de Novare) : source à 27°,5, contenant 0,33 gr. de résidu, dont 0,19 gr. de sulfate de soude.

Masino (province de Sondrio), source à 37°,5, à une altitude de 1 199 m. et très faiblement minéralisée ; 0,76 gr. de résidu, dont 0,27 gr. de chlorure de sodium, 0,17 gr. de sulfate de soude, etc.

Enfin, les eaux de *Bormio*², à 42° (altitude 1 440 m.), sont encore des eaux sulfatées calciques et magnésiennes, provenant du trias.

Un peu plus au sud, dans la région au nord de Bergame, qui est connue, on le sait, pour ses gîtes métallifères et, en particulier, pour ses calamines, on a quelques sources salines, comme *San-Pellegrino*³, à 28°, bicarbonatée calcique et saline (acide carbonique accidentel), *Boario*, *Trescore* (remarquable par sa teneur en iodure de sodium), etc.⁴.

Quand on quitte les Alpes proprement dites, pour descendre vers la plaine lombarde, on trouve, entre Turin et Gênes, toute une série d'autres sources, pour la plupart salines et en relation avec les gîtes salifères du tertiaire, exceptionnellement carbonatées, que nous décrirons plus tard, à l'occasion des Apennins. Nous voulons seulement ajouter ici quelques mots sur la saillie rocheuse du Vicentin, ou des monts Euganéens, située entre la Lombardie et la Vénétie, dont les roches éruptives (rhyolithes, trachytes, andésites, basalte, etc.), recoupant les calcaires crétacés et allant, d'après M. Misali Pencali, jusqu'au miocène, amènent l'existence de quelques sources à acide carbonique abondant⁵.

¹ 1864. ARGENTIER (A.). *Courmayeur et Pré-Saint-Didier, Val d'Aoste*, in-8°, Aoste ; avec bibl.

1869. MEYER-AHRENS et BRÜGGER. *Die Thermen von Bormio* (in-8°, Zurich), avec bibl.

³ 1851. LUSSANA (F.). *Acque min. di San Pellegrino* (in-8°, Milano), avec bibl. — 1896. BERTONI. *Sulla natura chimica dell' acqua minerale di S. Pellegrino* (fonte Salaroti) : relazione analitica (Livourne, tip. A. DEBATE. In-8°, 16 p.).

1884. PORRO. *La fonte... La source alcaline sulfureuse de Berbenno*, in-16., 59 p., Bergame, A. Stoppani. — 1876. POLLI. *Analisi chimica... analyse chimique de l'eau minérale de Brembilla (Province de Bergame)*. Bergame. — 1879. POLLI (P.) et LUCCHETTI (P.). *Acqua di S. Pancrazio (Bergamo)* (Atti Soc. Ital. di Sc. Nat., t. XXI, Milano).

⁵ 1893. S. BERTOLIO. *Sur quelques roches des collines euganéennes* (B. S. G. F., 3° sér., t. XXI, p. 406). — Voir également : SUSS. *Loc. cit.*, I, 188, et les ouvrages cités en note par ce géologue.

A *Recoaro*¹ (Vénétie), il existe diverses sources froides, telles que la source Lorgna, tenant par litre 392 cm.³ d'acide carbonique libre, 1 gr. de bicarbonate de chaux, 0,035 gr. de carbonate de fer, 0,70 gr. de sulfate de chaux et 0,33 gr. de sulfate de magnésie, ou la source Lélia (4,75 gr. de résidu, dont 1,32 de sulfate de chaux, 0,71 de carbonate de chaux, 0,69 de sulfate de magnésie et 1 231 cm.³ d'acide carbonique).

A *Caldiero* (prov. de Vérone), des sources, à 27°, contiennent surtout du bicarbonate de chaux et du chlorure de calcium.

Puis, à l'extrémité est des trachytes euganéens, on trouve les nombreuses et remarquables sources chaudes d'Abano, Santa-Elena, etc., dont la minéralisation est essentiellement saline.

*Abano*² (à 8 km. de Padoue) comprend diverses sources, étudiées par F. Ragazzini :

Il existe là, au pied d'un tertre calcaire nommé Monte Irone, une source très chaude à 85°, assez abondante pour alimenter huit établissements thermaux, en même temps qu'elle fait tourner la roue d'un moulin, et fortement minéralisée (6, 598 gr. de principes fixes, dont 3,87 de chlorure de sodium ; 4,15 de sulfate de chaux ; 0,40 de carbonate de chaux ; 0,13 de chlorure de magnésium ; traces d'iode et de brome, etc.)

La source de Monte Ortone a une température variable entre 56 et 68° et contient 5.15 gr. de résidu fixe, dont 3,03 de chlorure de sodium ; 0,89 de sulfate de chaux ; 0,54 de chlorure de magnésium ; 0.27 de bicarbonate de chaux, etc.

Ces sources chlorurées sont remarquables par la prédominance du sel et du gypse, à l'exclusion des sels alcalins.

Dans la même région, mais plus au nord, au delà de la frontière autrichienne, on trouve, dans le Trentin, une série de sources carbonatées calcaires ou ferrugineuses, telles que *Rabbi* (1 220 m. d'altitude), *Comano*, *Levico* (1 460 m. d'altitude), *Roncegno*, etc.

Vers l'est, le sud de la Carinthie et de la Styrie, la Carniole, l'Istrie, la Croatie, la Dalmatie, présentent, sur le prolongement des zones alpestres cristallophylliennes et dans les Alpes dinariques, quelques sources thermales, dont nous allons citer les principales³.

¹ 1875. LABAT. *Sur l'origine des eaux de Recoaro* (Vénétie) (B. S. G. F., 3^e sér., t. IV, p. 443), avec bibl. — 1877. CHIMINELLI. *Recoaro, colle sue Sorgenti...* Recoaro et ses sources minérales. Bassano. — 1876. CHIMINELLI. *Analisi... Analyses des principales sources minérales de Recoaro* (Bassano).

² 1864. GARELLI. *Delle acque Min. d'Italia* (Torino), p. 136. D'après cet ouvrage, la composition que nous donnons de la source de Monte Irone se rapporterait à 100 gr. d'eau (?). — 1861-69. PAZIENTI (A.). *Acque min. delle Prov. Venete* (Ist. Ven. di Sc., sér., 3, t. VII, X et XIV), avec bibl. — 1869. *Monografia... Monog. des eaux min. de la prov. de Venise* (*Atti del Reale Istit. Veneto*, t. XIII, sér. III, Venise. — 1850. DEGOUSSÉ. *Sur un puits arlésien à Venise* (B. S. G. F., 2^e sér., t. VII, p. 481. — 1876. LEONARDI. *Sull'acqua... Sur l'eau sulfatée magnésienne de Carano, dans la vallée de Fiemme*; rech. anal.-chim. Venise. — 1867. PAZIENTI (A.). *Bibliografia dell'Acqua minerale di Staro* (R. Ist. Veneto di Scienze, 3^e sér., t. XIII).

³ *Carte géologique de von Hauer*, feuille 6. — 1883. STUR. *Geol. Verhältnisse der*

Au sud-est de la Styrie et presque à la limite de la Carniole, à 10 km. au sud de Cilli, sur la ligne de Cilli à Laibach, on trouve, près de *Tüffer*, les sources de *Franz-Josefsbad*, sur la rive gauche de la Sann, au pied du *Hamburg*. Ces sources chaudes, sans minéralisation, ont environ 37°. Elles sont analogues à celles de *Neuhaus* et de *Römerbad* (9 km. plus loin).

Les sources de *Römerbad* (en slave : *Teplitz*, ou bain chaud), déjà connues des Romains, ont 36°.

Celles de *Neuhaus* (339 m. d'altitude), analogues à celles de *Pfäfers*, sont à 17 km. N.-O. de Cilli, sur une vallée descendant des Alpes de *Sulzbach*.

Géologiquement, au sud de la vallée de la Drave, une grande chaîne, nettement E.-O., constitue les Alpes de Carinthie et le massif des *Hrauanken*. Vers *Villach*, cette chaîne commence à faire l'éventail et un rameau E.-O. se continue vers *Feistritz*, tandis qu'un autre se dirige au S.-E. vers la Bosnie, parallèlement à l'Adriatique.

La chaîne E.-O. est celle où reparaît le soubassement primitif de granite et gneiss à l'ouest de *Marburg*, avec un manteau de terrains anciens, du carbonifère au trias, qui constitue la masse de tous les autres anticlinaux.

Un de ces anticlinaux E.-O. apparaît entre Cilli et *Tüffer* : c'est celui où l'on exploite les charbons carbonifères de *Hrastnig*, triasiques de *Trifail*. A son pied sud, entre ce massif et un autre semblable, se trouve la mine de plomb de *Littai* ; une dépression, de même direction E.-O., est occupée par du tertiaire, notamment le calcaire de la *Leitha* et les couches marines, sur lesquelles il repose. Les sources de *Tüffer* sont au pied sud du premier bassin ; *Römerbad*, au pied nord du second.

Un peu à l'est de la même région, en Croatie, près de la limite styrienne, on trouve, entre la Drave et la *Save*, les deux sources chaudes (*Töplitz*), peu minéralisées, de *Warasdin* et de *Krapina*, qui ont été étudiées par von *Hauer*.

La source sulfureuse de *Warasdin Töplitz* se trouve au milieu de la mollasse, dont le terme inférieur est un calcaire grossier fossilifère. Ce terrain contient, à proximité, des lignites et des minerais de fer argileux.

La source, qui avait déjà été captée par les Romains dans un bassin de marbre (*Aquæ Jassæ*), est conduite à un bassin réfrigérant, avant d'arriver aux bains. Sa température est de 57° : ce qui, en l'absence de toute montagne importante au voisinage, dénote un trajet souterrain probablement considérable. Le poids spécifique est, à 25°, de 1,000857.

La minéralisation comprend du sulfate de soude, du chlorure de sodium, du bicarbonate de chaux et un peu d'hydrogène sulfuré.

Les deux sources de *Krapina-Töplitz* sont à la limite de la Styrie et de la Croatie, presque au centre de ce qu'on appelle la Suisse croate, au pied du *Zasadberg*. Elles sortent du *Leithakalk* (accompagné, dans le pays, de grès et marnes). Peu minéralisées (0,2917 gr. de résidu fixe par litre), elles paraissent devoir surtout leur action à leur haute température : 41°,8 à 43°,4.

wasserführenden Schichten des Untergrundes in der Umgegend der Stadt Furstenfeld in Steiermark (Jahrb. d. k. k. geol. R., t. XXXIII, p. 375). — 1890. A. DEVARDA. *Analyse des Mineralwassers von Costalta, im Pinethal, Südtirol* (Jahrb. d. k. k. g. R. Wien, vol. XL, p. 515).

Puis, en Istrie, sur la zone disloquée par l'effondrement de l'Atlantique, nous trouvons les deux sources de *Monfalcone*¹ (cercle de Görz) et *San Stefano*² (près Trieste), dont l'allure, très spéciale, semble due à celle de ces curieux calcaires, crevassés et fissurés, qui constituent le Karst.

A San Stefano, on a une source saline et sulfurée accidentelle, à 37°, qui sort dans une belle grotte, au pied d'une falaise de 80 m. Sa minéralisation, assez forte, comprend :

Résidu fixe, 3,07 gr. ; $MgCl^2 = 1,43$; $CaOSO^3 = 0,56$; $NaCl = 0,27$; $Na^2OSO^3 = 0,30$; $CaO_2CO^2 = 0,20$; $SiO^2 = 0,02$; H²S libre = 0,035.

Les sources de Monfalcone, déjà citées par Pline³ et captées par les Romains, puis retrouvées vers 1433, sont près de la mer, au milieu de marais. Elles remplissent, dans le calcaire créacé, parfois noirâtre et à odeur bitumineuse, une sorte de vasque naturelle, dont le niveau oscille avec celui de la mer, en sorte qu'on a cru, pendant longtemps, à des infiltrations directes d'eau de mer, venant se mélanger, en plus ou moins forte proportion, avec l'eau thermale. En réalité, comme l'a montré Von Hauer, cette influence de la marée correspond à une action de pression hydrostatique sur les filets hydrothermaux souterrains : action comparable à celle qu'on observe, dans des conditions tout à fait analogues, à Balaruc. L'analyse donne, en effet, une composition identique à mer haute et à mer basse. Il n'en est pas moins probable que cette source, remarquablement chlorurée, provient originairement d'une infiltration marine, échauffée en profondeur ; mais cette infiltration se fait peut-être à une grande distance, et l'eau salée ne remonte au jour qu'après un long trajet souterrain.

La température est de 17° environ ; la composition par litre comprend :

$NaCl = 9,60$; $MgCl^2 = 1,53$; $CaOSO^3 = 0,87$; $Na^2OSO^3 = 0,65$; $K^2OSO^3 = 0,24$; $CaO_2CO^2 = 0,18$; $SiO^2 = 0,014$; total = 13, 68 gr.

¹ 1858. VON HAUER (Jahrb. d. g. Reichs in Wien, IX, 163, 229, 276, et Verh., p. 68).

² 1858 VON HAUER (Jahrb. d. g. Reichs in Wien, IX, 97, et Verh., IX, 100, 121). Voir, sur les *fractures du Karst* : SUËSS, *loc cit.*, I, 345.

³ Liv. III, ch. xxvi.

§ 3. — *Carpathes et plaine hongroise*¹

En abordant une région d'éruptions volcaniques récentes et d'effondrements tertiaires, comme la chaîne des Carpathes et la plaine hongroise, qu'enveloppe leur concavité, nous devons nous attendre à trouver des sources thermales nombreuses, et, notamment, des sources carbonatées. La catégorie des sources salines ne nous fera pas non plus défaut; car, dans toute cette zone carpathique, nous rencontrons des dépôts salifères et gypseux remarquablement développés, non plus dans le trias ou le permien, comme c'était le cas pour toutes les zones influencées par les plissements hercyniens, mais dans le tertiaire, et spécialement dans cet étage miocène, marqué par un recul si général de la mer, que l'on appelle le *Schlier*² et qui suit, d'une façon si remarquable, le bord externe des Carpathes et des Apennins.

1821. *Die besuchtesten Badeörter und Gesundbr. des österreichischen Kaiserl.* (in-8°, Brunn). — Dr ROTTREAU. *Eaux minérales d'Allemagne et de Hongrie.* — 1836. MELION. *Ueber die balneographische Litteratur Mährens* (Mähr-Schles. Ges. des Ackerbaues, der Natur und Landeskunde, t. IX). — 1883. HAUER (F.). *Wasserverhältnisse in den Kesseltalern von Krain.* — 1887. FISCHER (S.). *Die Salzquellen Ungarn's* (Földtani Közlöny, XVII, p. 449), avec bibliographie de 1780 à 1884. — 1891. SZABONCHA. *Zrodla mineralne Galicji (les Sources minérales de la Galicie)*, in-8°, 114 p. Krakow (Académie de Krakovie, t. XXII).

Voir, sur la Moravie et la région de Vienne, dont nous dirons un mot plus loin LUDWIG (E.). *Analyse der Mineralquellen von Johannisbrunn, in Mähren.* — 1868. REINER. *Analyse des eaux minérales de Sauerbrunn, près Wiener Neustadt* (Vienne, Gerold fils). — 1878. C. VON HAUER. *Die Eisenquelle in Ober-Weidlinzau, bei Wien*, (V. der k. k. p. R., n° 16-18, p. 288. — 1882. BURGERSTEIN. *Geol. Studien über die Therme von Deutsch Altenburg an der Donau* (Ac. d. Sc. d'Autriche, t. XLV, p. 107). — 1883. KRIG. *Der Lauf der unterirdischen Gewässer in den devonischen Kalcken Mährens* (Jahrb. d. k. k. geol. R., XXXIII, p. — 253). 1890. JOHN UND FOULON. *Chemische Untersuchung der vier Trinkquellen von Luhatschowitz, in Mähren.* — 1893. MAKOWSKY (A.). *Die Mineralquellen von Andersdorf, in Mähren* (Ver. naturh. Ver. in Brunn, t. XXXI, Abhandl., p. 137-144).

Voir encore, sur quelques sources autrichiennes ou hongroises, dont nous n'aurons pas l'occasion de parler. — 1883. BÉLA TOBORFFY. *Chemische Analyse der Rudolfs-Quelle von Ploszko.* (Földtani Közlöny, t. XIII, n° 11-12, p. 409, Budapest). — 1887. THAN (C.). *Chemische Untersuchung der Haupt-Quelle von Tata-Tovaros.* — 1890. L. v. LOSVEY. *Die chemische Analyse der Sarolta Quelle* (Földtani Közlöny, t. XX, p. 430, Budapest, 1890). — 1893. LEI GYEL (B. v.). *Die Schwefelquelle von Kolop* (Földtani Közlöny, t. XXIII, p. 293-295, en allemand, et p. 261-264, en hongrois).

² *Giles minéraux et métall.*, I, 501. — Voir, sur cette question du Schlier : SUSS, *loc. cit.*, t. I, p. 398 à 406, avec bibliog. dans les notes. — Sur les sources salines de Galicie en relation avec le Schlier, on peut consulter : 1876. M. KELB. *Die Soolequellen von Galizien* (J. d. k. k. geol. Reichs., XXVI, p. 435, 169, pl. XIV). — C'est le Schlier qui fournit les grandes masses de sel de *Wieliczka* et *Bochnia*, de *Parajd*, *Deesakna*, *Thorda*, *Maros-Ujvar*, *Visakna*, etc., les sources salines iodurées et parfois bromurées de *Hall*, *Luhatschowitz*, *Darkau*, *Gotschalkowitz*, etc., les sources magnésiennes de *Lau*, *Seelowitz*. Le même niveau se poursuit en Lycie et en Perse, où nous le retrouverons.

Il y a, dans cette dernière observation, plus qu'un fait accidentel : le long de tous les rameaux divergents des Alpes, qu'il nous reste à étudier maintenant, Carpathes, Apennins, Atlas, Caucase, etc., nous allons trouver des dépôts d'évaporation salins, datant tous du tertiaire, avec sources salines connexes, comme, dans toute la zone ébranlée par les mouvements hercyniens, nous les trouvons, jusqu'ici, dans le trias : cela tient évidemment à ce que les reculs de la mer et les localisations de lagunes salées, nécessaires à la formation de ce genre de dépôts, ont été, à ces deux époques, pour deux portions distinctes du continent européen, une conséquence directe des mouvements de plissement du sol.

Et, en même temps, nous voyons apparaître, avec le sel, souvent dans les sources salées elles-mêmes, des éléments, dont l'intime liaison avec le chlorure de sodium est, pour une cause ou pour une autre, un fait extrêmement général ; ce sont les hydrocarbures, pétroles, bitumes, etc., qui existent dans les Carpathes, les Apennins, le Caucase, etc., en relation avec les mêmes terrains tertiaires.

Cette liaison des hydrocarbures avec les gîtes salins était, d'ailleurs, également à noter précédemment pour les dépôts permotriasiques, puisque nous trouvons, dans le permien de France, d'Allemagne, d'Autriche et de Russie, une série de dépôts bitumineux (schistes de l'Allier, de l'Autunois, du Mansfeld, etc.), en rapprochement très fréquent avec des dépôts de gypse ou de sel. Mais, pour le sujet spécial qui nous occupe, elle devient particulièrement importante maintenant, puisque nous allons avoir à étudier, dans divers pays, de véritables sources salées pétrolifères.

Si nous commençons par la région effondrée du *bassin de Vienne*, en relation avec la bordure orientale des Alpes, nous avons à signaler, sur les limites S.-O. et E., un certain nombre de sources salines chaudes, dont la principale est *Baden* au S.-O. ¹.

Les eaux très fréquentées de *Baden* (*Aquæ Pannonicæ*), à une quinzaine de kilomètres de Vienne, sont des eaux sulfurées calciques, à 40°, comparables à celles d'Aix-la-Chapelle. Leur débit par vingt-quatre heures atteint 2 000 m³. Leur minéralisation comprend 1,65 gr. de principes salins (sulfate, carbonate et sulfure de calcium, etc.), et 0,026 lit. d'hydrogène sulfuré.

Vöslau, près de Baden, est une source simplement thermale.

1866. SUESS, *loc. cit.*, I, 174. — 1872. BOUÉ. *Sur les sources thermales de Vöslau* (B. S. G. F., 2^e t. XXIX, p. 248).

En suivant maintenant la chaîne des Carpathes de l'O. à l'E., nous trouvons, d'abord, près de la frontière de Moravie, à l'O. du Tatra, la région des comitats de Trenczin et Turocz, dont les sources thermales ont été spécialement étudiées par von Andrian¹.

Toute cette zone éruptive du Tatra, fortement disloquée par les effondrements de la plaine hongroise et pénétrée d'acide carbonique par les phénomènes volcaniques, est remarquablement riche en sources thermales : sources carbonatées, presque partout disposées, comme dans le Plateau Central français, sur la périphérie des bassins d'affaissement remplis par des dépôts tertiaires, quelquefois pourtant aussi dans leur centre, en rapport probable avec une réapparition de roche éruptive.

Ainsi Von Andrian signale les sources à acide carbonique libre de *Budis*, *Dubowa* et *Tot-Prona*, au bord est du Zargebirg, et les thermes de *Baimotz*, au bord est du massif de Magura, tandis qu'on trouve, au milieu de la dépression de Turocz, les thermes de *Stuben* et les sources acidulées faibles de la région de *Saint-Martin*.

Ces relations sont encore plus nettes à l'est, dans la vallée d'affaissement de *Szliacs*², aux sources abondantes.

Les manifestations hydrothermales de cette région semblent les derniers vestiges d'une activité interne, qui a produit, récemment, à Turocz, des travertins calcaires très développés.

Les sources, toujours riches en acide carbonique libre, peuvent avoir, d'ailleurs, des compositions variables.

Par exemple, *Stuben* (ou *Stubnya*) est une source carbonatée calcique à 42°, renfermant, outre le carbonate de chaux, des sulfates de soude, magnésie et chaux.

A *Szliacs*, les eaux sont sulfatées ferrugineuses, à 33°

Vers l'est, dans le comitat de Liptau, au sud du Tatra, les sources froides de *Korytnyjoza* sont également acidulées.

Au sud de cette région de Turocz, se trouve le fameux district minier de Kremnitz et Schemnitz (comitats de Bars et de Honth), où les sources thermales, pour la plupart carbonatées, sont également très abondantes³ et en relation très nette avec les manifestations éruptives.

Ainsi, dans le sud-ouest du massif trachytique de Schemnitz, les sources de

¹ 1866. V. ANDRIAN. *Thuroczer und Trencschiner Comitat* (Jahrb. d. k. k. g. Reichs., t. XVI, p. 184).

² 1862. HASENFELD. *Eaux ferrugineuses thermales de Szliacs* (en Hongrie), in-8°, 29 p. Paris, Gernier Baillière.

³ Voir 1866. M. PAUL. *Der östliche Theil des Schemnitzer Trachytgebirges* (Jahrb. d. k. k. g. Reichs., t. XVI, p. 171). — 1866. V. ANDRIAN. *Das S. W. Ende des Schemnitz-Kremnitz Trachytstockes* (Jahrb. d. k. k. geol. Reichs., t. XVI, p. 417). — H. WOLF. *Comitat de Honth* (Verh. d. k. k. geol. Reichs., t. IX, p. 152). — 1873. ZELLER et HENRY. *Le district de Schemnitz* (Ann. d. M., 7^e sér., t. III, p. 307). — 1893. FUCHS et DE LAUNAY. *Gîtes minéraux et métallifères*, t. II, p. 783 à 793.

Vichnje (Vihnye) et *Szkleno* sont, d'après V. Andrian, en rapport évident avec les cassures éruptives de la rhyolithe.

La source de *Vichnje*, à 38°, sourd entre la rhyolithe et un calcaire. C'est une eau bicarbonatée ferrugineuse, assez peu minéralisée aujourd'hui, mais qui a déposé jadis des tufs très abondants.

À *Szkleno*, les sources, également en rapport avec des rhyolithes, sortent, à 50°, d'un terrain très chaud lui-même à leur voisinage. Elles contiennent du sulfate de chaux.

La source d'*Eisenbach*, près Schemnitz, sort également des tufs rhyolithiques.

Celle de *Szanto*, près Ipolysagh (au sud de Schemnitz, comitat de Honth) est, d'après H. Wolf, une source acidulée à 12°,5, qui s'est substituée à celle de Szalatnya, près Egegh, disparue après un tremblement de terre.

Tout à côté, celle de *Magyarad*, à 29°, dépose des travertins abondants, qui amènent, comme dans la plupart des sources carbonatées semblables (Illummam Meskoutine, etc.), un déplacement progressif des griffons.

Ces dépôts de travertins, très développés dans toute cette région de Schemnitz, paraissent, d'après quelques fossiles qu'on y a rencontrés, avoir commencé à se former anciennement, aussitôt après les éruptions trachytiques.

Nous pourrions continuer une énumération semblable pour toute la longueur des Carpathes; nous nous bornerons à citer quelques sources connues sur le versant intérieur des Carpathes ¹ :

Dans le comitat de Saros, les eaux froides et gazeuses de *Bartfa* (Na^2O , 2CO^2 = 4,849 gr.; NaCl = 1,165, etc.; résidu fixe = 7,169; CO^2 = 2,154 gr.);

Dans celui de Unghvar (un peu au nord-est d'Unghvar), *Szobrancs*: eaux chlorurées froides (NaCl = 6,19 gr.), en rapport avec le sel miocène;

Dans celui de Marmaros, quelques eaux salées, en rapport avec les gîtes de sel de la région ²;

Puis, en *Bukowine* ³, des sources acidulées, sortant au contact des brèches d'andésite et des formations sédimentaires;

À l'est de la Transylvanie, dans le comitat de Csik, les eaux acidulées et chlorurées de *Tusnad* (12 à 24°) et dans celui de Haromsek, les eaux bicarbonatées sodiques froides de *Elöpalak*;

Enfin, en retournant vers l'ouest, le long des Carpathes, dans le comitat de Krasso (Banat), célèbre pour ses gisements de fer, cuivre etc., de Dognacska, Oravicza, etc. les eaux salines à 46 et 62° d'*Herküles fürdo* (Thermæ Herculis), près de Mehadia.

Pour terminer ce qui est relatif à la Hongrie, nous devons maintenant nous éloigner de la chaîne carpathique, dans la direction de la plaine.

¹ La zone pétrolifère de Dukla, Krosno, Sanok, Drohobycz, Boryslaw et Kolomea (Sloboda) est, au contraire, sur le versant extérieur en Galicie. C'est de ce côté extérieur que sont aussi les grands gisements de sels tertiaires de Wieliczka, près Krakau et Kalusz. Mais le même étage est salifère également à l'intérieur de la courbure des Carpathes, dans le comitat de Marmaros et la Transylvanie, entre Marmaros Szigeth et Maros Ujvar.

² 1893. NURICSAU (J.). *Die chemische Analyse der Salzquellen von Torda* (Földtani Közlöny, t. XXIII, p. 296-298, en allemand, et 264-271, en hongrois).

1869. BARBER. *Chemische Analyse der Mineralquellen... Analyse chimique des sources minérales de Dorna Watra et Pajand Negri, dans la Bukowine*, Vienne.

Autour de *Budapest*¹, dans l'île Sainte-Marguerite, sur le Danube, etc., il existe une série de sources salines, sulfatées calciques ou sulfatées sodiques, entre 28° et 77°, dont la plus célèbre est celle de *Hunyadi-Janos*.

Vers l'ouest, en gagnant les bords du lac Balaton (comitat de Sala), au nord-ouest duquel sont une série de pointements basaltiques, on retrouve, tout naturellement, les sources bicarbonatées gazeuses, telles que la source froide de *Balaton Füred*.

Enfin, il convient de noter, entre la Drave et la Save, dans la Slavonie², comitat de Pozega, et entre la Drave et le Danube, dans le comitat de Baranya, en rapport avec des pointements trachytiques et basaltiques et avec le tertiaire salifère, les eaux bicarbonatées chlorurées sodiques à 64° de *Lipik*, celles sulfatées calciques à 46° de *Darwār* et enfin celles sulfurées sodiques à 62° de *Harkany*³.

En Roumanie, la plupart des sources minérales sont situées dans les Carpathes. Parmi les plus connues, on cite⁴ : *Slanic* (eaux carbonatées et chlorurées), *Gocora* (eaux salines), *Calimanesti* (sulfatée calcique), *Strunga* (bicarbonatée), *Baltzalesci* (saline).

§ 4. — Apennins et Sicile⁵, Corse, Sardaigne.

La longueur de la péninsule italienne, depuis la Ligurie jusqu'à la Calabre, est assurément une des régions les plus riches en sources thermales que l'on puisse rencontrer. Toutes les conditions sont, en effet, réunies pour produire là des manifestations hydro-

¹ 1881-82. LABAT. *Origine des eaux thermales et minérales de Pesth* (B. S. G. F., 3^e série, t. X, p. 229).

² 1862. D. SFUR. *Sur les sources thermales iodifères et ferrugineuses du nord-ouest de l'Esclavonie* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XIX, p. 420). — POSI. *Analyse des eaux minérales de Türgut-Neamitz* (Bull. de la Soc. des médecins et des naturalistes de Moldavie, 2^e année, Iassy). — 1832. WESTRUMB. *Recherches physico-chimiques sur les eaux sulfureuses de Winzlas* (Ann. d. M., 3^e sér., t. I, p. 415).

³ Voir, plus loin, le chapitre relatif au captage.

— 1887. D' CANTIMIS. *Les bains minéraux de Ballatesci* (Roumanie), in-12, 80 p. — 1896. CVJIC (J.). *Quellen, Torfmoore und Wasserfälle Ostserbiens*, in-8°, 121 p., Belgrad. — 1897. LEYDEN. *Ueber die Heilquellen, Bäder und Curorte Roumaniens* (Deut. Med. Woch., Leipzig u. Berlin, 2 sept. 1897).

⁴ Comme ouvrages généraux, consulter : 1864. G. GARELLI. *Delle acque minerali d'Italia e delle loro applicazioni terapeutiche* (1 vol. de 516 p. in-8° avec carte; Torino). — 1869. MINISTERO DI AGRICOLTURA... *Statistica del Regno d'Italia. Acque minerali*, avec bibliographie. — 1868-1876. JERVIS GUGLIELMO. *Guida alle acque minerali d'Italia. Cenni storici e geologici, coll' indicazione delle proprietà fisiche, chimiche e mediche delle singole sorgenti*, etc. (Torino). — 1877. MANAYRA (P.). *Sulla Guida alle acque minerali de Jervis*. — 1885. SCHIVARDI. *Guida descrittiva e medica alle acque minerali ed ai bagni d'Italia* (Milano, Dumolard). — 1892. *Relazione sul servizio minerario nel 1890*. — Notizie sulla produzione del Petrolio in Italia, p. 43 à 56, avec carte. — 1896. BERTONI. *Composizione di acque minerali*. Livourne-tip. A. De batti. In-8°, 4 p. (Extr. de l'Annuario del Laboratorio di chimica generale e tecnologia d. r. accad. navale di Livorno).

thermales abondantes et nombreuses : dislocations récentes du sol, traduites, non seulement par des plissements (qui, nous l'avons vu, sont peu favorables à la brusque remontée des eaux souterraines), mais aussi par des effondrements ; volcans modernes, parfois encore en activité, ou, tout au moins, éteints depuis un temps très court, de la Toscane à la province de Naples et en Sicile ; enfin, gîtes salifères dans le tertiaire plissé des Apennins.

On trouve donc ici : les eaux à haute température, les eaux bicarbonatées, les eaux salines chlorurées sodiques, sulfatées calciques ou sodiques, sulfurées calciques, etc., et enfin des manifestations d'un type spécial, telles que les eaux salées pétrolifères de l'Emilie, ou les eaux chaudes, riches en acide borique, des soffioni de Toscane.

Lorsqu'on examine une carte hydrominérale de l'Italie (fig. 61), on voit, d'abord, au nord des Apennins, un premier groupe de sources salines généralement froides et peu importantes, entre Gènes et Turin, avec une seule source saline à haute température, celle d'*Acqui*.

Ce genre de sources salines se poursuit, sur le versant nord des Apennins, en relation avec la formation dite gypsosulfureuse (entre le miocène et le pliocène), particulièrement de Bologne à Ancône.

Il est accompagné par la série des sources pétrolifères et salifères de l'Emilie, entre Plaisance et Bologne.

Puis, si l'on dépasse Ancône vers le sud, les sources thermales font tout à fait défaut sur le versant est des Apennins. Au contraire, sur le versant ouest, qui offre la série des manifestations éruptives récentes, on a la multitude des sources chaudes bicarbonatées de la Toscane, de la province de Rome et de celle de Naples, avec une série de sources chlorurées, sulfatées ou sulfureuses, soit en relation avec le tertiaire salifère et gypseux, soit, comme dans la région volcanique de Naples, simplement situées sur le rivage disloqué de la mer, qui paraît les alimenter par ses infiltrations.

Nous allons, comme nous l'avons fait pour les chaînes précédentes, suivre les Apennins du nord au sud, en décrivant, chemin faisant, les sources les plus intéressantes.

Nous avons déjà, à l'occasion des Alpes, mentionné quelques sources du Piémont ; mais la plupart, comprises entre Gènes et Turin, se rattachent au versant nord des Apennins.

Ces sources sont surtout des eaux salines froides ou chaudes, parfois des



Fig. 61. — Carte des sources thermo-minérales d'Italie.

Echelle au $\frac{1}{7.230.000}$

eaux à sulfure de sodium dérivant du sulfate, comme *Lampiano* et *Murisengo*, à l'est de Turin ; une seule produit de l'acide carbonique avec quelque abondance, celle de *Grognaudo*, près d'Acqui (bicarbonates de chaux et magnésic, sulfate de chaux), à la limite du massif de roches serpentines éocènes de Gènes.

Les sources à chlorure de sodium, ou sulfate de chaux, sont nombreuses, mais sans grande importance et presque toutes froides, entre le Pô et les Apennins :

San Genesio : 12°. Poids des sels : 2,50 gr., dont 2,40 gr. de chlorure de sodium et 0,27 gr. de carbonate de soude.

Montafia : 12° (12 m³ par vingt-quatre heures) : carbonates de soude, magnésic, sulfate de soude, chlorure de sodium.

Calliano : 12°. Poids des sels : 3,14 gr., dont 1,51 de sulfate de chaux, 0,50 de carbonate de chaux, 0,30 de carbonate de magnésic ; dégagements d'hydrogène sulfuré. Lors du tremblement de terre de Lisbonne (31 octobre 1755), il se produisit, près de là, à Castello Allieri, des épanchements sulfureux dans des sources alimentant les puits et ceux-ci ne furent clarifiés qu'après un autre tremblement de terre en 1808. Ces sources de Calliano sont dans le pliocène.

Lu : 12°. Débit : 1 200 litres par vingt-quatre heures. Poids des sels : 3,75 gr. dont 1,95 de chlorure de sodium, 0,75 de sulfate de chaux, 0,54 de carbonate de chaux, 0,49 de chlorure de calcium (contact de l'éocène et du miocène).

Une apparition de la zone gypsosulfureuse, parallèlement au Pô, près de Voghera, est marquée par quelques sources gypseuses ou chlorurées, dont la principale est *Sales*¹ : 8° ; source fortement chlorurée ; 30,23 gr. de sels, dont 13,94 de NaCl ; 7,80 de MgCl² ; 6,31 de CaCl² ; 2 de AzH⁴Cl² (formation gypsosulfureuse).

On a, en outre, quelques petites sources froides : *Retorbido*, *Camara*, etc., à 10 ou 12°, avec sulfate de chaux, carbonate de chaux, etc.

Le sud de Voghera présente également, sur les bords de la Staffora, deux concessions de pétrole à *Rivanazzano* et *Godiasco* ; mais les puits servent uniquement à exploiter des eaux salées, analogues à celles de Sales, l'association du sel et du pétrole étant habituelle dans les Apennins (formation gypsosulfureuse). La seule station vraiment importante de la région est Acqui.

*Acqui*², sur la Bormida, à 31 km. S.-O. d'Alexandrie, est sur le miocène.

Du calcaire sort, au milieu de la ville, une source à 75°, la *Bollente*, dont le débit est de 1 000 litres par vingt-quatre heures et qu'on emploie pour les usages domestiques.

¹ 1823. X. *Note sur la présence de l'iode dans l'eau minérale de Sales* (Piémont) (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VIII, p. 293).

² 1879. DE ALESSANDRI. *Acqui, le sue terme...* (avec bibliographie). — 1891. ANTONELLI (GIUSEPPE). *Sui terreni e sulle sorgenti minerali dell'Aspio (Ancona), e sulla loro applicazione all'igiene e alla medicina* (Opusc. in-8°, 16 p.). Roma, tip. Artigianelli. — 1892. FRATINI FORTUNATO. *Vetriolo, Stabilimento balneare climatico* (Milano, Vallardi, 93 p., in-16). — 1894. GUELFI (G.) e BUSCAGLIA (L.). *Analisi chimica dell'acqua di Mele*. Gènes, tip. Ciminago, in-8°, 41 p. (Extr. des *Atti d. Soc. ligustica di sc. naturali e geografiche*).

Cette eau saline tient, d'après Cantu :

NaCl	Na ² OSO ³	CaCl ²	MgCl ²	CaS	CaOSO ⁴
1,55	0,33	0,24	0,20	0,12	0,08

D'autres sources, dites Bagni d'Acqui, sortent, à 1 km. plus loin, de calcaires stratifiés, inclinés au nord-ouest et recouverts par des schistes argileux ; leur température maxima est de 51° ; elles tiennent, d'après Ottavio Ferrario :

NaCl	MgOSO ⁴	Na ² OSO ³	MgCl ²	CaCl ²	CaSH ² S	CO ²	H ² S
0,60	0,17	0,15	0,11	0,10	0,08	0,05 = 35 cc.	0,03 = 29,6 cc.

On utilise surtout, à Acqui, comme à Dax, les boues, dites *fanghi*.

On peut en rapprocher, sur l'autre versant des Apennins, près Gênes, les eaux d'*Acqua Santa*, sources abondantes à 22°, sortant de la serpentine et contenant : CaOSO³ = 4,50 ; CaCl² = 0,19 ; MgCl² = 0,62.

Là aussi on utilise les boues.

Sources salées et pétrolifères de l'Emilie. — Tout le versant est des Apennins, dans une zone parallèle à la grande ligne du chemin de fer de Plaisance à Bologne et San-Marino, au sud de ces villes, présente une remarquable abondance de sources salées, ou, plus rarement, gypseuses, avec lesquelles des suintements de pétrole sont souvent en relation de Plaisance à Imola. C'est sur cette région, notamment, depuis 1891, sur les deux vallées du Riglio et du Chero, entre Plaisance et Fiorenzuola, que portent, presque exclusivement, aujourd'hui, les exploitations pétrolifères italiennes, et, en 1891, sur 1 100 tonnes de pétrole produites en Italie, 935 sont venues du Chéro (Société française Zipperlen et C^{ie}), 75 du Riglio, 60 de la Pescara, dans les Abruzzes, 24 de San-Giovanni-Incarico, au sud du lac Fucin, dans la province de Rome (vallée du Liri).

Toute cette zone pétrolifère, mais surtout sa partie est, à hauteur de Modène et Bologne, est, en même temps, fameuse par ses salses et volcans de boue.

Dès l'antiquité et le moyen âge, on connaissait les fontaines ardentes de Pietra Mala, Porretta, Barigazzo, près de la crête des

Apennins, dont les jets de gaz incendiés éclairaient les voyageurs pendant la nuit. Plus à l'est, on a également, maintes fois, décrit les volcans de boue, ou *bombi*, de Sassuolo près de Modène, de Nirano, etc. En dernier lieu, ces phénomènes curieux ont donné lieu à de beaux travaux de MM. Silvestri, Fouqué¹ et méritent donc, à tous égards, qu'on s'y arrête.

L'origine des dégagements hydrocarbonés, accompagnés d'eau salée, qui constituent les *bombi*, salses, etc., est encore loin d'être bien élucidée.

Si l'on en croyait le rapport officiel fait, en 1892, sur les gisements pétrolifères italiens², ces pétroles, aussi bien dans l'Emilie que dans les vallées de la Pescara ou du Liri, proviendraient toujours des argiles, marnes et sables de la base du miocène, bien qu'on en rencontre aussi dans l'éocène et même, à l'état d'imprégnations asphaltiques, dans le crétacé et le jurassique. Les bassins pétrolifères miocènes de la Pescara et du Liri, qui, autrefois, ne faisaient qu'un, auraient été séparés et disloqués par le soulèvement des Apennins, tandis que le bassin de l'Emilie, tout en subissant les plissements et les fractures, aurait gardé son unité.

D'autre part, M. Carlo de Stefani considère que le pétrole de l'Emilie a certainement une origine plus profonde que le crétacé³.

Toujours est-il que les pétroles apparaissent surtout suivant deux lignes de fracture, parallèles aux Apennins : l'une, de beaucoup prépondérante, dans les marnes subapennines, réunissant les sources importantes de *Velleia* sur le Chero, *Salsomaggiore*, *Medesano*, *Neviano de Rossi*, *Sassuolo*, *Rio*; l'autre, près de la crête des Apennins, à environ 1 100 m. d'altitude, dans l'argile scagliuse ou le macigno, celles de *Corniglio*, *Barigazzo*, *Porretta*, *Pietramala*, etc. Dans l'intervalle, se trouvent encore, à la hauteur de Modène et Bologne, nombre de sources salées et fontaines ardentes.

Les nappes pétrolifères souterraines se comportent, en tous pays,

1866. SILVESTRI. *Sur la salse de Paterno en Sicile* (C. R., t. LXII, p. 646). — 1870. FOUQUÉ et GORCEIX. *Recherches sur les sources de gaz inflammables des Apennins et les lagoni de Toscane* (Ann. Sc. géol., t. II, p. 1). — 1884. SILVESTRI. *Sulla esplorazione dell' Etna*, p. 51. — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, I, 377 à 383 (avec photog. de la salse de Paterno). — 1893. FUCHS et DE LAUNAY. *Gîtes minéraux et métallifères*, I, p. 129 à 137, avec carte et bibliographie.

¹ *Relazione sul servizio minerario nel 1890* (estratto della Rivista mineraria del 1890. Firenze, 56 p., in-8°), p. 43. — Cf. 1881. CAPELLINI. *Carte géologique au $\frac{1}{100\ 000}$ de la province de Bologne*.

² Suivant lui, il n'existe aucun niveau salifère dans le miocène de cette région.

exactement comme des nappes hydrothermales et c'est, outre leur association avec les sources salines, ce qui nous amène à mentionner ici celles de l'Émilie. Mais il y a, toutefois, entre les deux cas, cette différence que les eaux thermales doivent une partie de l'impulsion qui les fait remonter vers la surface à la position plus élevée de leur point d'infiltration, le reste à leur échauffement en profondeur et à la pression des gaz dégagés, tandis que, pour les pétroles, qui, dans toute hypothèse, proviennent d'une certaine profondeur, ce dernier élément doit être prédominant.

Quoi qu'il en soit, une nappe pétrolifère souterraine, emmagasinée sous pression, rencontre-t-elle une fracture transversale, aussitôt elle s'élève par cette fracture. Mais, toujours comme les sources minérales que nous étudions, elle choisit, sur cette fracture, les points les plus bas, de moindre pression, c'est-à-dire l'intersection des vallées, perpendiculaires aux plis comme aux grandes dislocations du pays, pour remonter à la surface. Dans le cas présent, ce sont les vallées de la Staffora, de la Trebbia, du Riglio, du Chero, de la Ghiara, du Taro, de la Secchia, du Panaro, du Reno, du Sillaro, du Santerno, etc.

Quand on admet la théorie d'un niveau pétrolifère constant et unique à la base du miocène, il est assez singulier que beaucoup des principales sources salées et pétrolifères, Bobrio, Velleia (sur le Chero), Neviano et Corniglio, Monterreto, Porretta, etc., se trouvent (d'après la carte géologique au 1/1.000.000) dans l'éocène (recoupé de roches serpentineuses).

Pour MM. Fouqué et Silvestri, l'interprétation de ces faits est toute différente et les sables et volcans de boue de l'Émilie sont des phénomènes assimilables aux volcans proprement dits de l'autre versant des Apennins, c'est-à-dire que les eaux salées remontent d'une profondeur beaucoup plus grande que celle où on constate leurs épanchements, en entraînant avec elles des carbures ?

Il est incontestable qu'il y a, dans l'association générale et constante en tous pays du sel et du pétrole, un phénomène, dont toute théorie tendant à expliquer la formation du pétrole doit tenir grand compte.

Passons maintenant en revue les sources salées ou pétrolifères principales. Comme nous n'avons pas l'intention de décrire, dans cet ouvrage, les autres régions analogues de sources salées pétrolifères, les exemples que nous allons donner pourront servir à titre

de spécimens et montreront les relations réciproques de l'eau salée, des pétroles et des gaz combustibles :

Bobbio : 3 600 litres à l'heure. Température légèrement supérieure à celle de la Trebbie, sur la rive droite de laquelle elle sort ; 3,45 gr. de Na Cl et 0,58 de Ca Cl².

Sources du Riglio (au sud de Gropparello). Anciens puits à pétrole, forés à large section jusqu'à 70 m. Depuis 1889, six sondages. Un peu en amont, une source sulfureuse apporte quelquefois des gouttelettes de pétrole.

Sondages du *Chero* : 12 sondages, commencés depuis 1889 près Velleia.

Salsomaggiore. Association de sources salées avec gaz hydrocarbonés et pétroles, aujourd'hui inutilisés. Propriété domaniale.

Le puits Scotti, ou Artésien, donne 32 000 litres d'eau salée par jour à 16° Baumé, eau utilisée pour la fabrication du sel. On recueille, en outre, du gaz, au moyen d'un tube aboutissant au-dessus de l'eau salée et conduisant à un gazomètre. Deux autres puits, le Balatrone et le puits della Ruota, sont fermés à l'orifice et utilisés seulement pour recueillir les gaz. Ces gaz servent à l'évaporation du sel. De nouveaux sondages, forés, depuis 1888, jusqu'à 670 et 683 m. (puits n° 3 della Rosa)¹, pour chercher du pétrole, fournissent également du gaz, recueilli dans un grand gazomètre de 150 m³ et un peu d'eau salée, utilisée dans un établissement thermal, mais presque pas de pétrole. La pression du gaz, à son arrivée dans le réservoir, est, en moyenne, de 120 mm. d'eau.

On observe, dans le puits n° 3. des éruptions gazeuses violentes, à intervalles réglés, suivies de jets d'eau salée, légèrement pétrolifère. Il sort alors environ 12 m³ d'eau à l'heure ; puis tout rentre dans le calme.

Quant au puits n° 5, qui a atteint 670 m. le 28 avril 1886, il a rencontré un niveau pétrolifère à 484 m. ; puis, au-dessous, des jets de gaz. D'avril 1886 à avril 1889, il a produit un jet d'eau salée, pétrole et gaz, dont on a retiré, en tout, environ 70 000 francs. A ce moment, il y eut un arrêt de dix jours ; puis l'eau revint. En 1891, ce puits donnait un demi-baril de pétrole par jour, avec de l'eau salée et des gaz utilisés.

Enfin, le puits n° 6 (à 225 m. du puits n° 5) a rencontré : à 3,70 m. de l'eau salée, à 5° B ; à 175 m., de l'eau à 15° B, avec gaz abondant ; puis du pétrole à 347 m., 398 m., 465 m., 486 m. ; il est abandonné.

Le puits n° 1, dit le Triomphe, est celui qui, à Salso Maggiore, a donné les plus beaux résultats. En 1884, à 145 m., il a produit, quelque temps, 25 barils de 180 litres par jour, réduits peu à peu à 15 au bout de deux mois ; et, en 1891, à 30 litres par jour. Eau, gaz et pétrole montent du fond par le tube. Les gaz partent du haut du tubage, par un branchement en siphon qui les conduit au gazomètre.

Toujours à Salso Maggiore, la source Tabiano - est très renommée comme

Le sondage de 683 mètres a été fait en quatre-vingt-treize jours. C'est, paraît-il, le plus profond qui existe en Italie.

1843. DEL BUR G. C. *Analisi dell' acqua solforosa di Tabiano* (près Salso Maggiore) (Parma, Carmignani). — 1873. BERZIERI LORENZO. *Guida alle acque solforose minerali di Tabiano* (Parma, Ferrari).

étant la plus riche d'Europe en acide sulfhydrique (75,5 c³. par litre). Elle appartient à l'impératrice Marie-Louise, devenue duchesse de Parme.

A *Miano di Mede-ano*, le pétrole est connu depuis 1400. On trouve, à la surface, des pétroles jaunes, d'autres bruns à 20 m., puis jaunes (gialli) à 50 m. La maison Deutsch, concessionnaire depuis 1889, a fait forer, par Lippmann, en 1885 et 1888, deux puits, sans succès. Un peu en amont, il existe des sources salées, sulfureuses et ferrugineuses.

Neviano de Rossi et *Ozzano* (Fornovo di Taro). Ces deux points ont été également explorés, depuis 1877, par la maison Deutsch. Dans le premier point, on a trouvé du pétrole à 42 m. et 52 m. A *Ozzano*, un premier sondage de 204 m. produit 30 à 50 litres de pétrole par jour ; un second, à 260 m., n'a pas donné de résultats.

A l'est de cette première zone à puits de pétrole, on trouve toute une région de salses, feux naturels, etc., où il n'y a de puits à pétrole qu'en deux points : *Candiano* et *Sassuolo*.

Ces jaillissements de gaz naturels sont très nombreux, et peuvent être observés, notamment :

Sur la première ligne de fractures, à *Sassuolo* (au sud de Modène), *Bassano*, *Sassuno*, et, près d'Imola, à *Riolo* et *Bergullo* ;

Sur la seconde, à *Corniglio*, *Barigazzo*, *Montecreto*, *Porretta*¹.

D'une façon générale on observe, en ces divers points, des dégagements gazeux, accompagnés d'eau salée, sortant de la boue qu'ils soulèvent et qui arrive parfois à former un petit cône de 2 à 3 m. de haut. Les fortes éruptions produisent même de véritables coulées de boues.

L'aspect extérieur du phénomène dépend beaucoup du terrain, où il se produit. Pour qu'il se forme un véritable cône, il faut que ce terrain soit argileux, avec une proportion donnée d'humidité.

Voici les principales de ces salses :

*Sassuolo*² (20 km. S.-O. de Modène), salse très anciennement connue, dans les marnes pliocènes subapennines, au pied du mont *Gibbio*, ayant eu autrefois des éruptions violentes (en dernier lieu, en 1835). Les gaz contiennent : CO² = 0,56 ; Az = 1,38 ; CH⁴ (gaz des marais) = 98,06.

Tout à côté, se trouvent la salse fameuse de *Nirano* et les puits à pétrole improductifs du mont *Gibbio*. D'autres concessions de pétrole abandonnées s'étendent, au sud vers *Montebaranzone*.

Au sud-est de Castel San-Pietro, vers *Sassuno*, les sources salées, à gouttelettes de pétrole, sont nombreuses. Elles sortent, pour la plupart, des argiles scaglieuses, du professeur Cappellini, comprenant des débris de roches crétacées, éocènes et miocènes ou du miocène inférieur. A *Sassuno*, les gaz d'une salse contiennent : CO² = 1,14 ; Az = 0,39 ; CH⁴ = 80,60 ; C⁴H¹² (hydrure d'éthyle) = 17,87.

Près d'Imola, à *Bergullo*, on a : CO² = 0,48 ; Az = 0,59 ; CH⁴ = 98,93.

¹ On trouvera l'étude chimique et la description de ces sources dans le mémoire d. MM. FOUQUÉ et GORCEIX (1872), ainsi que dans la *Relazione sul servizio minerario nel 1891*. — SPALLANZANI. *Voyage dans les Deux-Nicules et quelques parties des Apennins*. — 1839. BIANCONI.

1859. DODERLEIN PIETRO. *L'acqua minerale della sorgente salso-iodica, detta della Sacarola, presso Sassuolo* (Modena, Soliani).

A *Riolo*¹, il y a plusieurs sources froides sulfureuses, salées ou ferrugineuses, de 11° à 13°, utilisées dans un petit établissement et des gaz combustibles :

H ² S	CO ²	NaCl	Na ² SO ⁴	Na ² OCO ³	MgOCO ³	CaOCO ³	CaOSO ⁴
39,28 cc.	9,82 cc.	2,73	1,33	0,30	0,10	0,03	0,02

La *Porretta* (375 m. d'altitude) est, sur la ligne de Bologne à Pistoie, à la traversée des Apennins, une station de bains très fréquentée, avec nombreuses sources salées et sulfureuses, chaudes et froides, remarquables par l'abondance de leurs dégagements hydrocarbonés, salses, etc.

Les argiles scagliuses éocènes ont subi là des failles notables², à la suite desquelles les eaux y ont, d'après M. Fouqué, déposé des cristaux de quartz récents, renfermant des gouttelettes d'eau mobiles et des bulles de gaz de formation récente.

La montagne du Sassocardo est le centre principal d'émanations. De là viennent :

Les sources de la Puzzola à 24° et de la *Porretta Vecchia*, à 32° ;

La source del Leone ; 32°,2, dégageant des gaz : CO² = 3,97 ; Az = 4,61 ; CH⁴ = 89,42 ;

La source dei Bovi ; 32°,5, extrêmement riche en gaz : CO² = 5,72 ; Az = 2,06 ; CH⁴ = 92,22.

En outre, jusqu'à la cime du mont Sassocardo, il se dégage, des fentes du macigno, une série de jets gazeux.

L'ensemble des sources utilisées produit 656 540 litres par vingt-quatre heures. Voici des analyses, d'après Garelli :

PORRETTA	NaCl	Na ² OCO ³	NaI	MgOCO ³	CaOCO ³	Al ² O ³	H ² S	CO ²	CH ⁴
							cc.		
Source del Leone . . .	8,22	0,28	0,09	0,08	0,04	0,04	16,69	5,89	12,76
Source dei Bovi	7,40	0,57	"	"	0,08	0,04	1,69	8,83	56,96
Source Porretta Vecchia	2,40	0,38	0,027	0,05	"	"	23,56	10,86	3,92
Source de la Puzzola . .	2,84	0,12	traces.		0,02	0,04	"	"	"

M. Fouqué a fait remarquer qu'en résumé toutes ces salses

1868. T. SANTOPADRE et F. CARDELLI. *Illustrazione... Histoire des eaux minérales de Riolo*. — 1887. FELETTI (R.). *Sull' acqua solforosa di Riolo, detta della Breta* (in-8°, 5 p. Bologne, Soc. tip. già compositori). — 1888. PANTANELLI (D.). *Le acque sotterranee nella provincia modenese* (in-8°, 12 p. Modène, tip. G.-T. Vincenzi e nipoti).

1861. PARETO (B. S. G. F.). — 1868. BERTOLONI GIUSEPPE. *Della Sostanza albuminoida... Sur la matière albumineuse des eaux sulfureuses de Porretta* (Bologne). — 1891. ANTONELLI GIUSEPPE. *Sui terreni e sulle sorgenti minerali dell' Aspio* (Ancône) (Roma, 16 p., in-8°).

froides dégageaient du gaz des marais, une seule (Sassuno) de l'hydrure d'éthyle, aucune de l'hydrogène libre, contrairement à ce qu'on constate dans les lagoni de Toscane. Les gaz de la Porretta sont les seuls, où la proportion d'acide carbonique dépasse 5 p. 100.

La salse de Sassuno forme une transition avec les gaz inflammables d'Amérique, où la richesse en carbone va de celle du gaz des marais à celle de l'hydrure de propyle. Quand la température augmente, comme à Porretta, la proportion de gaz des marais diminue, celle d'acide carbonique et d'azote augmente, l'hydrogène sulfuré apparaît et donne des sulfures alcalins.

A température plus élevée encore, comme aux lagoni de Toscane, l'hydrogène se montre. l'hydrogène sulfuré et l'acide carbonique deviennent dominants, en même temps que la température arrive à 100°.

Enfin, comme dernier terme de la série, les gaz de Santorin (étudiés par M. Fouqué), ceux d'Islande (décrits par Bunsen), sont surtout formés d'hydrogène, avec très peu de gaz des marais.

C'est-à-dire qu'avec la progression de la température le degré de carburation diminue et l'on se rapproche des types volcaniques : les gaz les plus carburés $C^n H^{2n+2}$ correspondant aux pétroles les plus riches.

Pour M. Fouqué, il y a donc relation intime entre les pétroles, les dégagements de gaz et les volcans, quelle qu'en soit la cause.

Au sud-est de cette zone pétrolifère, on doit encore citer, dans l'extrémité orientale de la Toscane et la portion contiguë de la Marche, avec la république de Saint-Marin, quelques sources bicarbonatées, telles que *Maggiona*, *San Casciano*¹ (à 45°), *Bagno di Romagna* (carbonatée, sodique et chlorurée à 40°), *San Marino* (eaux chlorurées sodiques, sulfatées sodiques et carbonatées).

Toscane, Ombrie et Campagne de Rome. — Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer précédemment, le versant ouest des Apennins présente une abondance de sources chaudes et de sources bicarbonatées, qui s'explique, tout naturellement, par le développement des manifestations éruptives dans la Toscane, l'Ombrie, les provinces de Rome et de Naples. En même temps, on retrouve des sources salines, en relation avec les mêmes niveaux du tertiaire que sur l'autre côté des Apennins.

¹1876. GIORGINI (G). *Acque termo-min. di San Casciano dei Bagni* (in-8°, Siena), avec bibl.

Il nous suffira de citer, du nord au sud ¹ :

Les sources sulfatées calciques de *Lucca*, *Monsummano*, *Asciano*, *S. Giuliano* près *Pise*, *Montevaso*, *Casale*, *M. Alcto*, *Viterbo*, etc. ;

Les chlorurées sodiques de *M^{re} Catini*, *Poggibonsi*, *Catiano di Campiglia*, *Civita Vecchia*, puis *Ischia*, *Bagnoli*, *Pouzzoles*, *Castellamare* ;

Les bicarbonatées de *Fonga*, *Montone*, *Boccheggiano*, *Rapolano* ; puis, dans l'Apennin même, *Maggiona*, *Bagno di Romagna*, *Cilla di Castello*, *Gobbio*, *Nocera*, *Chiangiano*, *San-Gemini*, *Vicarello*, *Roma* (*Acqua acetosa*), *Albano*, *Sujo*, *Mondragone*, et de tous les environs de *Naples* ;

Les soffionis de *Monterotondo* et *Larderello*, près *Volterre* ;

Enfin les sulfurées de *Morbo*, *Petriolo*, *S. Filippo*, *S. Casciano*, *Telesc*, *Migliano*, *Contursi*.

Nous allons maintenant reprendre les principales de ces sources dans un ordre géographique, du nord au sud :

Les eaux de *Lucques* (*Bagni di Lucca*) ² sont fameuses ; elles sont sulfatées calciques et sulfatées sodiques à 35°.

A *Monte Catini* ³, entre *Pistoia* et *Lucques*, non loin des célèbres mines de cuivre du même nom, on trouve un très grand nombre de sources chlorurées sodiques, dont la plus chaude atteint 30°

A *San Giuliano*, près *Pise*, les eaux sulfatées et bicarbonatées calciques atteignent 39°.

Nous donnons ici quelques indications bibliographiques sur des sources, dont nous n'aurons pas à reparler :

1845. PILLA. *Sur un puits artésien dans la plaine de Livourne* (B. S. G. F. 2^e s., II, 402). — 1874. POLLI. *Analisi dell' acqua minerale... Analyses de l'eau minérale de Monte Alfeo et note sur l'action du soufre sur l'eau et les carbonates terreux* (Milan). — 1868. BIZIO. *Supra alcune recenti analisi... Analyses récentes des eaux de Brenta et de Sile*. — 1868. CAMPANI DE GABRIELLI. *Acque... Composition chimique des eaux minérales thermales de Gallivaje, val de Cecina, Toscane*. — 1874. TASSINARI et MARCHETTI. *Relazione di analisi chimica... Rapport sur l'analyse chimique des eaux gazeuses acidules alcalines, avec lithine, de l'établissement Vanucchi, aux thermes antiques de San Martino in Uliveto* (Pise). — 1877. GIULIO. *Notizie intorno alle sorgenti... Notice sur les sources d'eau ferrugineo-gazeuse de la vallée de l'Inferno en Toscane, près Lerane. Analyses par le chevalier A. Torgiano Torzetti* (Florence). — 1893. MASINI (V.). *Dell' acqua minerale di Luiano : relazione d'analisi chimica*. Castelfiorentino. — 1893. FESTINI (F.) et MARTINI (D.). *Analisi chimica dell' acqua acidula ferro-magnesi-fera della Polla di Piersanti, presso Nugola* (Colle Salvetti) (Firenze). — 1896. ANDREOCCHI (A.) et CELSO (V.). — *Relazione dell' analisi chimica dell' acqua acidula di Vasciano, presso Tudi*. Roma, tip. delle Mantellate. In-16, 7 p. (Extr. de la *Rivista d'igiene e sanità pubblica*).

1823. SIR H. DAVY. *Sur un dépôt trouvé dans les eaux de Lucca* (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. VIII, p. 355). — 1874. G. OROSI. *Dell' acqua minerale... Sur l'eau minérale du Val di Conca, près Viareggio* (Lucca).

- 1860. PÉRIER. *Notice sur les eaux minérales de Monte-Catini* (in-8°, 19 p. Paris, Rozier). — 1876. A. LABAT. *Étude sur la station et les eaux de Monte-Catini* (Toscane), in-8°, 24 p., Paris. — 1882. BECCHI. *Analisi chimica... Analyse chimique de deux eaux minérales récemment découvertes à Monte-Catini*, in-16, 11 p., Florence. — 1885. DIEULAFAIT. *Nouvelle contribution à la question de l'origine de l'acide borique : eaux de Monte-Catini* (Italie) (C. R., t. C, n° 18, p. 1240, Paris).

Puis on trouve, près de Volterre, la curieuse région des *soffioni et lagoni de Toscane* ¹

D'après le dernier mémoire de M. de Stefani sur cette question, les sources chaudes, d'allure geysérienne, sont réparties sur un assez large espace, dans les bassins de la Cecina et de la Cornia et jaillissent de terrains très divers, en particulier de calcaires infraliasiques, au voisinage de pointements éruptifs récents. La température de la vapeur dépasse 100 degrés et peut atteindre 175°. Elle contient de l'acide sulfhydrique, de l'acide carbonique, de l'hydrocarbure, de l'azote et une certaine proportion d'acide borique, qui est industriellement utilisée depuis 1827.

Les principales exploitations sont celles de Larderello et du Lago Zolfereo, près Monterotondo.

Il est évident qu'on a là affaire à cette catégorie de sources thermales, qui tirent leur température anormale et leur forte minéralisation de leur rapport avec des terrains échauffés par le volcanisme ; mais l'origine première du bore, contenu dans ces sortes de geysers, est discutable et certains chimistes ont voulu y voir le produit d'une simple dissolution saline, ayant porté sur des gîtes d'évaporation anciens, qui contenaient ce bore dans les mêmes conditions que celui de Stassfurt (Anhalt) au milieu des sels potassiques, ou de Panderma (Turquie d'Asie) dans le gypse. Une semblable théorie peut être spécieuse ; mais il n'est pas contestable que l'abondance de l'acide borique dans les eaux thermales est exclusivement concentrée dans les régions volcaniques (Californie, Toscane, etc.) et il semble donc naturel de faire intervenir le volcanisme, d'une façon quelconque, dans ce phénomène.

La région trachytique du *Monte Amiata* (au N.-E. de Grosseto), connue pour ses mines de mercure du Siele ², présente, comme bien des districts cinabrifères, où le mercure est de formation récente (Californie, Sulphurbank, etc.), de nombreuses sources chaudes, chargées d'hydrogène sulfuré et d'acide carbonique (San Filippo, etc.).

Voir : 1850. MURCHISON (Quart. Journ. of geol. Soc., 27 mars 1850, t. VI, p. 367). — 1870. FOUQUÉ et GORCEIX (Ann. Soc. géol., t. II, p. 84 à 94). — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterr.* (t. I, p. 398 à 407). — 1896. C. DE STEFANI. *I soffioni boraciferi della Toscana* (Mém. Soc. géogr. Ital., 1896, p. 410-435), avec carte.

Gîtes minéraux et métallifères, II, 699 à 703, avec bibliographie jusqu'en 1892. — 1892. DE STEFANI. *Vulcano del Monte Amiata* (Bol. Soc. geol. ital., t. X, fasc. 3, avec bibl.).

Cette catégorie de sources se développe, comme on peut s'y attendre, lorsqu'on entre dans cette grande zone volcanique, qui occupe toute la campagne romaine depuis le lac Bolsène et Viterbe, jusqu'à Rome, Albano et Frosinone.

Parmi les nombreuses sources bicarbonatées ou sulfurées de cette région, celles des environs immédiats de Rome, *Acqua acetosa*, *Acque albule* (Tivoli), *Albano*, ne sont pas les moins connues et utilisées.

Acqua acetosa est à 3 km. de Rome, entre le pont Molle et le confluent de l'Arno; c'est une eau acidulée à 16°; *Acque albule* est une eau sulfurée calcique froide et *Albano* une source saline à 30°.

On peut encore citer, dans la même région, à *Civita Vecchia*, sur la zone éocène, qui entoure le massif trachytique, où sont les mines d'alunite de la Tolfa, une eau saline chlorurée sodique et sulfatée calcique à 30°¹.

Province de Naples². — La région de Naples, avec ses manifestations volcaniques actuelles du Vésuve et de Pouzzoles, forme un centre hydrothermal tout naturellement indiqué; un volcan, comme le Vésuve, constitue, d'ailleurs, nous l'avons vu, une source thermale de proportions gigantesques et d'activité poussée au paroxysme.

Un grand nombre de ces sources, situées au voisinage immédiat de la mer, sont, comme dans toutes les régions volcaniques analogues, des eaux salines, qui doivent résulter d'infiltrations marines, circulant souterrainement dans un sol crevassé et remontant à la faveur de leur thermalité même. Il suffit de citer les innombrables sources chlorurées sodiques, qui suivent toute la côte nord d'*Ischia* (fig. 12, p. 70) : les eaux de *Cappone*, *Citara*, *Fontana*, *Fornello*, *Gurgitello*, *Olmitello*, *Castiglione*, etc.

On retrouve des eaux identiques à *Bagnoli*, à *Pouzzoles* et à

1888. CESARIS (L. DE) et V. VOLPINI. *Le acque minerali di Viterbo* (in-16, 51 p. Viterbe, tip. Agnesotti). — 1879. PONZI. *Le acque del bacino di Roma* (gr. in-8°, 23 p., Rome). — 1885. MELI (R.). *Bibliog. dell. acque potabili e minerali della prov. di Roma* (in-8, Roma). — 1891. STATUTI (A.). *L'ozono nell'acqua di Anticoli* (ROMA) (Accad. dei Lincei, anno XLIV), avec bibl.

² 1851. CANGIANO. *Sur les sources artésiennes du royaume de Naples* (B. S. G. F., 2° s., IX, 144). — 1877. CERESINI. *Sulla natura dell'acque... Sur la nature des eaux salso-iodo-bromiques et sulfureuses de Sant'Angelo in Pontano* (Ischia) (Macerata). — 1893. GRABLOVITZ (G.). *Sulle acque termali dell'isola d'Ischia, con riguardo speciale a quelle del bacino di Gurgitello in Casamicciola* (Roma). — 1893. GOSIO (B.). *Analisi batteriologica e chimica di un'acqua thermo-minerale dei Bagnoli* (Napoli). Lab. sc. div. San Pubbl. Roma). — 1894. SESTINI (F.) et D. MARTELLI. *Acqua acidulo-alcalina-ferroso-litínica della Sorgente di Agnano* (Napoli) : relazione dell'analisi chimica (Pise, tip. T. Nistri e C., in-8°, 26 p.). — 1894. D^r LABAT. *Le Vésuve et les sources thermo-minérales* (C. R. Soc. géol., 7 mai 1894, p. LXXIX).

Castellamare ; mais, en même temps, on a des émanations sulfureuses en relation avec la solfatare de *Pouzzoles*, ou le lac desséché d'Agnano (*Thermæ Anianæ*), dans lequel il sort, de tous côtés, des vapeurs chargées d'hydrogène sulfuré (entre 35 et 75°), qui déposent des enduits de soufre, sulfate d'alumine et sulfate de fer.

Enfin, des sources carbonatées existent à *Pouzzoles*, à *Naples*, à *Castellamare*, à *Salerne*, etc.

En résumé, on a, réunies dans un espace restreint, des eaux de types très divers : chlorurées sodiques, sulfatées, sulfurées ou chlorurées : ce qui est le caractère ordinaire des régions volcaniques actuelles, situées à proximité de la mer et paraît tenir à l'abondance et à la diversité des produits, que donnent la distillation de l'eau de mer, infiltrée en profondeur dans un terrain surchauffé et les réactions de ces sels entre eux, ou leurs réductions sous l'influence des carbures. Ces derniers sont, probablement, eux-mêmes, un produit direct du volcanisme et doivent, à la fois, développer : par réduction des sulfates, du sulfure ou de l'hydrogène sulfuré ; par oxydation propre, de l'acide carbonique.

Au N.-E. de Naples et de Caserte, les eaux très abondantes de *Telese*, toujours en relation avec les mêmes roches volcaniques, sont, à la fois, sulfureuses et chargées d'acide carbonique.

Sicile. — En Sicile, nous avons deux catégories principales de sources thermo-minérales : les unes, analogues à celles du Vésuve, en relation avec le volcan de l'Etna¹, comme avec ceux de Lipari, Stromboli, etc. ; les autres, résultant de l'importance que prend, dans cette île, au sommet de l'étage sarmatique, la formation du gypse, au milieu de laquelle on trouve les célèbres mines de soufre de Girgenti, Caltanissetta, etc.²

Les dépôts d'évaporation de la fin du miocène, très développés en Sicile, contiennent : tantôt simplement du gypse ; tantôt du gypse et du sel gemme (Leonforte, Villarosa, Castrogiovanni, Castel Termini) ; tantôt enfin des mélanges plus complexes, avec chlorure de magnésium, etc. (Priolo et Granara).

1882. F. SILVESTRI (O.). *Acqua del Fonte Maimonide, alla base S. O. dell' Etna* (Acc. di Sc. Nat. in Catania, 3^e sér., t. XVI, p. 189).

Gîtes minéraux et métallifères (I, p. 265 à 281). — Voir 1866. FOUQUÉ. *Rapport sur les phénomènes chimiques de l'éruption de l'Etna en 1865*, p. 40 ; sur les volcans de boue et les sources gazeuses de Sicile (*Girgenti, Aci Reale, Palerno, lac de Palici*, etc.).

Il en résulte, on le conçoit, toute une série de sources salines.

Enfin, on peut citer, à l'est de Palerme, les eaux sulfurées, iodiques et carbonatées à 47° de *Termini Imerense* (Thermæ imerenses), ou, sur la côte sud, celles à 56° de *Sciacca*.

Corse¹ et Sardaigne² — La Corse et la Sardaigne forment, au milieu de la dépression méditerranéenne, un massif ancien, presque continu (malgré la légère coupure du détroit de Bonifacio), une sorte de horst, en grande partie primaire, mais fortement disloqué à l'époque tertiaire, dont les relations avec l'ensemble des plissements alpestres n'ont pas encore été très nettement établies.

La Corse est essentiellement constituée par un massif archéen et primaire, dont les principales directions, dans l'ouest de l'île, sont surtout N.-E.-S.-O. et que recourent un certain nombre de sillons tertiaires, à peu près nord-sud, tels que celui de la côte est, celui du golfe de Saint-Florent et celui de Corte.

En Sardaigne, la disposition est très analogue, sauf que les terrains archéens sont, ici, surtout développés à l'est, et non à l'ouest; le tertiaire, avec manifestations éruptives récentes, occupe, dans l'ouest, un large sillon nord-sud, qui va de Sassari à Cagliari et reparait sur la côte est, ainsi que sur la côte sud-ouest, vers l'île San-Pietro.

Il semble, en résumé, comme idée générale, que ces îles aient été constituées, sous leur forme actuelle, par une série de dislocations tertiaires, à peu près nord-sud, dont on retrouve la trace visible dans les rivages actuels et qui recourent transversalement toutes les directions anciennes. C'est le même système d'effondrements, qui paraît avoir présidé surtout à l'allure d'ensemble de cette dépression méditerranéenne, où, de tous côtés, se montrent, sur les lignes de fracture, les roches éruptives récentes et les volcans modernes.

¹ 1842. J.-B. LOETSCHER. *Eaux minérales sulfureuses de Puzichello* (Corse) (Ajaccio). — 1854. CONSTANTIN JAMES. *Rapport sur les eaux minérales de la Corse* (Paris, Martinet, 24 p., in-4°). — 1894. JACQUOT et WILLM. *Eaux minérales de la France*, p. 470 à 486. — 1896. NENTEN. *Carte au 1:320000 de la Corse* et mémoire correspondant.

² 1833. DAVET DE BEAUREPAIRE. *Hist. des sources min. de Sardaigne* (Paris, in-8°). — 1857. G. BORNEMANN. *Sur les sources minérales et thermales de la Sardaigne* (B. S. G. F., 2^e sér., t. XIV, p. 635). — 1896. S. BERTOLIO. *Sur les formations volcaniques de la Sardaigne* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XXIV, p. 496 à 501). — *Ouvrages généraux, cités*, page 350, note 4. *Sur les sources thermales d'Italie*.

Les eaux de Corse appartiennent à deux types principaux :

Les bicarbonatées : soit calciques, comme *Orezza*¹, *Pardina*, dans le massif de schistes sériciteux, rattachés aujourd'hui au précambrien, au nord-est de Corte, au milieu d'une zone, dont les dislocations récentes sont accusées par la réapparition de divers lambeaux tertiaires ; soit sodiques, comme à *Serra di Fium Orbo*, plus au sud sur le même alignement, à la limite du tertiaire et du précambrien ;

Les sulfurées sodiques, d'un type qui rappelle un peu le type pyrénéen, réparties surtout dans le massif archéen et primaire de l'ouest, à *Guagno*, *Caldamircia*, *Guitera*, *Orbalucono*, *Baracci*, *Tallano*, *Pietrapola*, etc.

Quelques eaux, comme celles de *Puzzichello* dans la plaine tertiaire d'Aleria, sur la côte est, sont des sulfurées calciques accidentelles.

Les *eaux de Sardaigne*, assez peu connues en raison de l'état misérable et de l'insalubrité du pays, comprennent un grand nombre de sources salines, en relation avec les zones tertiaires² :

Des chlorurées sodiques, comme *Aq. spadula*, *la Chucca*, *Nulvi*, *San-Martino*, *Sustana*, *Mesu Mundu*, autour de Sassari, *Conone* dans un petit bassin crétacé, avec roches volcaniques, qui forme une sorte de conque sur la côte est ;

Des sulfatées calciques (avec chlorures) comme *Benetutti*, *Castel doria* (63°), *Fordongianus* (aquas caldas) à 66°, en plein massif volcanique, sur une zone de tufs stratifiés, au nord-est d'Oristano ;

Enfin des bicarbonatées, comme *Sardara*, au sud de la même ville (60°), etc.

§ 5. — Algérie³ : Hammam-Meskoutine, etc.

La ligne de plissement, qui diverge des Alpes et que nous venons de suivre, le long de la chaîne des Apennins, puis en Sicile, se recourbe, peu à peu, on le sait, de la façon la plus nette, pour

1853. *Notice sur les eaux minérales d'Orezza* (Corse) in-8°

Les formations volcaniques de Sardaigne ont, d'après une étude récente de M. S. Bertolio, commencé par les roches acides, rhyolithes, dacites, trachytes, etc., à l'époque miocène, pour se continuer par des roches à hornblende et enfin par des basaltes, ayant dû se produire jusqu'au début du quaternaire (cratères bien conservés de Pozzomaggiore, à Sindia).

Voir la carte d'Espagne et d'Algérie : fig. 28, p. 243. — **Généralités sur les eaux minérales d'Algérie** : *Cartes géologiques au $\frac{1}{800\,000}$ de l'Algérie et de la Tunisie* (cette dernière par M. Aubert). — 1842. TRIPIER. *Eau de Constantine* (Ann. de chir., 4^e série, t. II, p. 429). — 1852. VILLE. *Sur les sources minérales de la partie ouest de la province d'Oran* (B. S. G. F., 2^e sér., t. IX, p. 375). — 1864. D^r GUYON. *Etude sur les eaux thermales de la Tunisie* (Paris, P. Dupont, 70 p., in-8°). — 1865. VILLE. *Analyses de diverses eaux minérales de la province d'Alger* (Ann. d. M., 6^e série, t. VII, p. 233). — 1878. D^r BERTHERAND. *Des sources thermales et minérales de l'Algérie* (Alger, 31 p., in-8°). — 1878. POUYANNE. *Notice minéralogique sur les départements d'Alger et d'Oran*. (Alger, 62 p. in-8°). — 1878. TISSOT. *Notice minéralogique sur le département de Constantine* (Alger, 44 p., in-8°). — 1888. BAILLS. *Notice sur les sources minérales du département d'Oran* (à Oran, chez Paul Perrier, 15, boulevard Oudinot). — 1889. *Notice sur les sources thermales et minérales de l'Algérie*, par le Serv. des Mines (Alger).

former l'Atlas, qui, à son tour, se raccorde, à travers le détroit de Gibraltar, à la Cordillère bétique et ainsi se trouve encadrée par une arête montagneuse, sur le bord intérieur de laquelle les manifestations éruptives sont presque continues, toute la fosse méditerranéenne.

Sur le flanc interne de ce cercle montagneux, les roches éruptives, soit tertiaires, soit quaternaires, jalonnent les rivages, qui correspondent, pour la plus grande partie, à des fractures récentes¹ et ces roches sont accompagnées, presque partout, par des sources thermales à haute température, dont nous avons déjà vu quelques beaux exemples le long de la Cordillère bétique, ou sur le versant ouest des Apennins. Nous allons retrouver exactement le même phénomène en Algérie.

Là, une bordure trachytique commence, sur la côte, un peu à l'ouest de Bône, au sud de la Sardaigne, à laquelle cette zone trachytique semble se raccorder, comme la traînée de roches archéennes, qui l'accompagne de la Sardaigne jusqu'au Maroc. Cette zone comprend : les trachytes de l'île de la Galite, du cap de Fer et de Philippeville, les basaltes de Djidjelli à Bougie, ceux qui entourent la dépression de la Mitidja, au sud d'Alger ; puis les pointements trachytiques et basaltiques, qui vont d'Oran à la frontière du Maroc (basaltes de la Tafna, d'Aïn Temouchent, superposés à du quaternaire ; trachytes et phonolithes des îles Zaffarines, à l'ouest de Nemours ; roches à olivine de l'îlot d'Alboran, etc.).

Il est à remarquer que là, pas plus qu'en Sardaigne ni en Espagne, il n'existe de volcans en activité : le cercle d'éruptions, à peu près homogène par son âge, qui relie ces trois régions², est presque totalement antérieur à l'époque pléistocène

— 1897. *Réun. extr. de la Soc. géologique en Algérie* (B. S. G. F., 3^e s., t. XXIV), avec bibliographie, p. 918. — 1896. GENTIL. *Sur les gypses mélan. de l'Algérie* (C. R., t. CXXII, p. 958). — 1897. BLAYAC et GENTIL. *Le trias dans la région de Souk-Ahras* (Algérie) (B. S. G. F., 3^e s., t. XXV, p. 523 à 548). — **Généralités sur les eaux artésiennes et eaux courantes d'Algérie** : 1857. LAURENT. *Sur un puits artésien dans le Sahara oriental* (B. S. G. F., 2^e s., t. XIV, p. 615). — 1857. VILLE. *Sur la composition des eaux du Chétif (Algérie), en différents points du parcours de ce fleuve* (B. S. G. F., 2^e s., XIV, 350). — 1859. VILLE. *Sur la nature des eaux du pays des Beni-Mzab du Sahara algérien occidental et de l'oasis de Laghouat* (B. S. G. F., 2^e s., XVI, 730, 740, 745). — 1885-1898. ROLLAND. *Mémoires divers sur le régime des eaux artésiennes de l'oued Rhir et du bas Sahara en général* (C. R., t. C. p. 606 ; 24 janv. 1887, 27 févr. 1892, 21 mars 1892. — Assoc. franç., 1895 ; Soc. Ing. civils, mai 1898, etc.).

¹ Voir, sur cette chaîne du nord de l'Afrique : SUSS, *loc. cit.*, I, p. 287 à 295, et la bibliographie donnée en note.

² Le cercle d'éruptions tertiaires, beaucoup plus restreint que la fosse actuelle de la Méditerranée occidentale, dans laquelle il est englobé, paraît passer, au nord,

et il semble que la ligne de fracture éruptive, d'abord dessinée ainsi suivant la Sardaigne et la côte algérienne, se soit, dans les derniers temps géologiques, reportée, plus à l'est, suivant la zone de l'Ombrie, de Rome, du Vésuve, de l'Etna et de Pantellaria, que nous avons précédemment parcourue, en même temps que les dislocations algériennes, sur lesquelles se trouvent les sources thermales, avaient une tendance à se rejeter vers le sud.

L'existence, dans le nord de l'Algérie, de ces fractures récentes et de ces pointements de roches tertiaires produit une zone importante d'eaux thermales, souvent bicarbonatées, que nous allons étudier bientôt.

On doit cependant noter que les eaux chargées d'acide carbonique se trouvent, pour la plupart, à une certaine distance de cette traînée éruptive, à laquelle nous les rattachons; sauf celles de la région de Blida, qui suivent d'assez près la curieuse ceinture éruptive basique de la Mitidja, ou encore celles de la région d'Aïn Temouchent à l'ouest d'Oran (H. bou Hadjar et H. Sidi Aïl), en relation avec des basaltes quaternaires, la plupart des sources, que nous mentionnerons, sont notablement au sud des éruptions tertiaires, le long des chaînes de plissement.

En dehors de cet important élément minéralisateur, le sol de l'Algérie renferme de très considérables dépôts de gypse et de sel, qui continuent encore aujourd'hui à se former, ou plutôt à se reconstituer sous nos yeux¹ vers le sud, dans la région désertique des Chotts et des lacs salés, et qui, à des époques plus anciennes, depuis le trias, ont amoncelé, plus au nord, jusqu'au voisinage de la côte, des réserves salines, par lesquelles de très nombreuses sources chlorurées sodiques, sulfatées calciques, ou sulfurées calciques et des salines naturelles, ou *sebkhas*, sont alimentées.

Cette abondance du sel et du gypse, qui forme un des traits géologiques marquants de l'Algérie et sur laquelle nous allons revenir bientôt, présente, au point de vue des sources thermales,

directement, du nord de la Sardaigne à l'extrémité des Pyrénées et, à l'ouest, de la frontière du Maroc au cap de Gate. Il nous paraît essentiel, quand on cherche à raccorder ainsi des lignes de roches éruptives, de se borner à celles qui sont strictement contemporaines; car tout tend à prouver que ces lignes se déplacent assez vite avec le temps.

VOIR : BLAYAC. *Les Chotts de l'Est Constantinois* (B. S. G. F., 3^e s., XXV, p. 907). L'auteur montre comment la salure des Chotts est empruntée au lavage de terrains triasiques ou oligocènes.

une importance capitale ; car la très grande majorité de ces sources, chaudes ou froides, sont salines.

D'une façon générale, il y a lieu d'attirer l'attention sur la très grande richesse en sources thermales que présente l'Algérie, bien que ces eaux, fort peu connues, ne soient, pour la plupart, fréquentées que par les Arabes. Outre les raisons géologiques que nous avons déjà données de cette richesse hydrothermale, il ne faut pas oublier que la température moyenne du sol étant souvent de près de 10° supérieure à celle de nos climats, des eaux, descendues à une même profondeur dans le sol, doivent offrir une température de 10° plus élevée qu'en France.

Nous étudierons bientôt les principales sources thermales d'Algérie ; mais nous devons, auparavant, dire un mot de ces gisements de gypse et de sel, auxquels nous venons d'attribuer la minéralisation d'un grand nombre de ces sources chaudes et qui, de plus, fournissent beaucoup de sources froides chlorurées sodiques ou gypseuses.

L'âge et le mode de formation des gisements de gypse et de sel algériens ont donné lieu à de très nombreuses controverses, motivées par l'allure intrusive que les plissements leur ont souvent prêtée. Jusqu'à ces derniers temps encore, on ne les considérait pas comme antérieurs au crétacé ; mais des travaux récents ont conduit à rattacher bon nombre d'entre eux au trias, comme ceux qui se présentent, d'une façon analogue, accompagnant des ophites dans les Pyrénées¹.

Si nous commençons par passer en revue quelques-unes des sources salées froides, qui dérivent directement de ces gisements de sel, nous avons à mentionner, d'après une statistique officielle², dont nous conservons les attributions géologiques (qui seraient, probablement, à reviser, sur plus d'un point, suivant les idées nouvelles) :

1° **Département de Constantine** : autour de Bordj-bou-Arréridj, *Kasbah* dans le suessonien, *Djebel Aderni* dans le gault, *M'Sissa* et *Beni Ourtillan* dans le sénonien ; près Bougie, *El Mellaha* et *Dra-el-Arbaa* dans le sénonien ; près

¹ La carte géologique d'Algérie n'indiquait guère de trias que dans l'ouest, du côté d'Oran. En 1897, M. Bertrand (B. S. G. F., 3^e s., t. XXIV, p. 4184) a admis, à la suite de la découverte de Myophories par M. Goux dans le gisement du Djebel Chettabah, près Constantine, que la plupart des sels et gypses d'Algérie, notamment la montagne de sel de Biskra et les terrains de Souk-Ahras, étaient du trias, identique à celui de Provence. Ultérieurement, MM. Blayac et Gentil (B. S. G. F., 3^e s., t. XXV, p. 525) sont arrivés à la même conclusion pour les gypses de Souk-Ahras.

² 1889. *Notice min. sur l'Algérie et notice sur les sources thermales d'Algérie par le service des Mines.* — 1893. FUCHS et DE LAUNAY. *Gites min. et mét.* (I, p. 496 à 498 et 152).

Batna, *Djebel Touggourt* dans le jurassique et *Kraïm-Said* dans le néocomien ; près Aïn-Beïda, *Ejebel Zouabi*, dans le néocomien.

2° Département d'Alger : *El Melah*, à 10 km. ouest de Ténès, sur le sénonien ; *Anseur-el-Louza*, à 21 km. N.-E. de Teniet el Haad, sur le néocomien ; *Oued Melah*, à 25 km. S.-E. de la même ville, dans l'helvétien ; *Ouled Hedim*, à 30 km. S.-E. de Medeah, dans le cénomaniens ; *Rebaïa*, à 44 km. sud de Medeah, dans le suessonien ; *Oued Sebka*, à 29 km. S.-E. de Bouira, dans le gault.

3° Département d'Oran : *Tellout*, à 3½ km. N.-E. de Tlemcen, dans les marnes bariolées gypseuses de l'helvétien ; le grand lac salé des environs d'Oran, la saline d'Arzeu, celle d'Aïn Ouarka, à 41 km. S.-E. d'Aïn Sefra, dans le néocomien, etc.

Les sources thermales, plus intéressantes pour nous comme indice géologique de fractures profondes, comprennent des types très divers et sont extrêmement nombreuses, bien qu'on ne les utilise pas encore, comme elles mériteraient de l'être ; il nous suffira de citer, en allant dans chaque groupe de l'est à l'ouest :

Comme eaux bicarbonatées : *Hammam Sidi Djaballah*, près la Calle (35°) ; *Aïn Sennour* ; *H. Meskoutine* (95°) ; *Salah bey*, près Constantine (35°) ; *H. Gueurgour* ; *Aïn el Hamza* (saline et gazeuse) ; *Ben Haroun Mouzaïa*, *El Affroun*, *Hammam Rira* ¹, ou *Aquæ Calidæ* des Romains (ces trois dernières près de la dépression de la Mitidja, et la dernière sulfatée calcique) ; *H. bou Hanéfta* (66°) ; *Arcole*, près d'Oran ; les eaux très chaudes et incrustantes de *H. bou Hadjar* (les unes chlorurées et gazeuses, les autres sulfureuses) ; *H. Sidi Aït*, etc. ² ;

Comme eaux salines chaudes, d'abord un premier groupe en Tunisie, qui commence aux environs immédiats de Tunis ³ par les sources bouillantes d'*Hammam Kourbès* (Gourbous) (60°), dans l'éocène supérieur, sur la côte du cap Fortas, en face le cap Carthage et par celles d'*Hammam Lif* (50°) dans la banlieue de Tunis (sénonien).

Les eaux de Hammam Kourbès et de Hammam Lif contiennent : la première NaCl = 6,53 gr. ; CaOSO³ = 1,81 ; CaCl² = 0,75 ; MgCl² = 0,60 ; la seconde, NaCl = 9,75 gr. ; CaOSO³ = 1,53 ; CaCl² = 1,09 ; MgCl² = 0,56, etc.

D'après M. le Dr Guyon, les eaux thermales de *Bou Chater* (ancienne Utique) à 40°, seraient très remarquablement riches en arsénates de potasse et de soude (0,17 gr. sur 0,97 gr. de résidu fixe). les autres éléments étant des éléments salins (NaCl = 0,49 ; CaOSO³ = 0,03).

1894. REPELIN. *Sur la const. géol. du massif des Soumata et d'Hammam Rirha* (B. S. G. F., t. XXII, p. 9).

La notice de M. Tissot (1878) citée en outre, dans le département de Constantine, les eaux gazeuses de Takitount, Aïn-Semour et Beni-Ismaïls.

1864. Dr GUYON. *Eaux thermales de la Tunisie, avec renseignements sur les ouvrages antérieurs*. — 1895. AUBERT. *Explication de la carte géol. provisoire de la Tunisie* (Andriveau-Goujon, 92 p. in-8°). Ce mémoire (p. 13) rattache au gault les gypses du Nord de la Tunisie, qui alimentent des sources salines. Il signale (p. 35) l'importance des nappes d'eau artésiennes situées dans le crétacé supérieur.

Dans le sud de la Tunisie, il existe, sur la plupart des oasis, des eaux, qu'on devrait qualifier de thermales, puisqu'elles atteignent 27 à 40°, mais qui ne sont, en réalité, que de simples eaux artésiennes à faible profondeur, parfois chargées de principes salins, lorsque ceux-ci sont abondants dans le pays.

Plus à l'ouest, en Kroumirie, les eaux chaudes d'*Hammam Lefzoua* et d'*Hammam Schiba* sont dans l'éocène supérieur.

Puis viennent : *Hammam n'Bails*, à 23 km. S.-E. de Guelma, sources salines à 45°, près d'un gisement classique de calamine, associée à de la nadorite et à de la mimétèse¹ ; *Hammam el Beida*, à 9 km. N.-E. de Guelma² ; *Hammam Meskoutine*, avec ses eaux chlorurées sodiques arsenicales et bicarbonatées calciques à 95°, produisant 100 000 litres à l'heure et ses fameuses cascades pétrifiées, sur la ligne de Guelma à Bône² ; *H. bou Thaleb* (60 km. de Sétif) (33°) ; *H. bou Sellam* à 200 km. S.-O. de Sétif (54°) ; *H. Melouane* (ou les bains colorés) dans une gorge de l'Atlas, au sud d'Alger (42°), près des gypses de Rovigo ; *H. Sidi bou Hanéfa*, à 20 km. de Mascara (65°) ; *Aïn el Hammam*, près Mascara et les *Bains de la Reine*, à 3 km. d'Oran (52°).

Comme eaux sulfureuses à haute température, on a : *H. Sidi Trad*, près de la frontière de Tunisie, à 40 km. de la Calle (65°) ; *H. Cheniour*, au sud de Guelma (60°) ; *H. es Salahin*, près des gorges d'el Kantara, à 6 km. de Biskra (150 000 litres à l'heure, 46°) ; *H. Siane*, à 40 km. N.-E. d'Aumale, en Kabylie (70°) ; *Aïn Okhirs*, à 44 km. d'Aumale (69°) ; *Berronagnia*, à 22 km. S.-E. de Medea (43°) ; *Aïn Nouissy*, ou Noisy-les-Bains, près Mostaganem, (28°) ; *Aïn el Hammam*, à 16 km. N.-E. de Saida (25 000 litres à l'heure, 56°) ; et *H. Bou Ghara*, sur la rive gauche de la Tafna (48°), au S.-E. de Nemours, presque à la frontière du Maroc et au voisinage du district métallifère de Lalla Maghnia.

Enfin, au Maroc, nous citerons encore les sources thermales de *Fiquig* sur la frontière algérienne, et des eaux sulfureuses au voisinage immédiat de *Fez*.

La plus remarquable peut-être de ces sources est celle d'*Hammam-Meskoutine*³, dont nous avons déjà précédemment décrit les conditions de gisement et les dépôts, semblables à ceux du Yellowstone Parke ou de Nouvelle-Zélande par leur forme de cascades pétrifiées. Ces eaux contiennent 0,25 gr. de carbonate neutre de chaux par litre (quantité qui n'est pas très considérable ; car à Saint-Alyre, près Clermont, on arrive à 1,17 gr.), avec une forte proportion d'acide carbonique libre ; elles sont surtout minéralisées par le chlorure de sodium et le sulfate de chaux, avec un peu de silice, de l'arsenic et de la strontiane et l'on a noté la pyrite parmi leurs dépôts.

¹ *Ann. d. Min.*, 6^e sér., t. XX, p. 24.

² D'après FOURNEL (t. I, p. 187), les sources à 32° de Guelma sont en relation avec des filons de plomb.

Voir plus haut, p. 176 et fig. 15 et 16. — 1840. O. HENRY. *Notice et recherches chimiques sur les produits venant des eaux minérales de Meskoutin* (*Ann. d. M.*, 3^e sér., t. XVII, p. 594). — 1852. E. GRELLOIS. *Sur les eaux thermales d'Hamмам Meskoutin (province de Constantine)* (*B. S. G. F.*, 2^e sér., t. IX, p. 624). — 1873-74. LA ROUVIÈRE. *Note sur les sources d'Hamмам Meskoutine* (*Bulletin de la Société linnéenne de Normandie*, 2^e série, t. VIII, p. 138, Caen). — 1888. DUPARC. *Sur les pisolithes d'Hamмам Meskoutine* (*Arch. Soc. phys. de Genève*, t. XX, p. 537). — 1892. D^r Piot. *Les eaux d'Hamмам Meskoutine*. — 1898. LACROIX. *Sur la ktypéite* (*C. R.*, 21 février 1898, t. CXXVI).

Les eaux sulfatées calciques et bicarbonatées d'*Hammam Rira*¹ près Milianah, ouest d'Alger, sortent d'un filon de chalcopyrite, qui recoupe le tertiaire moyen.

Les eaux d'*Ain Nouissy*², près Mostaganem, sortent d'une faille E.-O. qui met en contact le miocène (cartennien) avec le pliocène inférieur. Elles débitent 15 000 litres d'eau par jour. Leur minéralisation sulfurée calcique paraît en rapport avec un gisement de gypse, qui accompagne un pointement d'ophite.

A *Hammam bou Hadjar*³, vers l'extrémité ouest du lac salé d'Oran, des eaux très abondantes, les unes chlorurées et gazeuses, les autres sulfatées calciques, sortent, d'après M. Ville, de quatre longues fentes, dirigées N.-S., qui recoupent le tertiaire.

§ 6. — *Mer Egée.*

Nous n'avons pas ici à étudier en détail les formations géologiques de la mer Egée, sur lesquelles nous venons précisément de publier ailleurs un travail étendu⁴. Il nous suffira de rappeler que la chaîne des Balkans semble se rattacher directement aux plissements alpestres⁵ et qu'au sud des Balkans, dans la zone égéenne, on est dans cette portion de l'écorce terrestre, restée en arrière des dernières vagues alpestres et où une série d'effondrements, grossièrement circulaires, ont dessiné, à une époque voisine de nous, des cuvettes marines, entourées de fractures, que jalonnent souvent des roches éruptives.

Ces effondrements récents ont recoupé, transversalement et souvent orthogonalement, les plissements anciens.

Comme la dépression de la Méditerranée occidentale, comme celle de l'Adriatique, la mer Egée est une région récemment disloquée et propice aux sources thermales, dans laquelle il existe, d'ailleurs, des manifestations volcaniques actuelles, sur un arc de

1891. VILLE. *Notice sur les provinces d'Oran et d'Alger*, p. 193.

² DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, I, 185, fig. 92 et 93. — 1896. *Sur le gisement gypso-ophitique de Noisy-les-Bains* (C. R., 4 mai 1896, et C. R. S. G. F., 18 mai 1896). Discussion avec M. Flamant (B. S. G. F., 3^e s., t. XXIV, p. 1073).

³ VILLE. *Prov. d'Alger et d'Oran*, 1851, p. 258.

Etudes géologiques sur la mer Egée (Ann. d. M., février 1898).

⁵ On trouve, dans les Balkans, des bassins d'effondrement, comme celui de Sofia, qui est entouré de sources thermales.

cercle rattachant Nisiros (près Kos) à Santorin, Milo, Egine et Corinthe.

Les sources thermales de toutes ces petites îles, qui sèment l'Archipel, sont, pour la plupart, réparties sur leur rivage, qui constitue une ligne de moindre pression hydrostatique et semblent, d'après leur composition, résulter bien souvent, tout simplement, d'infiltrations marines. Nous avons signalé, plus haut¹, celles de *Mételin*, toutes salines, dont la principale est *Polichnitos*, qui fournit des eaux bouillantes en très grande abondance. Il en existe d'autres au voisinage immédiat de la ville de Mételin, sur la côte est, au fond du golfe des Oliviers, etc.

A *Lemnos*, nous avons pu étudier de même le gisement de la source de Lidja, qui sort, au contraire, au centre de l'île, sur une faille mettant en contact les schistes du flysch avec les brèches andésitiques.

Chios est fameux pour l'abondance de ses sources thermales, non moins que pour la fréquence de ses tremblements de terre.

Sur la côte voisine, les bains de *Tchesmé*, non loin des ruines d'Erythrée, près de l'extrémité de la presqu'île, sont bien connus, ainsi que les sources d'*Agamemnon*, *Lebedos* et généralement les eaux de toute la région comprise entre le golfe de Smyrne et celui de Scala Nova.

On retrouve de très nombreuses sources chaudes à *Kos* et dans l'île volcanique de *Nisiros*, à *Santorin*, à *Milo*, où l'on cite surtout celles de *Loutra* et de *Protothalassa*, etc.

A *Santorin*, il existe une source thermale sous-marine, qui passe pour nettoyer et remettre à neuf la doublure de cuivre des navires, peut-être en formant un bicarbonate de cuivre soluble, avec les dépôts de carbonate.

Dans toute l'Asie Mineure, les sources thermales sont innombrables; nous aurons à y revenir bientôt en étudiant le continent asiatique; il nous suffit de citer, en ce moment, les eaux de *Tuzla* en Troade, les feux naturels de la *Chimère lycienne* sur la côte ouest du golfe d'Adalia, les eaux chaudes de *Tambouk* (Hierapolis)² et du pays brûlé au sud d'Alaschehr, celles d'*Eskischeir*, de *Brousse*, etc.

Sur les côtes du continent grec, elles ne sont pas moins abon-

Page 170 et fig. 11.

Voir plus haut, p. 78.

dantes, comme on pouvait le prévoir dans une région aussi visiblement ébranlée par les derniers mouvements dynamiques terrestres. Nous nous contenterons de mentionner, entre beaucoup d'autres, la source chlorurée sodique et sulfatée calcique des *Thermopyles*, les eaux salines et alcalines à 89° d'*Ædipsos* en Eubée, déjà citées précédemment pour le contre-coup qu'ont eu sur elle des tremblements de terre¹, celles de *Méthane* en Argolide, de *Thermia*, etc².

§ 7. — *Caucase*³

La chaîne caucasique, qui se rattache très directement aux plissements alpestres, présente, on le sait, de remarquables manifes-

Voir plus haut, p. 201.

Voir Dictionnaire DURAND FARDEL, art. *Grèce*.

³ **Bibliographie des eaux thermales du Caucase.** — 1866. OMONT. *Ercursion aux eaux minérales du Caucase.* — 1873. ABICH. *Note sur le gisement des sources thermales de la région d'Elbourouz* (B. S. G. F., 3^e sér., t. I, p. 281). — ABICH. *Beiträge zur Kenntniss der Thermalquellen in den Kaukasischen Ländern.* — 1875. ABICH. *Geol. Beobach. auf Reisen im Caucasus* (Moscou). — 1875. FRANÇOIS. *Mémoire sur la genèse des eaux minérales et des émanations salines des groupes du nord du Caucase et sur l'actualité du métamorphisme par les eaux minérales* (C. R., 7 mars 1875, et Ann. chimie et phys., 5^e sér., t. VI). — 1876. FRANÇOIS. *Le Caucase et ses eaux minérales* (C. R., 29 mai 1876). — 1877. KHODZKO. *Mémoires divers* (en russe). — 1884. DRU (L.). *Rapport sur les eaux minérales du Caucase* (Mission de 1882). (in-4^e, 115 p. et 55 pl. col.). — 1887. DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, I, p. 228 et 383. Cartes et coupes, I, p. 275. — SUSS. *Antlitz der Erde*, I, p. 623 à 630 et 653. — 1893. GOLOVYNSKI (N.). *Les sources de Tchutyrulugh et de Babougan. Sympheropol.* — 1893. KONCHIN (A.). *Compte rendu sur l'étude des eaux minérales d'Abbas-Touman* (Matériaux. pour la géol. du Caucase, sér. 3, liv. VII). — 1896. TROPIN. *Borshom Kaukasisches natürliches alkalinen-carbonathaltiges mineralwasser* (Kaukasisches Wischij). Die Quellen: Jekaterininsky und Jewgenjewkij, Moskau, 1896, p. 1-17. — 1896. MOLDENHAUER (Fr.). *Analyse des eaux de Borjom, source Catherine et ses sels composants* (Saint-Petersbourg, in-8^o, 13 p. id. en allemand, 27 p.) — 1896. ALBANALI (D.). *Schwefelquellen im Storskischen Engpasse* (Kawkas, n^o 242). — 1896. KULIBIN (S.). *Skizze der Entwickelungs Geschichte der Kaukasischen Mineralwasser (1717-1895)* (Ausgabe des Montan-departements. Saint-Petersbourg, in-8^o, p. 1-196). — 1896. TROPIN. *Die neu entdeckte Mineralquelle unweit des Dorfes Gerjussy im Sangesurschenkreise* (Kawkas, n^o 223). — 1896. TROPIN. *Mineralwasser in der Umgegend von Baku* (Kawkas, n^o 46). — 1896. N... *Die heissen Mineralquellen von Arkeran* (Korrespondenz aus Lenkoranj Kospij, n^o 236). — 1896. MÖLLER (W.). *Nutzfossilien und Mineralwasser des Kaukasus* (Saint-Petersbourg, in-8^o, p. I-IX, I-194, avec 1 carte; 2^e Aufl. Vermehrte des Montan-departements). — 1896. OFF. *Eine Mineralquelle hinter Wladikawkas* (Russk. Wed., n^o 149). — 1897. SACHARJIN (J. Jakunin). *Kaukasische Mineralwasser* (Nabljudatj, n^o 5, p. 137-156). — 1897. WOROZOFF (M.). *Die Kaukasische bittere Batalin* (früher Maria-Theresa). *Quelle.* Dissertation, Saint-Petersbourg, in-8^o, p. 1-112. — 1897. MEYER (V.). *Les eaux minérales du cercle du Caucase* (in-8^o, X, 494 p. et carte. Saint-Petersbourg, impr. M. Stasnielitsh [en russe]). — 1897. Z... *Psekupsche Mineralwasser (Kubangebiet)* (Medico-topographische Skizze Wojeuno-Medizinski journal, 1897; Extrait: Regier. Anzeig., 1897, n^o 144; Podolische Gouv. Zeitung, 1897, n^o 54). — 1897. Dr BERTHENSON. *Ressources balnéaires de la Russie* (Congrès d'hydrologie de Clermont, p. 119 à 130); avec travaux cités des ingénieurs russes V. MELLER, A. KONCHINE, etc.

tations volcaniques (Elbrous¹ et Kasbek), offrant cette particularité anormale d'être placées sur l'axe même de la chaîne et des suintements pétrolifères nombreux, parfois accompagnée de volcans de boue, Taman et Kertsch, Grosniy, Tiflis, Bakou, etc.. allongés, sur une grande partie de la chaîne, de la Crimée jusqu'en Perse (fig. 62).

Il suffit d'examiner une carte géologique d'ensemble pour constater que cette ligne de plissement sépare l'ancien continent en

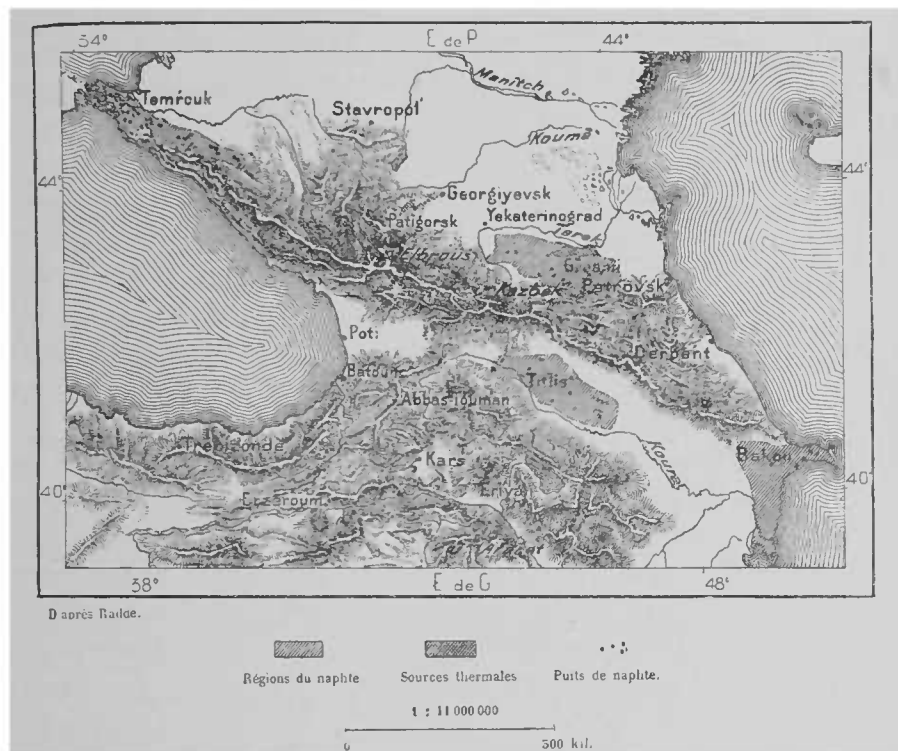


Fig. 62. — Régions du naphte et des sources thermales dans le Caucase (d'après E. Reclus).

deux parties absolument distinctes : au sud, commencent les volcans, accumulés notamment dans ce nœud éruptif de l'Arménie, dont le point principal est l'Ararat et développés, plus au sud-ouest, sur cette admirable ligne de dislocation N.-S., qui se prolonge, par la vallée du Jourdain, vers les volcans abyssins et les grands lacs d'Afrique; au nord, au contraire, ce genre de formation manque absolument et, lorsqu'on veut, comme l'a fait récemment M. Michel-Lévy², chercher un prolongement à la zone effondrée du sud,

¹ Ou Elbourz.

² B. S. G. F., 1898.

c'est, au contraire, une zone anciennement surélevée que l'on trouve, la chaîne hercynienne de l'Oural.

Une ligne de dislocation aussi nette, le long de laquelle se trouvent tous les éléments nécessaires à la minéralisation des eaux : bouffées d'acide carbonique, gisements de sel et de gypse tertiaire, etc., en même temps que d'énormes différences de niveau facilitant leur échauffement, ne peut manquer d'être riche en sources thermales. C'est, en effet, ce que nous allons constater.

En lui-même, le Caucase est, d'après M. Bertrand¹, une chaîne de structure relativement simple, formée, dans son ensemble, par un grand pli en éventail. Elle comprend : au centre, une bande cristalline, qui disparaît vers l'est et sous laquelle s'enfoncent, de part et d'autre, des schistes paléozoïques et jurassiques ; puis, au nord, une série plus franchement calcaire en pente douce (jurassique et crétacé) ; au sud, au contraire, la même série, moins riche en calcaire, avec des dislocations affectant jusqu'au Sarmatique.

Par nombre de ses caractères et notamment par son alignement droit, qui contraste avec la forme incurvée des Alpes ou des Carpathes, le Caucase est comparable aux Pyrénées ; mais il s'en distingue par l'importance de ses coulées volcaniques tertiaires ou quaternaires, qui atteignent, dans le centre de la chaîne (Elbrous, Kasbek) des dimensions énormes et qui, au point de vue hydrothermal, ont eu pour conséquence l'abondance des sources carbonatées, à côté des sources sulfureuses du type pyrénéen.

La présence de ces volcans sur l'axe de la chaîne a été considérée comme le résultat d'effondrements postérieurs aux plissements, qui se rattachent, sans doute, à la zone de dislocation des volcans arméniens.

Les principaux districts de sources thermales, figurés sur notre carte (fig. 62), sont : au nord de la chaîne : la région de l'Elbrous (Piatigorsk) et celle de Grosniy ; au sud, celles de Tiflis, d'Abbas-Touman et de l'Ararat. En outre, il convient d'en rapprocher les districts pétrolifères de Kertsch et Taman, Grosniy, Bakou et Tiflis, qui, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer plus d'une fois, représentent des nappes artésiennes minéralisées, d'un type spécial.

Le district hydrothermal le plus fréquenté du Caucase est celui de

1897. M. BERTRAND. *Les excursions du 7^e congrès géologique international en Russie* (B. S. G. F., 3^e sér., t. XXV, p. 713 à 719). — Voir *Atlas de Berghaus*, carte géol. au 1:7.500.000, d'après FAVRE, ABICH, etc.

l'Elbrous, avec l'importante ville d'eaux de *Piatigorsk* (à 450 mètres au-dessus de la plaine), au voisinage de laquelle une muraille, de plusieurs kilomètres de longueur, bordée de grottes et de tombeaux, défendait jadis l'accès de la source sacrée de Kislovodsk, appelée par les Tcherkesses la *Boisson des Héros*¹.

Nous aurons à revenir plus tard, sur les très intéressants travaux de captage, qui ont été exécutés là par deux ingénieurs français, MM. François² et Dru.

Le groupe de l'Elbrous comprend, comme sources principales :

1° *Piatigorsk*, à 90 kilomètres au N.-N.-E. du massif trachytique de l'Elbrous, près de la ligne de séparation du Caucase et de la Caspienne : groupe sulfureux et bicarbonaté entre 30 et 47° ;

2° A 18 kilomètres à l'ouest, *Essentouky*, source bicarbonatée alcaline et sulfatée froide, renfermant de l'iode et du brome ;

3° Plus au sud-ouest, *Kislovodsk*, source bicarbonatée ferrugineuse froide, fournissant 15 000 hectolitres d'eau et 5 400 mètres cubes d'acide carbonique par jour ;

Enfin 4°, au N.-O. de *Piatigorsk*, *Geleznovodsk*, bicarbonatée ferrugineuse alcaline.

Suivant M. Dru³, la région de *Piatigorsk* est caractérisée par des éruptions tertiaires à faciès ancien (microgranulites, porphyres pétrosiliceux, etc.), qui recoupent les formations secondaires et tertiaires de la région : néocomien à *Kislovodsk* et à *Narzan* ; albien (Gault), crétacé supérieur à *Essentouky* ; éocène à *Essentouky* et à *Geleznovodsk*.

Les eaux minérales, qui traversent ces terrains et se dispersent souvent dans les alluvions quaternaires, ont déposé, à la surface, des masses considérables de travertins, et leur griffon paraît avoir subi souvent, à des époques récentes, des déplacements très notables. Il s'est produit, en outre, de véritables gouffres, comme celui du Grand Proval.

A l'est du groupe de l'Elbrous, les eaux minérales de *Grosniy* sont situées dans une région pétrolifère, dont le développement industriel est tout récent.

Puis, au sud du Caucase, le nom même de *Tiflis* (Tphilis

Voir RECLUS, *Géogr. univ.*, t. VI, p. 134 à 136.

M. FRANÇOIS, qui était encore imbu de la théorie du réseau pentagonal, avait cherché, entre les émergences hydrothermales, les pointements éruptifs, etc., des rapports de direction, qui ne nous semblent pas à conserver.

³ *Rapport sur les eaux minérales du Caucase* (Chamerot, 1884, 1 vol. gr. in-4°).

Kalaki en géorgien), signifie ville chaude et paraît provenir d'eaux thermales sulfureuses, à 45°, qui jaillissent près de la Koura, au contact du porphyre et des schistes.

Enfin, plus à l'ouest, on trouve un pays remarquablement riche en sources minérales vers *Akhaltzikh* et *Abbas Touman*, au sud de Koutaïs, sur le flanc nord d'un grand massif éruptif récent, qui part, au sud, du volcan éteint de l'Ararat et comprend ceux du Samsar et de l'Abul¹

En dehors de ces groupes hydrothermaux, il convient, tout au moins de rappeler les formations hydrocarburées, qui prennent, surtout aux deux extrémités de la chaîne, à Bakou sur la Caspienne, à Taman et, en face, à Kertsch en Crimée, sur la mer d'Azow, un développement extraordinaire.

A *Bakou*, les dégagements de gaz combustible et les jets de naphte, depuis longtemps célèbres, ont donné lieu, surtout depuis trente ans, à la puissante industrie que l'on connaît.

Les sondages vont chercher là le pétrole dans des grès miocènes sans fossiles, ressemblant au flysch et recouverts en concordance par des couches pliocènes, analogues à celles de Kertsch.

A *Taman* et à *Kertsch*, le phénomène des volcans de boue prend une ampleur des plus remarquables²

¹ Nous étudierons les régions hydrothermales et volcaniques d'Arménie au chapitre qui concerne le continent asiatique.

² RECLUS. *Géog. univ.*, t. VI, p. 96.

CHAPITRE IV

RÉGIONS HYDROTHERMALES DIVERSES. — DISTRICTS VOLCANIQUES

§ 1. — *Continent asiatique : Sibérie, Chine, Asie Mineure, Perse, Inde, Indo-Chine.* — § 2. *Cercle éruptif du Pacifique.* — § 3. *Amérique.* — § 4. *Axe d'effondrement érythréen : Mer Morte, Kilimandjaro et Continent africain.* — § 5. *Axe éruptif Atlantique.*

Dans le chapitre précédent, nous venons de passer en revue, avec quelques détails, les principales sources thermales d'Europe. Ainsi que nous l'avions annoncé au commencement, il ne peut être question, pour nous, de continuer, en parcourant l'ensemble du monde, une semblable énumération, qui ne présenterait pas un grand intérêt théorique et deviendrait bientôt des plus monotones. Notre but, en l'essayant pour l'Europe, était, d'ailleurs, bien moins de former un répertoire hydrothermal, logiquement classé suivant un plan géologique, que d'éclairer, par une série d'exemples précis, les lois générales, auxquelles l'observation nous a conduit sur la répartition des sources thermales, leurs relations avec la géologie et, par suite, sur leur origine.

C'est dans le même ordre d'idées que nous allons examiner maintenant, en dehors de l'Europe, un certain nombre de régions hydrothermales, présentant, pour une raison ou pour une autre, un intérêt théorique plus spécial.

Le premier point à bien mettre en lumière, c'est, d'abord, la généralité de l'observation, précédemment faite en Europe, sur la localisation des sources thermales, dans les zones de l'écorce terrestre récemment redisloquées.

Il est un moyen très simple de s'en assurer.

En effet, si cette règle a bien la valeur que nous lui attribuons, on doit pouvoir, indépendamment de toute connaissance géogra-

phique relative à ce sujet spécial, tracer, sur une carte géologique de la terre, les zones à dislocation tertiaires et on en conclura, *à priori*, que là, et là seulement, se trouvent les sources thermales : ce que l'observation directe permettra ensuite de vérifier ¹

Le tracé, que nous supposons en ce moment, se trouve simplifié par la connexité, qui existe nécessairement entre les zones de dislocation tertiaires favorables aux manifestations hydrothermales et celles dont les fractures ont donné issue à des roches éruptives récentes : non pas, comme nous l'avons bien fait remarquer, que les sources thermales aient elles-mêmes, en principe, une origine éruptive, mais parce que, là où il y a eu des dislocations profondes permettant la pénétration des eaux à plusieurs kilomètres de profondeur, il a pu, en même temps, s'en présenter dans des conditions telles qu'elles aient offert un passage aux magmas rocheux en ignition, et réciproquement.

En outre, si nous faisons ce travail pour reconnaître l'allure géométrique des plissements tertiaires et tenter, comme Elie de Beaumont en a donné jadis un mémorable exemple, de déterminer le plan d'ensemble, qui préside à ces accidents dynamiques ², il faudrait, nécessairement, pour avoir le droit de raccorder entre eux les tronçons disjoints de notre dessin, distinguer les éruptions suivant leur âge et noter, par exemple, différemment les lignes éruptives tertiaires ou les quaternaires. Il serait également indispensable de préciser ce qui est plissement et ce qui est effondrement, etc. En un mot, il faudrait nous restreindre à la représentation d'un phénomène réellement synchronique et homogène. Mais pour les sources thermales, nous pouvons rester beaucoup plus dans le vague, puisque des fractures de tout genre et même de faible amplitude, pourvu qu'elles soient assez récentes pour n'avoir pas encore été obstruées, peuvent contribuer à des circulations d'eaux profondes.

Le premier aspect d'un planisphère, où l'on a tenté cette figuration (fig. 63), n'est pas sans présenter une certaine confusion, qui est inévitable dans un phénomène de cette nature, où trop de circonstances de tous genres sont successivement intervenues, pour

¹ Il est inutile de répéter que ceci ne peut comprendre les sources minérales ayant emprunté leur minéralisation à des gîtes salins, quand leur température ne dépasse pas celle des terrains superficiels au point considéré, c'est-à-dire quand il n'y a pas eu trajet souterrain réellement profond.

Voir, à ce sujet, le récent mémoire de M. MICHEL LÉVY (*Bull. soc. géol.*, 1898) et la carte des volcans dans l'atlas géologique de Berghaus.

qu'on puisse espérer retrouver, dans sa rigueur géométrique et sans déformation, le plan primitif de la structure terrestre. Néan-

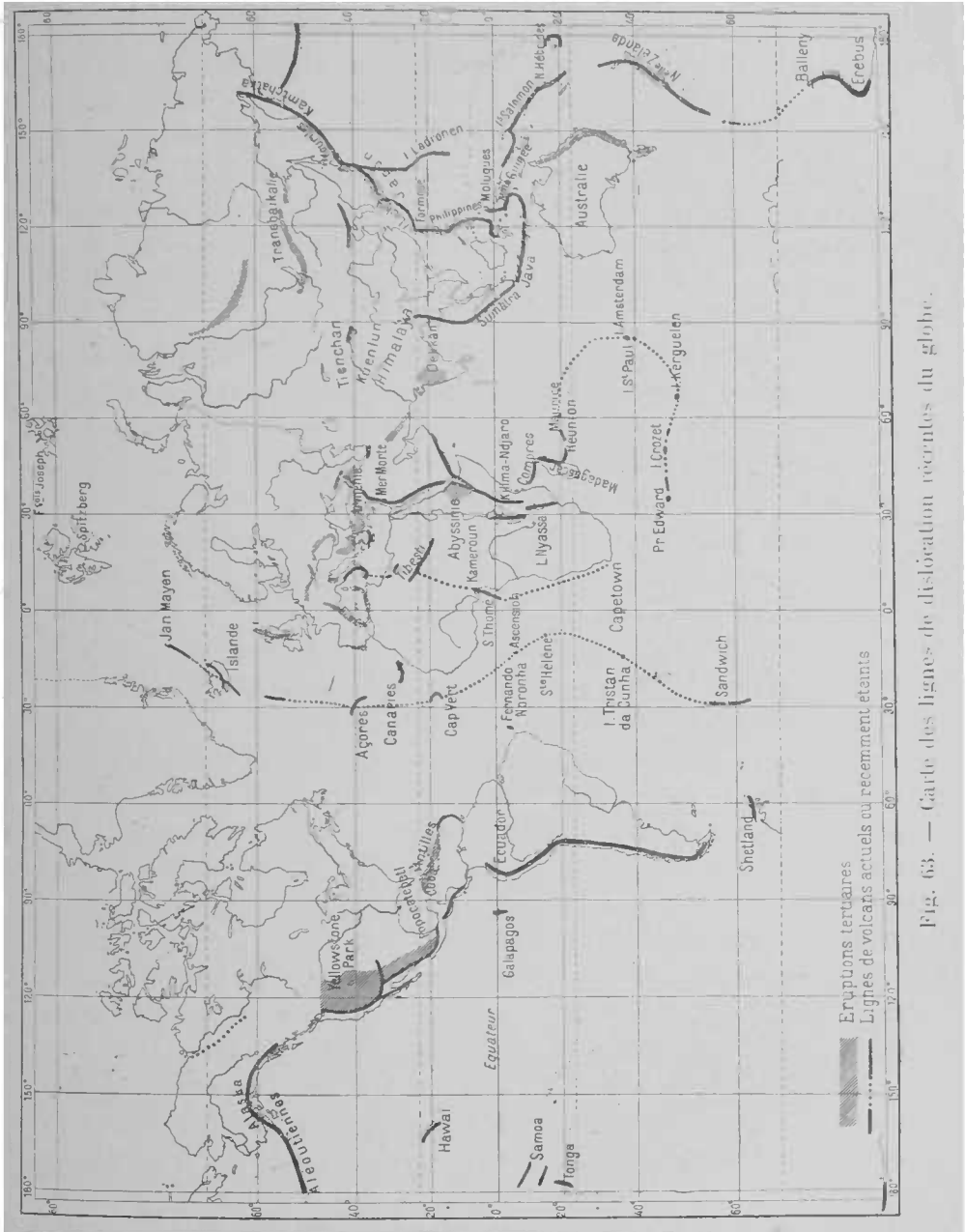


Fig. 63. — Carte des lignes de dislocation tectoniques du globe.

moins, quelques faits généraux ressortent, même d'un très court examen.

C'est, d'abord, l'existence de plusieurs grandes lignes de dislo-

cation, plus ou moins sinueuses, qui se poursuivent, d'une façon très continue, sur tout un hémisphère.

Il suffit de citer la chaîne de plissements Alp-Himalayenne, avec la zone d'effondrements et de volcans correspondants, qui se prolonge dans l'Insulinde jusqu'aux Moluques et rejoint là un cercle de feu, extraordinairement net, enveloppant tout le Pacifique.

Au sud de cette ligne, un axe de dislocation, non moins remarquable, mais nord-sud, part du nœud volcanique de l'Arménie, suit la mer Morte, rejoint le Kilimandjaro et les grands lacs africains par les volcans d'Abyssinie et raccorde peut-être entre eux les cratères des Comores, de Madagascar, des Mascareignes, des îles Amsterdam et Saint-Paul, etc.

Citons encore l'axe éruptif, qui suit, presque suivant un méridien, toute la longueur de l'Atlantique, par Jean Mayen, l'Islande, les Açores, les Canaries, les îles du Cap-Vert, l'Ascension, Sainte-Hélène et Tristan da Cunha et forme une sorte de ligne de symétrie entre l'Ancien et le Nouveau-Monde.

Parallèlement à cette direction principale, on retrouve, comme nous l'avons déjà remarqué plusieurs fois pour le continent européen, divers indices de dislocations méridiennes, dont l'une peut-être rejoint les volcans d'Italie et de Tripolitaine au Cameroun, tandis qu'une autre va, des îles Salomon, par la Nouvelle-Zélande, aux volcans antarctiques de l'Erebus.

Enfin, l'on observe, en plusieurs points, des bifurcations greffant, sur ces lignes de premier ordre, des ellipses volcaniques secondaires, telles que celle des Antilles, ou celle du Japon et des îles Ladrones et, en beaucoup plus petit, dans la plupart des régions volcaniques, on retrouve, indépendamment de la direction générale, des anneaux de cratères semblables.

En résumé, l'impression d'ensemble nous paraît un peu comparable à celle que donne une carte de la lune, avec ses immenses dépressions, parsemées de cratères plus restreints.

Au milieu de ce réseau de fractures, il est des parties, comme notre Europe occidentale, où les dislocations les plus sinueuses et les plus compliquées semblent s'être accumulées¹; d'autres, où

¹ Cette complexité même n'est pas, ce nous semble, sans avoir eu sa répercussion historique et sans avoir contribué au rôle spécial qu'a joué cette petite Europe méridionale dans l'histoire; car elle a multiplié les sinuosités des côtes et, par suite, les points de pénétration, les moyens de communication d'un pays à l'autre, puis, ultérieurement, l'expansion et l'action au dehors des peuples marins et commerçants, qui s'étaient constitués sur ces pays, découpés par la mer en mille arabesques. Au con-

ces dislocations existent, mais sont simples et rectilignes comme la Cordillère des Andes¹ ; il est, par contre, des compartiments entiers de l'écorce, qui semblent avoir été à peine ébranlés dans les derniers mouvements géologiques : par exemple, tout le nord de l'Europe, la Sibérie et le nord de la Chine, ou l'Amérique boréale, ou encore la majeure partie de cet immuable continent africain, qui semble s'être seulement fendu, d'un bout à l'autre, à l'époque tertiaire. Nous allons voir immédiatement que c'est exclusivement dans les premières zones à dislocations tertiaires, même quand elles atteignent les régions glacées des deux pôles² que les sources thermales abondent, tandis que les fragments inébranlés de l'écorce en sont, presque absolument, exempts.

Sans insister davantage sur cette disposition d'ensemble, qui ne se rattache qu'indirectement à notre sujet, nous allons maintenant examiner tour à tour les régions hydrothermales de l'Asie, de l'Océan Pacifique et de l'Amérique, de l'axe effondré érythréen (mer Morte, Kilimandjaro), et enfin de l'axe surélevé de l'Atlantique.

§ 1. — *Continent Asiatique.*

Sibérie et Chine, Asie Mineure, Perse, Inde, Indo-Chine.

Nord de l'Asie. — Au nord du continent asiatique, la grande masse sibérienne et mogole, qui constitue une sorte d'Avant-pays de l'Himalaya, présente un môle solide, de constitution très ancienne, que les dislocations tertiaires ont pu fissurer, et des effondrements récents atteindre notamment sur la côte du Pacifique), mais que les plissements du sol n'ont pas modifié depuis les premiers temps de l'histoire géologique.

traire, les populations des grandes masses continentales plus homogènes, comme la Chine ou l'intérieur de l'Afrique, ne pouvaient exercer un rôle actif au loin. Pour que ces masses continentales soient réellement entrées dans le courant de la civilisation, il a fallu l'invention des moyens de communication rapides, qui les ont, en quelque sorte, rapprochées de la mer.

Voir, dans l'ouvrage de SUSS, I, 820, un tableau des divers genres de dislocation, qui ont affecté telle ou telle région du globe.

² Notre connaissance des régions polaires est encore très incomplète et, même dans les parties connues, nombre de phénomènes volcaniques doivent être masqués par le manteau de glace ; ne dirait-on pas cependant qu'il règne, au voisinage des deux pôles, une curieuse activité éruptive et hydrothermale ; cette anomalie s'expliquerait peut-être par la convergence, vers ces régions polaires, de tant de dislocations, à peu près méridiennes, constatées dans l'écorce terrestre.

Tout le nord de la Chine et le sud, jusqu'au Yunnan, paraissent avoir été émergés depuis la fin de la période primaire¹, et les plissements anté-primordiaux y sont recouverts, sur de vastes espaces par des couches primordiales horizontales.

Il est naturel, dès lors, que les sources thermales y soient rares et, en fait, elles font à peu près défaut dans tout l'ouest de la Sibérie², jusqu'à la *région transbaïkalienne*³, où des fractures, accompagnées de roches tertiaires, ont recoupé des plis anciens rattachés à ceux de l'Altaï et où l'on trouve, en conséquence, quelques eaux chaudes, telles que celles du district de *Nertchinsk* (bien connu également pour ses nombreux gisements de métaux divers).

Au sud, quand on arrive aux monts Thian-Chan, ou à l'est, quand on se rapproche de la zone d'effondrement du Pacifique, dans l'Amour, la Mandchourie, le Chantoun⁴, et surtout dans le Kamtchatka⁵, les Kourilles et le Japon, les caractères géologiques se modifient et les sources thermales deviennent plus nombreuses. Cependant, on peut bien dire qu'en général, la Chine, sauf dans cette zone orientale voisine du Pacifique, ou dans la province tout à fait méridionale du Yunnan, paraît offrir partout une ancienneté de plissements, qui a pour contre-coup son dénuement en sources thermales et s'accompagne également d'une certaine pauvreté en gîtes métallifères. Semblable règle ne va pas, bien entendu, pour des régions aussi immenses, sans quelques exceptions.

Si nous parcourons le pays du Turkestan à la Corée, nous trouvons, d'abord, à l'est de la zone déprimée et plate de l'Aral et du Balkasch, les régions, souvent désertiques et assez mal connues, que découpent une série de crêtes à peu près est-ouest, se rattachant à l'Altaï, au Thian-Chan, au Kuen-lun et enfin à l'Himalaya.

Voir, sur ces régions : SUSS, *loc. cit.*, t. II, p. 229 à 242. Le jurassique, notamment, est représenté par un faciès terrestre, avec couches de houille, depuis la Russie jusqu'en Extrême-Orient.

Peut-être existe-t-il quelques sources sur la zone éruptive tertiaire, qui suit la Tunguska, affluent de l'Henisséi.

1893. MACOUCHEV. *Eaux minérales du gouv. de Tomsk* (B. de l'Univ. de Tomsk, liv. V, p. 47). — 1893. OBROUTCHEV (W.). *La source thermale de la vallée Tanarowka, dans le territoire transbaïkalien* (J. d. mines russes, t. IV, p. 372). — 1896. TROPIN. *Die Kaltomokonkische Mineralwasserquelle unweit des Dorfes Subjsinskoje, in Transbaikalien* (Regier. Anzeig, 1896, n° 241). — 1896. SOLESSKI. *Balneochemische Untersuchungen in Transbaikalien* (Mitth. der ost. Sib. Sect. der Kais. Russ. Geogr. Gesellschaft, t. XXVI, n° 4-5. Protok., p. 300-302).

Les trachytes et basaltes reparaissent, avec des gisements métallifères, sur le rivage occidental de la mer d'Okhotsk.

La description de ces dernières régions sera rattachée à celle du centre volcanique du Pacifique.

Les accidents tectoniques de l'Altaï sont trop anciens pour donner naissance à des sources thermales. Mais, au sud, on trouve quelques sources dans la chaîne tertiaire du *Thian-Chan*¹, soit à l'ouest, dans le *Turkestan* russe, vers *Tachkent* et le *Karategin*, où sont les très abondantes sources thermales carbonatées de *Garm*, au nord des monts Pierre-le-Grand², soit surtout à l'est, dans cette région située au nord du Lob-Nor et du désert de Gobi, vers *Pidchan*, *Tourfan*, *Ouroumtsi*³, où divers voyageurs ont signalé des indices volcaniques. On connaît, notamment, les sources thermales sulfureuses d'*Ouroumtsi* au sud-ouest d'une haute montagne que l'on a supposée être volcanique⁴.

C'est environ à 4° au sud du Lob-Nor que G. Bonvalot a trouvé récemment une importante région volcanique.

Plus au sud encore, entre le Kuen-lun et l'Himalaya, se trouve, au voisinage du *Tengri-Nor*, une grande région de sources chaudes, avec un lac de borax, le *Boultso*⁵, qui, pendant longtemps, a fourni le borax, dit de Venise.

Vers l'ouest de la même zone et presque à la limite de l'Inde, la haute vallée du *Satledj* (affluent de l'Indus), à 4 500 m. d'altitude, au sortir du *Rakus-Tal*, est remarquablement riche en sources chaudes incrustantes, formant des dépôts énormes de travertins, en jets sulfureux, etc.⁶.

Dans l'est de la Chine, en Mandschourie, nous trouvons, à la limite du désert de Gobi, la chaîne de *Khingan*, où des documents historiques d'une grande précision signalent une éruption volcanique en 1721. Les sources thermales sulfureuses y sont abondantes. On retrouve également des eaux sulfureuses très fréquentées près de *Peking*, au voisinage du Palais d'été et d'autres sources thermales sur le rivage nord de la mer Jaune, à *Haitchoung* (près de *Moukden*).

Toujours en Chine, nous devons encore mentionner, bien qu'il ne s'agisse pas là de sources thermales, les très importantes salines de *Loutswoun*, dans le Chansi, au coude du fleuve Jaune, et celles du *Setchouan*, à *Tsoulioutachng*, qui produisent, à la fois, des hydrocarbures et du sel en quantités considérables⁷.

¹ Sur le *Thian-Chan*, voir, dans *Stuess, loc. cit.*, I, p. 610 à 620, une étude de J. Mouchketov, avec carte schématique des plissements, p. 617, et la carte du *Turkestan* insérée dans *Reclus*, t. VIt, p. 415. Les derniers plissements du *Thian-Chan* sont tertiaires. Ils ont donné à la chaîne une disposition inverse de celle des Alpes : convexité au sud et parties abruptes au nord. On y trouve des roches éruptives tertiaires. Quant aux volcans quaternaires, signalés jadis par de Humboldt, on en nie aujourd'hui l'existence : mais il n'en est pas de même de ceux que G. Bonvalot a retrouvés récemment plus à l'est, au nord du Thibet, vers 90° de longitude et 36° de latitude.

² 1896. TROPIN. *Die Mineralwasser von Lipezk* (*Turgaisk Gaseta*, n° 26, p. 209-214.) — 1896. L... *Mineralquellen in der Umgegend von Taschkent* (*Turk. Wod.*, n° 96). — 1897. Z... *Die Quelle Avassan, Kreis Taschkent* (*Turkestanische Wedj*, n° 42).

RECLUS. Géographie universelle (t. VIt, p. 160 à 163).

Au N.-O. de la même région, près de *Chikho*, en Dzungarie, il existe un lac de naphte et des sources salées.

Thibet, au nord du *Brahmaputra*. Les efflorescences de sel et de salpêtre sont, en outre, très abondantes dans diverses parties du Thibet (district de *Radokh*, etc.

MOORCROFT. *Asiatic Researches*.

Gîtes minér. et métall., I, p. 473. Nous trouvons, en outre, dans un ouvrage d'Ali-

Enfin, l'île d'*Hainan*, qui reste en dehors du cercle volcanique Kamtchatka-Japon-Formose, etc., sur lequel nous aurons à revenir bientôt, est riche en sources thermales (surtout sur son versant est), en même temps qu'en gîtes métallifères.

Jusqu'ici, nous avons étudié, au nord de la grande chaîne de plissement, qui rattache le Caucase à l'Himalaya en prolongeant les accidents alpestres, une sorte d'Avant-pays peu disloqué et pauvre en sources thermales (sauf dans sa partie sud, où les plissements tertiaires commencent à jouer un rôle et dans l'est, qui participe d'un autre régime, en se rattachant déjà aux systèmes tectoniques de la périphérie du Pacifique). En passant, maintenant, au sud de cette chaîne, nous allons trouver, en Turquie d'Asie, en Perse et dans l'Inde, quelque chose de comparable à ces régions effondrées de la Méditerranée, où abondent, avec les éruptions tertiaires ou quaternaires, les sources thermales, souvent riches en acide carbonique, ou en principes sulfurés.

Asie Mineure. — Nous avons déjà abordé deux fois, par l'ouest et par le nord-est, la région hydrothermale d'Asie Mineure, en parlant de la mer Egée et du Caucase, et nous serons obligé d'y revenir encore, quand nous étudierons la zone d'effondrement erythréenne, Mer Morte-lac Njassa. C'est, en effet, le nœud éruptif le plus remarquable de l'ancien monde, un centre de fractures volcaniques, comparable à celui des Philippines, à l'entrée du Pacifique, entre les trois branches divergentes de Java, du Japon et des Nouvelles-Hébrides, ou encore à celui du Mexique.

Les abondantes sources thermales de ces régions antiques sont d'autant mieux connues qu'elles ont été, pour la plupart, captées et utilisées depuis des siècles.

Ce sont, par exemple, dans la région la plus occidentale et la plus voisine de la mer Egée, celles des environs de *Brousse*, au pied de l'Olympe de Bithynie ; *Tchekirjeh*, aux eaux ferrugineuses et sulfureuses très abondantes, atteignant 80° ; celles d'*Eskischeir*, au S.-E. de Brousse, dans une région connue pour ses mines d'écume de mer ; en Troade, celles de *Tuzla*, déjà citées plus haut, etc. ; puis, à l'est de Smyrne et au nord d'Alaschehr (point terminus de la ligne qui joint Smyrne à Sardes), celles du « pays brûlé », région volcanique, aux abondantes coulées de lave.

Au sud, au contraire, de la même ville, près du Méandre, sont les fameuses

bert (1826), sur les *Eaux minérales*, la mention d'une source chaude, nommée Hong Chan, dans le Kiang Nan (?), non loin du fleuve Jaune, qui, suivant cet auteur, apporterait au jour du cinabre.

fontaines incrustantes de *Tambouk* (Hiérapolis), sources atteignant 60° et très riches en acide carbonique, qui déposent des cascades de travertins, comparables, en beaucoup plus grand, à celles d'Hammam Meskoutine.

Enfin, sur la côte ouest du golfe d'Adalia, au pied du Taurus cilicien, il faut noter les curieux dégagements de gaz combustibles, jaillissant de la serpentine, qui constituent le phénomène connu, depuis l'antiquité, sous le nom de la *Chimère*.

En nous éloignant vers l'est, nous avons à citer, au nord du Taurus cilicien, cette zone volcanique qui comprend le *Karatach Dagh* et le *Mont Argée*.

Les Romains avaient bâti des thermes importants à *Eledja*, entre Adana et Konieh.

Plus à l'est encore, c'est tout le groupe des volcans arméniens, avec les eaux thermales qui l'accompagnent.

Près d'Erzeroum, se trouvent les thermes fameux d'*Ilidja* et ceux d'*Hassan-Kaleh*.

Entre l'Ararat et le Tandourek, les sources acidulées de *Diyadin* déposent d'abondants travertins calcaires, qui modifient peu à peu la disposition des griffons. Le voyageur Taylor dit y avoir vu une multitude de petits jets intermittents, atteignant 2 à 3 m. de hauteur².

Plus au nord, autour du volcan éteint du *Tandourek*, ou Tantourlou, les dégagements de vapeurs sulfureuses sont très abondants.

Vers l'ouest, auprès de *Diarbekir*, la coulée volcanique du *Karatcha dagh* produit également des eaux à acide carbonique.

Enfin, près de *Mossoul*, à côté de l'antique Ninive, on mentionne de nombreuses sources chaudes.

Si nous gagnons maintenant la **Perse**, nous trouvons, au lac d'*Ourmiah*, une remarquable concentration saline, produite par le lessivage des sels gemmes englobés dans les terrains encaissants. C'est là le commencement de cette grande zone de gîtes salifères, rattachés au schlier comme ceux des Carpathes, qui se poursuit, à travers le nord de la Perse, vers le Turkestan³.

Au N.-O. et au S.-E. du lac, il existe des sources thermales à 48°, qui déposent de belles masses de travertins, connues sous le nom de « marbre de Tabriz » et dont beaucoup jaillissent par de petits cônes, analogues à ceux que nous avons décrits à Hammam Meskoutine.

Non loin de là, vers l'est, se dresse le *Sehend* (3 546 m.) abondant en sources thermales acidulées ou sulfurées. C'est dans ce massif que se trouve la fameuse grotte d'Alexandre, caverne à dégagements d'acide carbonique, comme la grotte du chien de Naples, où, d'après la légende, Alexandre aurait enfoui ses trésors.

Puis vient le volcan éteint du *Savalan*, (4 844 m.) également riche en sources thermales.

RECLUS. *Géogr. univ.*, t. IX, p. 511, avec une vue des cascades pétrifiées.

² 1869. *Mittheil von Petermann*, t. XI.

³ *Gîtes minér. et métal.*, I, p. 516. La série, dite gypsifère, du flysch, reconnue par Abich dans l'Arménie et l'Azerbeïdjan (au S.-O. de la Caspienne) se poursuit, au nord de la Perse, par le Khorassan, vers Hérat. On la retrouve, au sud du même pays, depuis le Kourdistan et la vallée du Tigre, jusqu'à Chiraz et aux îles d'Ormuz (Suess, *loc. cit.*, I, p. 407 et 552).

Vers l'est, le volcan, également éteint, du *Demawend* (3 628 m.), au nord de la mer Caspienne, donne naissance, sur son flanc même, à de très nombreuses sources thermales sulfureuses. Un peu plus loin, celles de *Sakhtessar* sont très connues sous le nom d'Eaux-Chaudes (*Ab-i-Germ.*).

Dans l'*Afghanistan*, au nord de Kandahar, le cône volcanique du *Tchalap-dalan*, qui prolonge cette ligne de dislocation éruptive de l'Ararat, du Savalan et du Demawend, produit, à sa base, une multitude de sources thermales.

Au nord, au contraire, vers la côte du golfe Persique et de la mer d'Oman, ce que nous avons à signaler, ce sont les gisements de sel de l'ouest de Chiraz et de l'île d'Ormuz, en relation avec le schlier comme ceux du nord de la Perse, les salses et volcans de boue du *Mekran*.

Nous arrivons ainsi à l'*Hindoustan*¹, qui présente, on le sait, pour sa constitution tectonique, deux parties principales absolument distinctes : la chaîne tertiaire de l'Himalaya et la masse ancienne de la péninsule, jouant le rôle d'un Avant-pays, où, depuis le carbonifère au moins, aucun plissement ne s'est fait sentir, mais que de puissantes fissures ont disloqué.

Au milieu de cette dernière, l'immense nappe basaltique du Dekkan, dont l'âge ne paraît pas dépasser l'éocène, forme un troisième ensemble, différent des deux autres à tous égards.

Enfin, dans le nord-ouest de la péninsule, et les pays avoisinants, on a des dépôts salifères de deux âges : ceux du flysch éocène dans les chaînes côtières de l'Iran, et ceux, au contraire, paléozoïques du Saltrange, sur le haut cours de l'Indus²

L'écho de cette disposition se retrouve, nécessairement, dans la répartition des sources thermales.

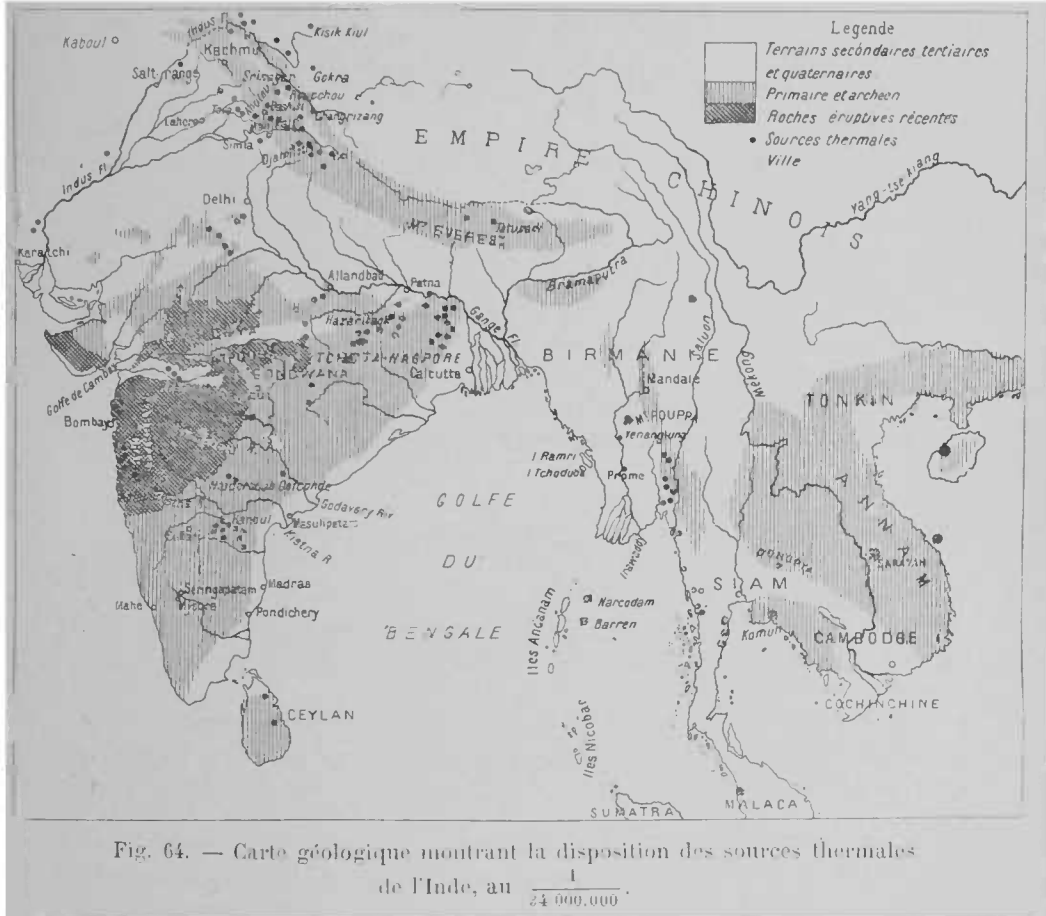
Lorsqu'on examine la carte d'ensemble, sur laquelle M. Oldham a reporté les emplacements de 300 sources thermales hindoues (en excluant de cette carte les sources minérales froides qui y figurent), on voit qu'elles se divisent en quelques grandes régions hydrothermales, dont l'étude du catalogue descriptif (malheureusement sans analyses chimiques) joint à cette carte et la comparaison avec une carte géologique du pays permettent un peu de préciser la nature. Ce sont simplement les résultats de ce travail, que nous voudrions donner, sans entrer dans des détails trop arides³.

1882. OLDHAM. *The thermal Springs of India* (Mem. Geol. Surv. of India., t. XIX, p. 99-161) avec bibliographie antérieure, portant sur 301 sources et carte d'ensemble — Voir, sur la géologie générale de l'Inde: 1893. MEDLICOTT ET BLANFORD. *A Manual of the geology of India* (2 vol. in-8°, Calcutta ; 2^e édition revue par R. D. Oldham). — Cf. SUSS, *loc. cit.*, I, p. 509 à 528.

Sur les Saltrange, voir une bibliographie détaillée dans SUSS, *loc. cit.*, I, p. 558.

³ La plupart de ces sources chaudes sont désignées, dans l'Inde, sous les mêmes

La figure 64 montre, d'abord, sur le bord occidental de la grande coulée de lave basaltique du Dekkan¹ (qui, de Bombay à Nagpur, occupe près de 900 km.), toute une série de sources chaudes, qui suivent le rivage de *Kolapur* vers *Bombay* : sources qualifiées, pour la plupart, de sulfureuses et dont quelques-unes, au moins, doivent être probablement, en outre, acidulées, bien que l'âge,



relativement ancien, de ces basaltes ne soit pas favorable à l'abondance de l'acide carbonique.

La plus septentrionale, celle d'*Anaval*, à l'est du golfe de Cambay, est très célèbre²

D'autres groupes analogues entourent cette même masse, au nord et à l'est.

C'est, par exemple : au nord, le groupe du *Khandesh*, au pied des Satpura hills ; à l'est, celles qui se trouvent au sud de *Nagpur*, etc. ; au S.-E., le groupe

noms : source du Soleil (*Suraj Kund*), source de la Lune (*Chandra Kund*), source de Sita (*Sita Kund*), ou simplement eau chaude (*Garmab*, *Tatta pani*, *Jerria pani*).

¹ Les coulées du Dekkan paraissent s'être espacées pendant le crétacé et l'éocène.

² Elle passe pour avoir été produite par Rama pour désaltérer 18 000 prêtres, qui avaient été transportés là et mouraient de soif.

très abondant de *Karnul*, dans une région connue pour ses mines de diamants, sur les terrains paléozoïques.

Au N.-O., près de l'embouchure de l'Indus et du grand port commerçant de *Karatchi*, des sources thermales, au pied du *Pic Mangho*, remplissent un étang sacré.

De nombreuses sources thermales se trouvent encore, au sud du Gange, vers la limite des terrains paléozoïques et archéens, qui forment le plateau et des dépôts quaternaires de cette grande plaine. Il en existe un groupe important au sud-ouest de Delhi, dans le nord du Rajputana, au sud d'Allahabad et au sud de Patna.

Nous manquons, malheureusement, de renseignements sur la composition de ces eaux ; mais, dans le groupe de *Hazaribagh*, au nord du Chota Nagpore, plusieurs dégagent de l'acide carbonique ; d'autres sont salines et donnent des dépôts de chlorure et sulfate de soude (*Belkapi*).

Plus près de Patna, la source de *Bharari* donne un dépôt siliceux.

En allant au nord, dans la chaîne de l'Himalaya, nous rencontrons de nombreuses sources chaudes, comparables à celles des Alpes : beaucoup, simplement thermales, dans la chaîne centrale ; d'autres, salines, surtout sur la bordure tertiaire, qui longe le versant sud.

Il en existe un premier groupe dans le Kachmir, sur les deux rives de l'Indus.

Dans l'Himalaya central, autour de Simla, une première série de sources salines sort, sur le flanc sud, dans le tertiaire. Les eaux de *Lansah* contiennent : 2,60 gr. Na_2O , CO_2 ; 0,74 NaCl ; 0,16 Na_2O SO^3 ; celles de *Teva* : 9,23 gr. NaCl ; 0,33 Ca Cl^2 ; 0,12 CaO SO^3 .

A l'ouest du Koulou, vers *Simla*, il existe des carrières de sel et, sur la crête appelée le *Mont d'Alexandre*, des dégagements de gaz combustibles sont adorés par les Hindous, sous le nom de la Flamme-Dieu.

Puis, une seconde série se trouve sur le flanc sud de la chaîne centrale et est généralement peu minéralisée. Nous voyons que celle de *Bashisht*, à 2 200 m. d'altitude et 59°, contient seulement 0,7 gr. de résidu ; celle de *Kelat*, au voisinage, à 1 900 m., 0,8 gr.

Les eaux du *Manikam*, toujours dans le même groupe, à 1 862 m. et 94°, c'est-à-dire un peu au-dessus de la température d'ébullition à cette altitude, sont extrêmement abondantes ; elles renferment 0,3 gr. de substances salines (NaCl , Na_2O SO^3 , CaO SO^3 , CaO CO^2) et déposent un travertin ferrugineux.

Le groupe du *Djamotri*, d'où jaillissent les hauts torrents du Gange, présente, aux sources mêmes de la Djanna (2 984 m.) des eaux thermales à 89° (moins de 2 degrés au-dessous du point d'ébullition à cette altitude. C'est là, suivant la légende, que le dieu-singe Hanouman éteignit, un jour, sa queue en feu : ce qui a laissé l'eau brûlante. Plus loin, les eaux de *Sheopuri* et de *Tatapani*, au nord de l'Everest, atteignent également l'ébullition.

Enfin, quand on passe sur le flanc nord thibétain, on retrouve des sources salines, en même temps que des terrains secondaires ou tertiaires et même quelques sources acidulées. Les eaux très abondantes de *Kisik Kiul*, au nord des sources de l'Indus et près du lac du même nom, à 5 000 m. (49°), sont chlorurées sodiques ; celles de *Gokra*, plus au sud (3 500 m., 65°,6), sont très riches en acide carbonique ; le plateau du *Roupchou* contient de nombreux

lacs salés, avec des gisements de soufre et borax ; les sources de *Changrizang* (3670 m., 47°), sur la rive sud de la rivière Para, sont également salines, etc.

En Birmanie ¹, nous avons, le long de l'Irawaddy, une ligne de dislocations tertiaires, qui prolonge nettement la ligne volcanique de Sumatra et des îles Andaman (Barren, Narcondam).

Là, se trouvent le cratère éteint du mont *Pouppa* ; puis, au sud, les jets de gaz combustibles et les sources pétrolifères de *Yenang-ung* ; les nombreuses sources salines de *Promé* ; enfin, sur la côte, les volcans de boue de *Ranri* et de *Tchedouba*, associés avec des sources salines, qui paraissent généralement en relation avec les couches nummulitiques ².

A l'est de l'Irawaddy, sur une ligne de fractures parallèle à ce fleuve, le long du Saluen et de la côte, M. Oldham signale toute une longue rangée de sources thermales.

Vers l'est, dans le Siam, le pied du *Dongpya* est également riche en sources thermales, au voisinage desquelles on trouve des troncs d'arbres silicifiés.

Enfin, en Annam, nous mentionnerons encore la région volcanique du *Saravan*, où les sources thermales sont aussi très nombreuses.

§ 2. — Cercle éruptif du Pacifique.

Portion asiatique et océanienne. — Il est peu de phénomènes géologiques plus nets et plus incontestables que l'existence, sur toute la périphérie de l'océan Pacifique, d'une longue chaîne de plissement, accompagnée d'une trainée volcanique presque continue, qui dessine, en quelque sorte, le pourtour d'un colossal effondrement cratéiforme, esquissé depuis les temps primaires (fig. 63). Cet anneau éruptif, formé : dans les montagnes Rocheuses, d'une ligne presque droite ; dans la région du Japon et des Kourilles, d'une succession d'arcs de cercle juxtaposés, est, en d'autres régions, plus compliqué. Au voisinage de l'Équateur (peut être, à la rencontre de cette autre ligne de dislocation, marquée en Europe par la Méditerranée), il se

¹ Sur les chaînes de Birmanie, voir SUSS, *loc. cit.*, I, p. 592.

² 1873. THEOBALD. *Salt-prings of Pegu* (Rec. Geol. Surv. Ind., VI, p. 67-73). Voir bibliographie dans SUSS (*loc. cit.* I, 595). — Sources salines, gîtes de pétrole et volcans de boue sont là en relation avec des serpentines. — 1891. BORR (W.). *The thermal Springs of Selangor and Malacca* (Jour. Straits Branch. R. Asiatic Soc., 1891, p. 43-62).

ramifie suivant le cercle des Antilles; il se bifurque, au voisinage des Moluques, en trois branches (Philippines, îles de la Sonde et Hébrides); il s'agrémente de rameaux est-ouest, comme celui des Samoa. Ailleurs, dans l'hémisphère nord, il se bifurque en deux branchements, comme dans l'Ouest américain, ou au sud du Japon. Ou encore, on voit reparaître, au centre de l'anneau, une traînée éruptive, comme celle des îles Hawaï (Mauna Loa). Mais, dans l'ensemble, le phénomène est si manifeste et le volcanisme est accompagné partout d'une telle abondance de sources thermales, la connexion entre les deux manifestations internes est si nette qu'il est à peine besoin d'y insister. Nous nous contenterons de signaler quelques régions plus particulièrement intéressantes.

Au **Kamtchatka**¹, l'abondance des sources thermales, dans une région aussi septentrionale, fait un contraste frappant avec la pauvreté que nous avons remarquée, à cet égard, dans toute la Sibérie et le nord de la Chine. Les sources chaudes jaillissent jusque dans la péninsule de *Bering*, au milieu même de l'isthme, qui sépare cette presqu'île en deux moitiés.

Au **Japon**², nous signalerons, sur le flanc du Fouzi, si souvent peint par tous les artistes japonais, les sources thermales de *Hakone* avec leurs villages de bains, les eaux sulfureuses à 72° de *Kousats*, sur les pentes du volcan Siranayama, non loin de Takasaki; celles de *Sinabara*, près de la baie de ce nom, à la base est du volcan de l'Ounzen, etc.

A **Formose**, les sources thermales sulfureuses sont fréquentes, entre *Mengka* et *Keloung*, au nord du *Kiaïchan*, volcan éteint, d'où se dégagent encore des fumerolles.

Dans les **Philippines**³, *Mindanao*, île basaltique, renferme de nombreuses sources thermales auprès du lac de Mainit; on en retrouve au nord, dans l'île de *Leyte*; mais l'île volcanique est surtout *Luzon*, avec les volcans du *Mayon*, du *Mazaraga*, de l'*Iriga*, etc. A l'est de ce dernier, dans la vallée de *Tibi*, se trouve un remarquable groupe de sources thermales entre 80 et 100°, déposant de la silice. On a remarqué que les eaux formaient, au-dessus de leur orifice, une série d'anneaux concentriques de plus en plus étroits, qui finissent par constituer un cône plein, obstruant le griffon; alors la source se fraye un autre passage.

Au sud de Manille, au pied du *Maquiling*, les sources thermales sulfureuses jaillissent, de tous côtés, formant une série de petits lacs fumants (Lupang

1788. *Journal historique du voyage de M. de Lesseps, consul de France, employé dans l'expédition de M. de la Pérouse en qualité d'interprète du Roi. — Die Thermalwasser Kamtschatka's* (Mém. de l'Ac. imp. des Sc. de Saint-Petersbourg, t. XXXII, n° 18, p. 29). — Voir encore *Suess, loc. cit.*, t. II, p. 227.

² *Suess, t. II, p. 221.*

1883. *Noticia acerca de los manantiales termo-minerales de Bambang y de sus alinas del monte Blanco en la provincia de Nueva-Viscaya (Filipinas)* (Bol. d. l. Com. del Mapa geologico de España, t. XII, p. 223. — Cf. *Suess, loc. cit.*, II, p. 213.

Puti, etc.). Les mêmes phénomènes se reproduisent auprès du *Tual*, du *Bombou*, du *Data*, toutes montagnes accompagnées de sources chaudes et de solfatares.

Les **Moluques** du Nord, riches en cratères éruptifs, présentent également des phénomènes geysériens, avec dépôts siliceux, dans l'île *Batjan*.

A **Célèbes**, le Sapoeitan donne lieu aux sources thermales et aux volcans de boue de Panghoe : des jets de gaz combustibles sont connus dans le promontoire d'Api.

Bornéo, placé au nord de la traînée éruptive, qui va des Moluques à Java, est pauvre en sources thermales ; au contraire, on en retrouve dans l'île isolée et volcanique du *Goënonng Api*, dans celles de *Damma*, *Nila*, etc.

Timor a, dans le sud-ouest, ses volcans de boue.

Puis, à **Java**¹, il existe de nombreuses sources chaudes, appelées *Tichapannas* en langue malaise.

On sait que les volcans de cette grande île, au nombre de 45, dont 28 en activité, dessinent, de l'est à l'ouest, une traînée presque continue, qui se prolonge à l'est, vers Soembawa.

Dans le détail cependant, on a remarqué que les groupes volcaniques locaux étaient souvent alignés suivant des lignes N.-O.-S.-E., obliques sur cette direction principale² (et parallèles à l'axe de Sumatra) : ce qui est un fait très général dans les traînées éruptives (Amérique centrale, Sumatra, etc.) et peut servir à expliquer certaines anomalies apparentes dans les axes volcaniques, dont on ne connaît que des tronçons disjoints.

Au pied de chacun de ces volcans, les sources chaudes sont abondantes. Il nous suffira de citer, de l'ouest à l'est : le volcan du *Gedé* (2962 m.) ; puis le *Patohea* (2366 m.), au nord-est duquel un cirque de boue chaude, analogue aux « furnas » des Açores, que nous citerons plus loin, dégage, par des milliers d'ouvertures, des vapeurs acides et des jets d'eau ; le *Wajanng*, avec son petit geysier ; le *Papandajan* (2634 m.), avec ses marais sulfureux bouillonnants ; le *Galoengoeng* (2229 m.) ; le *Boerangrang* (2058 m.) ; enfin le plateau de *Dieng*, avec ses lacs chauds saturés de substances chimiques, ses solfatares, ses mofettes d'acide carbonique et ses ruisseaux d'eau bouillante.

Voir, dans RECLUS, t. XIV, p. 323, une carte des volcans de Java. — 1844. FRESenius. *Examen chimique des eaux minérales de Java* (Ann. d. M., 4^e sér., t. V, p. 571). — 1847. MULDER. *Analyse de l'eau minérale de Gebangan* (Inde hollandaise) (Ann. d. M., 4^e sér., t. XI, p. 593). — 1875. L. VAN DIJK. *Vicrde artesische putboring te Batavia op Molendriet Oost in de nabijheid der oude Stadt Batavia* (Jaarboek van het Mijnwezen Oost Indië, 4^e année, II, p. 169). — 1876. HOOZE. *Artesische putboring te Katta-Radja in Aljeh* (Jaarboek van het Mijnwezen Oost Indië, 4^e année, I, p. 181). — 1876. HOOZE. *De zerende artesische poring, put n^o VI op het Beursplein, te Batavia* (Jaarboek van het Mijnwezen oost Indië, 4^e année, II, p. 200). — 1877. HOOZE. *Artesische putboring op het Einland ourmt bij Batavia* (Jaarboek van het Mijnwezen in Nederlandsch Oost Indië, 6^e année, t. II, 199). — 1877. VAN DIJK. *Achtste artesische putboring te Batavia op Salemba nabij het landgoed Strinswijk* (Jaarboek van het Mijnwezen in Nederlandsch Oost Indië, 6^e année, t. II, p. 198). — 1886. STANISLAS MEUNIER. *Examen d'eaux minérales de Java* (C. R., t. CII, p. 1205). — 1889. STANISLAS MEUNIER. *Examen chimique d'eaux minérales provenant de Malaisie* (C. R., t. CX, p. 1083).

² Voir SUESS, *loc. cit.*, I, 601, une carte mettant en évidence le même phénomène pour Sumatra.

Sumatra ¹ possède aussi une rangée de 66 volcans, dont 5 en travail, avec sources thermales, gaz sulfureux, etc., qui se termine au sud, dans le détroit de la Sonde, par le volcan du *Krakatau*, devenu tellement célèbre depuis l'éruption de mai 1883 ².

Si nous retournons maintenant au nœud volcanique des Moluques pour continuer le tour du Pacifique, nous avons, au nord de la *Nouvelle-Guinée*, dans les îles *Lesson*, *Volcan*, *Karkar*, puis dans les îles *Salomon* et dans les *Nouvelles-Hébrides* une trainée éruptive, à laquelle doivent se rattacher les cratères des îles *Samoa*, *Fidji* et *Tonga* et qui, en tout cas, se poursuit directement dans la Nouvelle-Zélande ³.

On cite des sources geysériennes dans ce groupe, notamment dans une des îles françaises au nord de Birara. L'île du *Vanua Lava*, ou grande terre, au nord des Nouvelles-Hébrides, a, sur ses rivages, de nombreuses sources chaudes.

En Nouvelle-Zélande ⁴, les phénomènes hydrothermaux prennent une importance toute particulière et qui mérite une étude spéciale.

La Nouvelle-Zélande comprend, on le sait, deux grandes îles, de constitution géologique assez différente : l'île du Sud, avec son axe de roches cristallines et terrains paléozoïques, donnant un relief adouci comparable à celui de la Norvège et ses terrains secondaires au N.-E. et au Sud ; l'île du Nord, au contraire, avec ses volcans (*Tongariro*, etc.), ses roches éruptives récentes et ses geysers.

Dans l'île du Sud ⁵, on ne connaît que deux sources chaudes, l'une dans les plaines d'*Hanmer* (comté *Amury*), l'autre près du lac *Sumner*, à 50 km. sud-ouest de la première (limite sud de la province de *Nelson*). Mais, dans l'île Nord, elles sont, au contraire, fort nombreuses et, tout spécialement, sur l'axe de fracture ⁶, marqué par les volcans encore fumants de *Tongariro*, du *Tarawera* et de *Whakari*, les lacs de *Taupo*, *Rotorua*, *Tarawera*, etc. : région célèbre

A Sumatra, un premier alignement volcanique miocène suit toute la côte occidentale de l'île. Il est traversé par une douzaine de cassures perpendiculaires, sur lesquelles se trouvent les volcans récents.

1883. VERBEEK. *Krakatau* (in-8° avec atlas et album, Batavia).

LIVERSIDGE (A.). *Waters from Hot springs, New Britain and Fidji*.

L. DE LAUNAY. *Richesses minérales de la Nouvelle-Zélande* (Ann. d. M., mai 1894), 36 p. et 1 pl., avec bibl. autér. — 1864. YATES (J.). *Excess of Water about New Zealand*.

Nous empruntons cette description à notre article précédemment cité. — Voir, sur ces sources : DE HOCHSTETTER, *passim*. — R. ABBAY (Quart. Journ. geol. Soc., XXXIV, p. 170). — SKEY (Trans. N. Z. Inst., X, p. 243). — HECTOR (*Handbook of New Zealand*, 1883). — Voir encore RECLUS, XIV, p. 834.

Cet axe de fracture bien connu est, comme l'a remarqué Dana, parallèle à nombre de grands accidents terrestres, notamment les *Alleghany*, les monts *Scandinaves*, la côte orientale d'Asie, etc., et perpendiculaire sur le grand axe du Pacifique.

pour ses merveilles naturelles, ses geysers, solfatares, volcans de boue, etc... A l'est de cette ligne, on en cite une sur le Waipuu, près d'East Cape, plusieurs sur le cours de la Thames, qui se jette dans le golfe d'Hauraki et une près de la baie d'Islands à Mahurangi.

Cette région fameuse du lac Taupo a été assimilée à un ancien golfe, en partie comblé et isolé de la mer par l'entassement progressif des déjections volcaniques¹.

Von Hochstetter a décrit un grand nombre de sources, qui se présentent souvent comme des trous ronds de 2 à 3 m. de diamètre, où bout une eau plus ou moins claire, lançant parfois des jets de boue. Il n'y a cependant pas de volcans de boue proprement dits, analogues à ceux décrits par Abich, au Caucase².

Voici l'analyse de quelques eaux :

	SOURCE de la région du Taupo à 98°	SOURCES DU ROTOMAHANA		
		à 84°	à 98°	à 16°
Si O ²	0,210	0,164	0,168	0,231
Na Cl	4,263	2,504	1,992	1,192
	4,826	2,732	2,462	1,726

On peut comparer cette teneur avec celle du grand geyser d'Islande, donnée plus loin.

Voici, encore, l'analyse du dépôt d'une source sur la faille du Pairoa³ :

SiO ²	Ca O	Mg O	Fe ² O ³ + Al ² O ³	SO ²	H ² O
85,26 à 97,08	0,84	0,28	4,10	0,57	8,71

Enfin, au sud de la Nouvelle-Zélande la ligne de dislocation volcanique ne s'interrompt pas et se prolonge, au contraire, jusque dans les dernières terres antarctiques, pour rejoindre la chaîne côtière des deux Amériques, au sud de la Patagonie. Là se trouvent les volcans des terres *Erebus*, *Terror*, *Melbourne*, le cratère

1891. RAMOND. *La Nouvelle-Zélande* (Feuille des jeunes naturalistes, 1^{er} février au 1^{er} mai, p. 69).

² Hochstetter, *loc. cit.*, p. 126.

Hochstetter, *loc. cit.*, p. 133.

ébréché de l'île *Déception*, dont les parois glacées donnent issue à des filets d'eau thermale, le *Bridgemann*, etc.

§ 3. — *Amérique : Amérique boréale et États-Unis, Mexique, Antilles, Amérique centrale, Amérique du Sud.*

Le cercle éruptif, que nous venons de suivre en Asie et en Océanie, présente, sur toute la longueur des deux Amériques, de l'Alaska à la Terre de Feu, dans la Sierra Nevada et les Montagnes Rocheuses, une netteté si incontestable que nous pouvons, ce nous semble, sans aucun risque de confusion, étudier, en même temps que les sources thermales de cette ligne de dislocation récente, celles qui se trouvent, en nombre relativement restreint, dans d'autres portions du continent américain. Cela nous évitera d'avoir à revenir une autre fois sur cette partie du monde.

Amérique boréale et États-Unis. — Nous possédons, pour les sources thermominérales des États-Unis, un répertoire comprenant près de 300 noms de localités¹ et, lorsqu'on commence à étudier ce long catalogue, qui n'a malheureusement encore été l'objet d'aucun essai de coordination géologique ni chimique, la première impression est celle d'une inextricable confusion, au milieu de laquelle il est d'autant plus difficile de se reconnaître que l'abondance apparente des sources décrites suivant les régions est, en réalité, surtout fonction d'un phénomène purement accidentel : à savoir, la densité de la population dans le district considéré et l'état d'avancement des connaissances géographiques. Cependant, dès qu'on a fait un premier travail de triage entre les sources froides et les sources thermales, on constate, une fois de plus, avec une remarquable netteté, l'exactitude de la loi générale, à la démonstration de laquelle nous nous sommes attaché jusqu'ici : c'est-à-dire de la relation des sources thermales avec les accidents tertiaires ou quaternaires du sol.

1886. ALBERT PEALE. *Lists and Analyses of the Mineral springs of the United States* (a preliminary study), (Bulletin of the U. S. geol. Surv., n° 325). Les analyses sont données en grains par wine gallon de 231 cub. inch. Pour les convertir en grammes par litre, il suffit de multiplier les chiffres par le coefficient 0 gr. 0171. Nous rappelons également que, pour passer des degrés Fahrenheit aux degrés centigrades, il faut retrancher 32 et diviser par 1,8. — Voir encore : 1875, LIEUT. WHEELER. *Rapport sur les sources chaudes des États-Unis*. (Washington).

Des trois grandes régions naturelles, qui constituent les États-Unis : la chaîne plissée des Appalaches à l'est, la dépression du Mississipi au centre et les hauts plateaux des Montagnes Rocheuses à l'ouest, les deux premières, qui forment un massif ancien, dont les plissements hercyniens ont à peine rejoué à l'époque tertiaire, sont extrêmement pauvres en sources chaudes, tandis que ces sources sont très nombreuses dans l'Ouest, où l'on retrouve les dislocations tertiaires et les roches connexes.

Cette pauvreté est surtout frappante dans le nord des Appalaches (New-York, Pensylvanie, etc.), et s'atténue seulement un peu dans le sud (Virginie, etc.), qui est plus faillé.

Dans tout cet Est américain, on n'a que des sources salines (chlorurées sodiques, sulfatées ou sulfurées calciques), ou des sources ferrugineuses, parfois des suintements hydrocarbonés, accompagnant le chlorure de sodium, sur l'axe pétrolifère du Saint-Laurent; au contraire, les sources à acide carbonique libre sont localisées dans les districts volcaniques de l'Ouest américain.

Si nous parcourons le pays de l'est à l'ouest, nous avons, d'abord, sur la côte de l'Océan Atlantique, à l'est des Appalaches, une zone de terrains archéens ou primaires, comprenant les états du **Maine**¹, de **New Hampshire**, de **Vermont**, du **Massachusetts** et du **Connecticut**; puis, dans les états de **New Jersey**, le **Maryland**, les **Carolines**, la **Géorgie** et la **Floride**, des terrains secondaires et tertiaires, où l'on ne trouve pas une seule source réellement thermale². Il n'y a là que des sources salines et parfois (dans le Vermont) des sources sulfurées calciques, déposant quelques tufs calcaires.

Dans la **Floride**, les sources sont souvent remarquablement abondantes et assez chaudes; mais ce ne sont pas, pour cela, des sources thermales; car elles ne dépassent pas la température moyenne du sol superficiel, qui atteint là souvent 25°.

A l'ouest de cette première zone côtière, nous abordons les terrains plissés

¹ Voir 1861. Dr GOODALE. *Report on the mineral waters of Maine* (Reports to the Maine board of agriculture).

² On a récemment appelé l'attention sur l'eau de *Battardvale*, à 22 kilomètres de Boston (Massachusetts), qui contiendrait, prétend-on, une proportion tout à fait anormale de lithine, provenant de la présence de triphane et de lépidolithe aux environs. (Résidu fixe : 0,24 gr., dont 0,21 de carbonate de lithine (?), et seulement des traces d'autres substances.)

Il existe une étude très développée sur les nappes artésiennes de toute cette zone côtière, qui servent à l'alimentation de toutes les grandes villes de cette région : 1896. NELSON HORATIO DARTON. *Artesian Well prospects in the Atlantic coastal plain region* (Bull. of the U. S. geol. surv., n° 138), avec toute une série de cartes et de coupes, qui présentent un intérêt général pour l'étude de la circulation des eaux souterraines. — 1895. HOLMES (J.-A.). *Notes on the underground supplies of potable waters in the South atlantic Piedmont plateau* (Trans. of the amer. Inst. of mining Eng. atlanta meeting; broch. in-8°).

de la chaîne des **Appalaches**, qui, surtout dans sa partie sud, présente quelques sources thermales¹. peut-être explicables par les mouvements de bascule tertiaires, qu'on a été amené à y supposer.

On sait quelle régularité de plissements (poussés en masse de l'est à l'ouest), caractérise cette chaîne paléozoïque, comparable, à bien des égards, au Jura. Les mêmes plissements, prolongés au Nord, forment des zones parallèles à la grande faille si caractéristique du Saint-Laurent et du lac Champlain.

Quand on part du nord, on rencontre, d'abord, à l'ouest de Montréal, dans le bas Ottawa, la station thermale très fréquentée de l'*Original*, où se trouvent les sources sulfureuses, salines et iodurées, dites *Caledonia springs*.

Les suintements de pétrole et les dégagements de gaz combustibles sont fréquents sur toute cette zone N.-E.-S.-O. du Saint-Laurent et des lacs Erié et Ontario. On connaît les gaz carburés de *Trois Rivières*, entre Québec et Montréal; ceux des environs de *Montréal*; les sources pétrolifères et salées de *Petrolia* et *Windsor* sur la rive ouest du lac Erié; celles, au contraire, de la rive est, dans les états de New-York, Pensylvanie, Ohio et West Virginia (*Titusville, Oil City, Warren, Pittsburg, etc.*).

En fait de sources minérales, on n'a guère à mentionner, dans cette zone, que des sources salines, assez peu minéralisées pour la plupart, comme cela se comprend dans ces terrains primaires, quelquefois des eaux à acide sulfurique libre comme *Oak Orchard* (New-York), ou *Blossburg* (Pensylvanie), exceptionnellement des eaux salines avec acide carbonique, comme celles assez fameuses de *Saratoga*, au nord d'Albany (New-York), dont la température ne dépasse pas 13°.

Dans tout le nord des Alléghanies, la source la plus chaude est celle de *Lebanon* (New-York), à 24°. En Pensylvanie, une seule source atteint 18°, celle de *Perry County*.

Plus au sud, et notamment dans la **Virginie**, la fréquence plus grande des failles² amène quelques eaux chaudes; telles que celles de *Healing* (comté de Bath), à 31°, contenant seulement 0,60 gr. de résidu, dont 0,30 de carbonate de chaux et 0,12 de sulfate de magnésie; les *Warm sulphur springs*, dans le même comté, à 37° (0,55 gr. de résidu, dont 0,30 gr. de sulfate de chaux), ou les *Greenbrierwhite sulphur springs* à 17°, sources sulfatées calciques, tenant 1,36 gr. de sulfate de chaux et 0,60 de sulfate de magnésie, sur 2,21 gr. de résidu fixe.

Dans la partie centrale des États-Unis³, très pauvre en sources thermales,

¹ Voir, sur la structure géologique des Appalaches : SUSS, *loc. cit.*, p. 738 à 748, avec carte des plissements. On a distingué, dans les Appalaches, les Montagnes Vertes (partie nord, état de Vermont, Nouvelle-Angleterre), dont le soulèvement daterait de la fin du silurien et les Alléghanies (région médiane, Pensylvanie, etc.), qui seraient, au contraire, de la fin du carbonifère. D'après Dana, la chaîne des Alléghanies devrait son relief actuel à un dernier mouvement de bascule, qui l'aurait relevée vers l'est à l'époque tertiaire.

² 1840-1842. W.-B. ROGERS. *On the connection of thermal springs in Virginia with anticlinal axes and faults* (Trans. of the Assoc. of Amer. Geol. and Natur.). — Voir SUSS, *loc. cit.*, t. I, p. 745, note 1, une bibliographie relative à cette région sud des Appalaches, où l'on remarque surtout la structure imbriquée, due à l'abondance des failles inverses. On sait que l'on admet aujourd'hui la prolongation des Appalaches au sud, avec une direction est-ouest, vers l'Arkansas.

1892. SCHWEITZER (P.). *A report on the mineral-waters of Missouri*. Jefferson City.

nous n'avons guère à citer que les *Hot springs* de l'**Arkansas**, à l'ouest de Little Rock, sources simplement thermales à 69° (0,13 gr. de résidu, dont moitié en bicarbonate de chaux), ou, dans le même État, la *Rice's spring* (comté de Randolph), source carbonatée ferrugineuse à 28°

Le **Kentucky** présente peu de sources minérales, mais deux grands niveaux artésiens, l'un dans un grès calcaire à la base du silurien, l'autre à la base du carbonifère ¹.

C'est dans l'ouest des États-Unis que se trouvent, comme nous l'avons dit, les véritables richesses hydrothermales de ce pays.

Ces sources chaudes commencent, au nord de l'Amérique, dès l'**Alaska** et les **North Western Territories** du Dominion, parallèlement à la trainée éruptive, qui, depuis les îles Aléoutiennes, suit la côte du Pacifique.

Nous nous contenterons de signaler, dans la **Colombie britannique**, la source chaude qui jaillit au pied d'un des glaciers de la vallée du *Stickeen*, les eaux sulfureuses d'*Harrison*, près Agassiz, un peu à l'est de Vancouver, surtout celles de *Banff*, à 1370 m., dans le Parc National des Canadiens (vers 116° de long. et 52 de lat.).

On est étonné de trouver, à l'est, dans les territoires glacés du Grand Nord, qui s'étendent vers la baie d'Hudson et surtout le long du Mackensie, vers son embouchure, ou encore, au sud, près du lac Athabasca, une série de salses, de sources de poix minérale et parfois de sources sulfureuses, etc. ².

Vers le sud, en pénétrant sur le territoire des États-Unis, on voit s'élargir, d'abord, de plus en plus, la zone hydrothermale, que nous étudions et l'on peut y distinguer, de l'est à l'ouest, quatre grandes régions naturelles : les Montagnes Rocheuses, les Hauts Plateaux, le grand bassin du Lac Salé et la côte du Pacifique.

Les très nombreuses sources thermales de cet Ouest américain offrent souvent une haute température et, contrairement à ce que nous avons vu dans les autres parties de l'Amérique, sont fréquemment carbonatées, parfois siliceuses.

Si nous commençons par suivre les Montagnes Rocheuses, nous trouvons, au nord, un groupe d'états récemment explorés, dont les richesses minières ont beaucoup attiré l'attention dans ces dernières années : le Montana, le Wyoming et l'Idaho. Là se trouve, dans l'angle nord-ouest du Wyoming, une région particulièrement intéressante pour ses centaines de sources thermales et sur laquelle nous allons revenir avec plus de détails : le Parc National du Yellowstone.

On peut citer, en outre, dans le **Montana** :

White sulphur springs (51°; 1,55 gr. de résidu, dont 0,55 de carbonate, 0,44 de sulfate et 0,24 de chlorure de sodium); *Hunter's Hot sp.* (60°; 0,29 gr. de résidu, dont 0,15 de carbonate de soude); *Matthews Warm spr.* (50°),

1892. — 1892. BRANNER (J.-C.). *The mineral-waters of Arkansas* (Annual Report of the geological Survey of Arkansas for 1892), 144 p. avec carte.

Voir, sur les sources très rares du **Minnesota**, les travaux de W.-H. WINCHELL et 1887. DAWSON (G.-M.). *On certain borings in Manitoba*. — Sur le **Missouri** : 1892. SCHWEITZER. *A report on the mineral waters of Missouri*, avec bibliographie générale des eaux minérales depuis le xvi^e siècle (Geol. survey of Missouri, t. III).

La région nord, entre le Yukon et le Mackensie, paraît présenter des roches éruptives récentes.

Helena Hot sp. (60°; 0,63 gr. de résidu, dont 0,27 de sulfate de soude et 0,17 de carbonate).

Dans le **Wyoming**¹, on connaît, outre le Parc National², les eaux salines de *Saratoga* (Carbon C^s) et les eaux chaudes du *Snake river*, toutes deux à environ 50°

Dans l'**Idaho**, il existe beaucoup d'eaux chaudes, chargées d'alcalis ou de sulfure de sodium, dont l'une arrive à 100° dans le comté d'Ada. La plus connue est *Soda springs*, source carbonatée à 88°, près du Bear River.

La région du **Yellowstone Park**, au nord-ouest du Wyoming, découverte en 1871 par le D^r Hayden, est si remarquable, on le sait, pour ses geysers, dépôts de travertin ou de silice, cascades et forêts pétrifiées, etc., que les Américains en ont fait un Parc national, de plus de 3 800 kilomètres carrés. On a pu y dresser le tableau suivant, qui donne une première idée du nombre des sources et de leur groupement. On doit noter que le point d'ébullition de cette région (2 000 à 2 500 m. d'altitude), est de 92 à 93°

GROUPES DE SOURCES	NOMBRE de sources.	TEMPÉRATURE	NATURE
Mammoth Hot Springs . .	78	17 à 74	Saline et calcaire (Na ² OSO ² :0,60:NaOCO ² :0,42 Résidu fixe 1,70 gr. + NaCl: 0,23: CaOSO ² : 0,23
Yellowstone Lake Springs.	47	53 à 91	Sulfurée et siliceuse.
Hayden's Valley —	128	87,8 à 91,7	—
Yellowstone Lake —	112	87,8 à 88,9	Siliceuse.
Pelican Creek —	11	71	—
Gibbon River —	121	32 à 91,7	—
Lower Geyser Basin . .	693	82 à 94	—
Upper Geyser —	440	88 à 93	Na ² OCO ² : 0,82: NaCl: 0,50 Résidu fixe 1,72 gr. + SiO ² : 0,24
Third Geyser —	20	85 à 88,9	Siliceuse.
Shoshone Geyser —	356	88,9 à 94	—
Heart Lake Geyser . . .	149	79,4 à 92	—
Lewis Lake and Snake river	40	44,4 à 78,9	—
	2 195		

Les dernières explorations ont même porté le nombre des sources à 4 000, dont cent geysers.

D'après l'étude géologique toute récente de MM. Arnold Hague, Paxson Iddings et Walter Harvey Weed, ces innombrables sources

HAYDEN (F.-V.). *Artesian Borings along the line of the Union Pacific Railroad in Wyoming* (pl.).

¹ 1872. HAYDEN. *Geol. surv. of the territories* (Reports for 1871, 1872, 1878). — 1883. PEARL. *The thermal springs of Yellowstone National Park*. (U. S. geol. Survey, 121 th ann. report, p. 63 à 454), avec bibliographie des sources thermales ou geysers des autres pays. — 1888. HAGUE (Trans. am. Inst. of mining engineers). — 1888. GOOCH et WHITFIELD. *Analyses of Waters of the Yellowstone National Park*. — 1896. U. S. GEOLOGICAL SURVEY. *Atlas du Yellowstone National Park*.

sont en relation tout à fait directe avec des rhyolithes, bien que la région présente des terrains de tout genre, depuis le granite et les couches primaires, jurassiques, crétacées ou tertiaires, jusqu'à la série complexe des roches éruptives récentes : andésites à pyroxène ou hornblende en coulées ou en brèches, coulées de trachyte rhyolithique, dykes d'andésites, rhyolithes en grandes coulées massives, basaltes, etc.

On a pu se rendre compte indirectement que les phénomènes hydrothermaux avaient commencé là avant le glaciaire ; car certains dépôts de travertins ont été recouverts par des blocs erratiques. L'abondance des dépôts et l'intensité du métamorphisme, exercé, sur plus de 300 mètres de hauteur, dans les rhyolithes du Yellowstone Cañon prouvent, d'ailleurs, combien ces phénomènes ont eu de puissance autrefois et combien leur action a été prolongée.

Les eaux chaudes appartiennent à trois types principaux : eaux carbonatées déposant des travertins calcaires ; eaux siliceuses à réaction acide ; eaux siliceuses, tenant la silice en dissolution, à la faveur du carbonate de soude.

Comme corps accessoires, il y a lieu de citer l'arsenic, qui entre, pour 0,02 à 0,25 p. 100 du résidu fixe, dans tous les geysers, et l'acide borique (0,01 gr. à 0,03).

Parmi les dépôts de travertins, on connaît les terrasses des sources chaudes du Mammoth, qui ont été popularisées par la photographie.

Les sources acides sortent toujours de fissures de la rhyolithe, qu'elles blanchissent et altèrent, en produisant des incrustations d'alun et souvent des cristaux de soufre.

Enfin les sources siliceuses alcalines sont, de beaucoup, les plus intéressantes et les plus nombreuses ; elles constituent les geysers et déposent des cônes de silice hydratée, ou geysérite, tels que ceux du Castle geyser.

Par exemple, l'Old Faithful (Vieux Fidèle), dans le « Upper geyser Basin », donne, toutes les 65 minutes, des jets de plus de 30 m. ; les Chrome Springs, dans Hayden's Valley, sont dans un état d'ébullition constant, etc.

On trouve, en moyenne, par litre d'eau : $\text{SiO}^2 = 0,25$ à $0,47$; $\text{Na Cl} = 0,25$ à $0,57$; $\text{CO}^2 = 0,01$ à $0,30$.

Au sud du Wyoming, nous abordons le Colorado¹ et le Nouveau-Mexique.

¹ Voir, sur les plateaux du Colorado et de l'Utah : SUSS, *loc. cit.*, I, 770, avec bibliographie dans les notes.

Le plateau du **Colorado**, qui forme un vaste champ d'affaissement faillé, est relativement pauvre en sources thermales. On y cite pourtant les eaux carbonatées de *Manitou Sp.* à la base du *Pike's Peak*. Les sources les plus chaudes sont celles de *Cañon Creek*, *Ouray Cr.* (sulfurées à 58°) et de *Tomichi* (Gunnison C.) à 71°.

Dans bien des régions du **Nouveau-Mexique**, les sources chaudes alcalines et les eaux salines arrivent à être plus abondantes que les sources ordinaires.

A l'ouest du Colorado, l'**Utah** est riche en sources thermales, surtout dans la région du grand lac Salé, où abondent les sources salines. Mentionnons celles de *Salt Lake City*, les *Utah hot springs*, à 16 km. au nord d'Ogden.

L'**Arizona**, au sud de l'Utah, contient, lui aussi, une si grande abondance de sources chaudes, salines ou carbonatées, qu'elles n'attirent même pas l'attention.

Dans une zone plus occidentale, nous avons l'**Oregon** et le **Nevada**, également bien fournis en sources chaudes, dont on a souvent reconnu la relation avec des failles. La plupart de ces sources sont salées, carbonatées ou sulfurées; quelques-unes contiennent de l'acide borique, comme les soffioni de Toscane. On connaît principalement les *Steamboat springs* (Nevada), séries de jets de vapeur, ainsi nommés à cause de leur bruit, qu'on entend au loin. Le dépôt de ces sources, épais de 5 à 6 m., est surtout formé de silice et d'oxyde de fer; mais on affirme, en outre, y avoir trouvé du cinabre, divers sulfures métalliques, et même de l'or natif.

Enfin, la **Californie** tient encore la tête sur tous ces états de l'ouest, pourtant déjà si riches en sources: ce que la constitution géologique du sol explique aisément.

Beaucoup de ses sources thermales sont carbonatées; quelques-unes boratées, telles que *Borax Flat springs*, *Borax Marsh spring*, *Borax patch springs*, dans le comté de San Bernardino, *Sulphur bank*, aux gîtes cinabrifères du même nom. En outre, on connaît un certain nombre de sources bouillantes, fumeuses, solfatares, etc., telles que les *Geysers springs*, du comté de Sonoma.

Nous donnons trois analyses comparées de *Sulphur bank* et de *Steamboat springs*, d'après G. Becker¹. Ces analyses sont exprimées en grammes par litre:

SOURCES THERMALES		RÉSIDU TOTAL.	CARBONATES alcalins.	CARBONATES terreux.	SULFATES alcalins.	SULFATES terreux.	CHLORURES	SILICE	AUTRES CORPS sur biborate de soude.
Sulphur bank, puits Herman	70°C	5,40	1,95	0,05	»	0,02	1,15	0,037	1,88
Sulphur bank, puits Parrot.	70°C	4,64	0,32	0,06	0,69		1,11	0,04	2,41
Steamboat springs	75°C	2,85	0,33	0,017	0,17	»	1,61	0,39	0,32

Près de la ville de *Stockton*, un puits, destiné à chercher les gaz combustibles, a rencontré, en 1893, une source à 30°, qu'on a captée dans une grande piscine, en opérant auparavant, sous une cloche, la séparation de l'eau et des gaz, ces derniers conduits à un gazomètre. On utilise ces hydrocarbures comme moyen d'éclairage ou même de chauffage par l'eau.

On sait, d'ailleurs, que la Californie produit une certaine quantité de pétrole, dont le gisement est dans le pliocène.

Au sud des Etats-Unis, le **Mexique**¹ qui est un pays volcanique par excellence, renferme un très grand nombre de sources thermales. Nous citerons, entre autres, celles de la vallée de *Tenochtitlan* (chloro-bicarbonatées), celles de *Chichimaquillo* (Guanajato) à 96°, les nombreuses sources de la ville minière de *Zacatecas* et d'*Aguas Calientes* au voisinage ; les eaux très fréquentées du *Peñon*, à 4 kilomètres de Mexico, qui sont bicarbonatées sodiques ; celles qui s'épanchent au pied du volcan éteint de *Jorullo* (sud-ouest de Mexico), ou du *Popocatepelt* (sud-est de la même ville).

Dans la partie désertique du nord du Mexique, autour des lagunes de *Tlahualila*, *del Muerto* et de *Parras*, où se trouvent d'abondants dépôts de salpêtre, carbonate de soude, etc., il existe de nombreuses sources thermales, abondamment chargées de substances chimiques.

Puis, nous pouvons abandonner un instant le continent américain pour parcourir la chaîne des **Antilles**, qui, on le sait, a souvent été décrite par les géologues comme formant, avec l'Amérique centrale, un tout indépendant, entre les deux Amériques du Nord et du Sud, considérées elles-mêmes comme deux continents distincts².

Les Antilles sont constituées par trois rangées d'îles, formant des arcs concentriques, dont M. Suess a bien montré le rôle tectonique tout à fait différent :

A l'intérieur et seulement dans l'est, un arc volcanique récent, Saba, Saint-Christophe, Redonda, Montserrat, la Basse-Terre de la Guadeloupe, la Martinique, Sainte-Lucie, Grenada ;

Au centre, ce que l'on a appelé la Cordillère des Antilles, com-

¹ DE HUMBOLDT. *Essai politique sur la Nouvelle-Espagne*. — 1893. QUEVEDO. *Les bains du Peñon, près de Mexico* (Nature, 4 novembre 1893). — Voir RECLUS. *Géog. univ.*, XVII, p. 48, une carte des volcans du Mexique.

² Voir SUSS, *loc. cit.*, I, p. 725, avec citations bibliographiques. — Cf. : BIET. *Voyage dans la France équinoxiale*. — 1826. ALIBERT. *Précis sur les eaux minérales*, p. 306.

prenant toutes les grandes Antilles (crétacé et tertiaire) : Cuba, Haïti, Porto-Rico, Anguilla, la Barbade, la Trinidad et, accessoirement, la Jamaïque ;

Enfin, à l'extérieur, un arc, formé de terrains tout à fait récents, au plus miocènes, les Bahama, le banc de la Nativité, l'îlot de Sombrero, la Barbade, etc., se raccordant peut-être à la Floride.

On a remarqué que la Cordillère des Antilles s'infléchissait, à partir de la Trinidad, dans le sens est-ouest, au nord du Venezuela et allait, par les chaînes de Bogota, rejoindre la Cordillère côtière de l'Amérique du Sud, enserrant ainsi d'un cercle complet cette sorte de Méditerranée américaine, qu'on appelle la mer des Caraïbes.

Elle est bordée par une longue zone pétrolifère, assimilable au flysch infracrétacé des Carpathes (Cuba, Haïti, la Barbade, la Trinidad).

Les sources thermales sont abondantes sur le flanc de cette Cordillère et surtout dans la traînée volcanique (située, comme dans les Apennins ou les Carpathes, sur son flanc interne) par laquelle nous commencerons :

A **Sainte-Lucie**, on cite les eaux bouillantes et fortement acidulées de la Soufrière.

A la **Martinique**, il existe plusieurs sources acidulées, dont la plus fréquentée est la *Fontaine chaude* (50°), dans les hauteurs du Fort Royal. Des sources salines se trouvent également sur la côte.

Un des cirques de la *Dominique* est rempli par un lac bouillant, que réchauffent les eaux souterraines.

A la **Guadeloupe**, les eaux thermales sont innombrables. On cite celles de la *Ravine Chaude* (64°), de *Dolé*, de *Bouillante*, de *Mont de Noix*.

Puis, dans la Cordillère des grandes Antilles :

A **Cuba**, du côté de la Havane, les eaux de *San Diego*, *Madruga* et *Guanabacoa* sont à très haute température¹.

A **Saint-Domingue**, plusieurs sources thermales sulfureuses se trouvent à *Tiburon*, *Dalmarie*, *Santiago de los Caballeros*.

A la **Jamaïque**, une source sulfureuse à haute température est à Saint-Thomas de l'Est.

L'**Amérique centrale**² offre, depuis le *Chiriqui*, au sud de Costarica, jusqu'au *Soconusco*, en territoire mexicain, une remarquable série de volcans, dont M. Suess a fait remarquer la position, comparable à celle des volcans de Sumatra ou de Java, sur des fissures transversales à l'axe éruptif général.

1817. D. MARCOS SANCHEZ RUBIO. *Discurso sobre los principios... de las aguas de San Diego...* (Habanâ).

² SUESS, *loc. cit.*, 113 à 123.

Ces volcans sont accompagnés, comme toujours, par de nombreuses sources thermales.

C'est, dans le **Guatemala**, le cas du *Quezaltenango*, « lieu des plumes vertes, » avec les sources d'*Almolonga* ; on cite également, un peu au N.-E., *Totonicapam*, dont le nom aztèque signifie « près des eaux chaudes ». Près de *Scapulas*, des eaux chlorurées sodiques et sulfatées magnésiennes, entre 40 et 70°, ont pu être utilisées industriellement pour la fabrication du sel, etc.

A l'est du Guatemala, sur la côte du **Salvador**, près d'*Auachapam*, se trouvent de remarquables salses (ausoles), avec volcans de boue et sources thermales. Les éruptions du lac volcanique d'*Ilopango*, ou d'*Apula*, sont également un phénomène célèbre.

Puis la traînée éruptive traverse le **Nicaragua** (*Momotombo*, etc.), avec son cortège ordinaire de sources chaudes.

Enfin, le *Miravalles* de **Costa-Rica** épanche, à sa base, les eaux thermales des *Hornillos*, ou « petites fournaises ».

Dans l'**Amérique du Sud**, il faut, naturellement, établir une démarcation très tranchée entre la région volcanique des Andes, criblée de sources thermales et la masse, au contraire, peu disloquée, peu riche en circulations souterraines, des Guyanes, du Brésil et du nord de l'Argentine.

Tout l'est et le centre de ce continent sont formés par le vaste plateau brésilien, aux sédiments paléozoïques horizontaux, constituant un Arrière-pays, à l'ouest duquel s'allongent, dans la direction nord-sud : d'abord de courtes chaînes archéennes ; puis des chaînes paléozoïques (Pérou, Bolivie, etc.) ; enfin la chaîne principale des Cordillères, avec sa traînée volcanique, au delà de laquelle, vers l'ouest, devrait, dans la théorie générale de M. Suess, exister un Avant-pays, qui est, en fait, représenté par l'Océan.

Cette Cordillère, dont le plissement doit dater de la fin du crétacé, paraît, comme nous l'avons vu précédemment, se recourber au nord, dans la direction de l'est, à travers le Venezuela, pour aller rejoindre la chaîne des Antilles. Il est à noter que la ligne de fracture éruptive ne l'accompagne pas dans cette inflexion et reste, au contraire, cantonnée dans le voisinage de la côte Pacifique. On a également observé que ces volcans sud-américains, au lieu d'être, comme ceux d'Europe, au pied de la chaîne, se trouvaient, pour la plupart, au voisinage de sa crête.

Dans la partie montagneuse du **Venezuela**¹, les sources thermales salines et

¹ Sur le Brésil, voir SUSS. *Loc. cit.*, I, 675 à 682 ; sur la Bolivie, p. 692 ; résumé sur l'Amérique du Sud, p. 717.

sulfatées sont nombreuses dans les monts de Cumana, le long du golfe de Cariaco, sur les bords du Tacarigua, dans la sierra de Mérida, etc.

De Humboldt a signalé, particulièrement : celles de *Irapa*, à l'extrémité nord-ouest de la Nouvelle-Andalousie; *Agua Calientes*, au sud du Rio-Azal; les eaux chaudes du golfe de *Cariaco*, qui jaillissent du fond de la mer; *Brigantín*, près de Nueva Barcelona (43°); *Onoto* (44°) et *Mariara* (64°), dans les vallées d'Aragua, à l'ouest de Caracas; *las Trincheras*, à 90°, sur le granite, entre Porto Cabello et Valencia, formant le Rio de Agua Calientes.

Les sources de *Mariara*, peu minéralisées et légèrement sulfurées, sont d'une remarquable abondance, ainsi que celles de *las Trincheras*.

Au nord du golfe de Cariaco, dans la péninsule d'Araya, on signale des jets d'eau sulfureux d'aspect géysérien, nommés *Azufra Grande* et *Azufra Chiquito*¹.

En **Colombie**, le versant ouest du volcan de *Ruiz* (5 300 m.) donne issue, près du sommet, à des sources chaudes, les *Termales*, chargées d'acides sulfurique et chlorhydrique.

Les sources thermales et solfatares du *Puracé* sont également fameuses. Boussingault a étudié un des ruisseaux alimentés par ces sources, le *Rio Vinagre* et a constaté qu'il emportait, par an, 15 000 tonnes d'acide sulfurique et 15.000 d'acide chlorhydrique.

Les environs de la ville de *Tocaima* sont connus pour leurs eaux thermales sulfureuses, dont la principale est l'*Agua de Dios*. On fréquente aussi les sources du *Rosario de Cucuta*.

Puis vient la région volcanique de l'**Ecuador**, avec le *Chimborazo*.

Au **Pérou**, nous citerons, d'après Ramondi, les eaux chlorurées sodiques de *Luco*, celles de *Salada de Chincey*, *Chancos*, *Baños de Candarave*, *Tangolaya*, *San-Fernando*, *Tinguiririca*, *Santa Clara*.

Dans les Andes du **Chili**, le volcan du *Nevado de Chillan* est entouré de sources thermales et, sur le versant argentin, on connaît également des sources chaudes autour de *Jachal*.

Enfin, dans le **Brésil**, dont nous avons signalé la pauvreté ordinaire en sources thermales, il existe pourtant, tout au moins, un beau groupe hydrothermal à mentionner, c'est celui de *Campanha* et *Caldas*, au nord-ouest de Rio-Janeiro². Au sud de *Campanha*, s'élève la *serra das Aguas-Virtuosas*, ou des eaux efficaces. Les sources les plus fréquentées de cette région sont celles de *Caxambu*, *Lambury*, *Contendas*, *Pogo de Caldas*, etc.

Les eaux de *Caxambu* sont gazeuses et alcalines, celles de *Caldas* sulfureuses.

1824. BOUSSINGAULT et MARIANO DE RIVERO. *Sur les eaux chaudes de la Cordillère de Venezuela*. (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. IX, p. 364.) — 1834. BOUSSINGAULT. *Considérations sur les eaux minérales des Cordillères*. (Ann. d. M., 3^e sér., t. V, p. 526.) — AGASSIZ (A.). *Hydrographic sketch of Lake Titicaca*, avec carte. — 1864. DÖERING (A.). *Estudios Hidrognosticos y perforaciones artesianas en la República Argentina*. — 1886. DARAPSKY (L.). *Estudio sobre las aguas termales del Puente del Inca* (Buenos-Ayres). — 1890. L. VINCENT (Bull. Soc. Com. de Bordeaux, 17 fév. 1890). — 1892. DOLLEGO-LIMA. *Reconhecimento geo-hidrologico de Chaves*, in-8°, Imp. nation. Lisboa.

² Voir, dans RECLUS, XIX, 367, une carte de ce district hydrothermal.

§ 4. — *Axe d'effondrement syrien et érythréen : Mer Morte-Kili-
mandjaro et Continent Africain.*

Nous avons déjà eu l'occasion de dire combien la grande masse du continent africain semblait être restée, depuis les temps primaires, immobile et étrangère aux plissements géologiques du sol, un peu comme elle a été, jusqu'à nos jours, par sa compacité même et son impénétrabilité, en dehors de l'histoire.

Les terrains secondaires ou tertiaires ne sont connus en Afrique que dans le nord et le nord-est, à l'est de l'effondrement érythréen, ou, sur la côte ouest, par exemple vers Loanda et leur limite semble suivre partout une ligne de dislocation éruptive, qui est particulièrement caractérisée de la mer Rouge au Zambèze¹, mais qui paraît également, du Nil à l'extrême Sud algérien, jalonnée par les formations volcaniques d'El Melha, de Tibesti et de Tassili.

Le grand plateau inébranlable, ainsi borné de tous côtés par des fractures d'effondrements, n'a pourtant pas échappé à des fissurations récentes, analogues à celles qui constituent ses frontières naturelles et c'est sur ces effondrements ou ces fissures seulement que nous aurons chance de trouver des sources thermales.

Un caractère remarquable de ces longues fractures africaines, c'est leur orientation méridienne : à l'est, c'est l'axe érythréen, avec l'effondrement parallèle du lac Albert et du Tanganyika ; à l'ouest, c'est l'axe atlantique ; au centre, c'est peut-être un axe hypothétique, qui prolongerait la ligne des volcans italiens par celui de Tekat en Tripolitaine, les coulées de basalte du Djebel Soda, le volcan central du Tarso, le bord du lac Tschad, Mendif, le Kameroun, Fernando-Po et Saint-Thomé, et auquel il ne serait pas invraisemblable de rattacher, plus au sud, la ligne côtière de l'Afrique entre Loanda et Cape Town (fig. 63, p. 381).

Entre ces lignes d'effondrement N.-S., la plus nette et la mieux dessinée par les cratères des volcans récents est, assurément, cet axe syrien et érythréen, qui, partant des volcans d'Arménie pour longer la mer Morte, puis les volcans d'Arabie, suit le plateau

¹ Voir une étude détaillée sur cette ligne de fracture dans SUESS, *loc. cit.*, 1, 536, avec notes annexes par H. SCHIRMER. Elle paraît avoir déjà formé un rivage jurassique.

éruptif de l'Abyssinie, passe au Kénia et au Kilimandjaro et aboutit au lac Manyara.

Arrivé là, on en perd la trace, au milieu d'un pays de granite et de gneiss presque inconnu et la tentation naturelle a été de la rattacher à l'effondrement du lac Njassa, qui doit faire plutôt partie d'un autre système plus occidental. Il ne serait pas impossible, comme nous le montre notre carte (fig. 63), qu'il y eût, au contraire, une inflexion vers l'est dans le sens des Comores, de Madagascar de la Réunion, de Maurice et de l'île Saint-Paul.

Quoi qu'il en soit, un second effondrement parallèle, tout aussi bien marqué, relie, plus à l'ouest, les lacs Albert, Albert-Edouard, Tanganyika et enfin une dernière fracture, qui se rattache peut-être à la précédente, suit le lac Njassa vers l'embouchure du Chiré et du Zambèse; après quoi, elle peut aller former l'escarpement, qui limite à l'est le Transvaal, du côté du Mozambique.

Sans insister davantage, nous allons parcourir ce système d'effondrements linéaires du nord au sud, en laissant de côté l'Arménie, que nous nous trouvons avoir déjà décrite.

Entre les horsts anciennement plissés du Liban et de l'Anti-Liban, que longent eux-mêmes, à l'est, les volcans du *Dj.-Haouran* et du *Sufa*, les sources thermales ne sont pas rares.

Le *Fossé syrien* commence, vers la hauteur de Chypre et d'Antaki, passe dans la plaine de Homs à Baalbeck, suit le Jourdain vers la mer Morte et aboutit dans la mer Rouge, au golfe d'Akabah, à l'est du Sinaï¹.

Entre les diverses sources de la Palestine, nous nous contenterons de signaler : celles de l'ancien *Emmaüs* (*Hamman Souleïman, H. Ibrahim*) au voisinage du lac de Tibériade, qui sont très fréquentées; les eaux chaudes carbonatées et sulfureuses de *Callirhoé*, près de la mer Morte et celles de *Zara*, entre deux coulées de basalte.

Les sources de Callirhoé, à 70°, déposent des travertins, qui englobent, paraît-il, des troncs de palmiers pétrifiés.

En Arabie Pétrée, les sources chaudes sont également nombreuses. Les plus fameuses sont les *fontaines de Moïse* (Ain Mousa) à 20 km. de Suez, sources à 29°, qui sourdent d'une série de petites buttes argileuses, bâties par les infusoires et consolidées par leurs dépôts calcaires : buttes atteignant 30 m. de haut.

1886. DIENER (C.). *Die Structur des Jordanquellgebietes*. — LARTET (B. S. G., 2^e sér., t. XXIII, p. 719). — Voir également SUSS, *Loc. cit.*, I, 473. — On sait que, d'après les études de LARTET, la mer Morte représente une faille récente, dont la lèvre ouest est affaissée. A l'est, il existe des coulées basaltiques.

Egalement sur le rivage du golfe de Suez, jaillissent les sources thermales sulfureuses de *Pharaon* et de *Tor* (73°)¹

Vers l'est, en **Arabie**, bien qu'il n'existe plus un seul cratère actif, les volcans éteints sont remarquablement nombreux (Dj. Chamchan près d'Aden, Dj. Kharaz, îlot de Périm, etc.). Dans la zone désertique de Dahna, qui occupe tout le sud-est de l'Arabie, l'abîme de *Bahr-el-Saï* est au voisinage de sources de pétrole. Enfin, sur la côte d'Oman, au bord du golfe Persique, vers Mascate, etc., de nombreuses sources chaudes, carbonatées ou sulfureuses, sortent de roches volcaniques.

En franchissant la mer Rouge, nous trouvons la région éruptive récente de l'**Abyssinie**². où les sources thermales sont aussi abondantes que les restes d'activité volcanique.

Là encore, nous ne pourrions que choisir quelques exemples entre bien d'autres.

Dans le nord, le massif volcanique d'*Hamasen* présente diverses sources thermales, notamment celles d'*Aïlet* (59°), entre Asmara et la mer Rouge.

Sur la côte, au sud de la baie d'Adulis, le système volcanique de la péninsule de *Bouri*, auquel se rattache le volcan encore actif d'Ortoalé, donne naissance à de nombreux jets de vapeur sulfureuse, ainsi qu'à des milliers de filets d'eau à 67°, qui jaillissent au milieu des écueils de la grève.

Vers le centre de l'Éthiopie, à l'est du lac *Tana*, une source thermale est l'origine du puissant Takkazé.

D'autres sources thermales très abondantes (37 à 42°) jaillissent un peu plus loin vers l'est, près du château d'*Arenge*, le Versailles des négous.

Mais c'est surtout dans le sud, au milieu des terrains volcaniques du *Choa*, qu'elles deviennent innombrables. Il existe, notamment, près de la montagne d'Entotto, dans le pays des Galla Finfini, trois sources jaillissantes à l'ébullition.

Plus au sud, dans cette région mal connue, qui s'étend au sud du pays des rivières, on connaît, sur la rive ouest du lac *M'Woutan*, au sud de *Mahaghi*, plusieurs sources sulfureuses³.

Sulfureuses également sont, dit-on, la plupart des sources thermales, rencontrées dans le bassin du Haut Nil, par exemple dans le pays du *Rouanda*⁴, habité par des nains, à l'ouest du lac Nyanza.

À l'est du même lac, s'étend le pays volcanique du *Kilimandjaro*, avec de nombreuses sources chaudes⁵.

Le *Tanganyika*, qui présente géologiquement tant d'analogies avec la mer

¹ 1861. STEUDNER (Mittheil. von Petermann, XI). — 1868. HOLLAND (Journ. of the geogr. Soc.).

² Les éruptions d'Abyssinie ont pu commencer dès le début de l'éocène, comme les épanchements du Dekkan dans l'Inde (SUSS, I, 469). Le jurassique moyen et supérieur existe dans tout le sud de l'Abyssinie.

³ 1879. EMIN-BEY (Petermanns Mittheilungen, n° v).

⁴ 1895. G. VON GÖTZEN. *Durch Afrika von Ost nach West* (in-8°, Berlin, p. 197 et suiv.).

L'axe éruptif passe visiblement à l'est de cette dépression si continue des lacs Albert, Tanganyika et Njassa.

Morte, offre, sur sa rive méridionale, plusieurs sources chaudes ; il paraît également que des jets de vapeur, au milieu de l'eau, donnent parfois des débris de bitume.

Au sud des grands lacs, les cartes géologiques indiquent, sur le cours du Zambèze, quelques pointements éruptifs, qui jalonnent peut-être quelque dislocation est-ouest, encore indéterminée. On connaît là, près de *Mpalera*, dans le pays des Barotsé, d'abondantes sources thermales ¹.

Nous avons dit que cette trainée éruptive africaine se prolongeait peut-être par les Comores, la côte orientale de Madagascar ² et les Mascareignes (Maurice et la Réunion). Là également, les sources chaudes sont très nombreuses, notamment dans la région volcanique de la côte orientale de Madagascar, où elles sont parfois accompagnées de mofettes d'acide carbonique et au pied du

Grand Brûlé de la Réunion, ou dans le cirque d'érosion de la partie occidentale (sources de *Cilaos*, du *cirque de Salazie* et du *cirque de Mafate*).

Au sud de l'Afrique, les couches anciennes ont été tranchées, le long des côtes, par des dislocations récentes, sur lesquelles sourdent quelques eaux thermales. On cite notamment la fontaine, dite Hottentot Holland, à une trentaine de kilomètres de *Cape-Town* et celle des environs de *Worcester*, dans la même région.

Sur la côte ouest d'Afrique, dans la colonie portugaise d'Angola, entre le Kunene et le Congo), on retrouve, parallèlement au rivage, l'indice de dislocations récentes, avec quelques suintements de pétroles (vallée du *Dandé*).

Nous avons signalé, dans le centre de l'Afrique, l'existence possible d'une ligne éruptive importante semblant, relier le Vésuve, l'Etna et Pantellaria, par les volcans de la Tripolitaine, au Kameroun, à Fernando-Po et à San-Thomé ³.

Au sud-ouest de Tripoli, dominant vers le nord les collines d'El-Djefarah, se dresse la montagne du *Djebel Ghourian* avec les cratères du *Manterous* et du *Tekout*.

Vers le sud, le *Haroudj noir*, prolongé à l'ouest par le *Djebel es Soda*, forme également, suivant Duveyrier, une chaîne éruptive récente.

Puis vient, en plein Sahara, la haute chaîne N.-O.-S.-E. de *Tou* ou du *Tibesti* (plus de 2 500 m.), avec des volcans, des dépôts de natron et des sources thermales, citées par Nachtigal.

L'une de celles-ci, dite *Yériké*, ou la Fontaine, est célèbre dans tout le Sahara oriental ; elle dégage de nombreux jets de vapeur, avec des bruits d'explosion et est entourée par des dépôts de soufre.

1881. BRADSHAW (Proc. of the R. Geog. Soc.).

GRANDIDIER. *Travaux divers sur Madagascar*. — Résumé dans SUSS, I, 328.

Voir, pour la région du Sahara, la carte géologique dressée par G. ROLLAND et SUSS, *loc. cit.*, I, 458.

Il faut remarquer, à propos de cette ligne très hypothétique, tracée à travers des pays presque inconnus, qu'une dislocation transversale N.-O.-S.-E., parallèle à des directions de roches anciennes, paraît également, comme nous l'avons vu plus haut, réunir les roches volcaniques de Tassili, de Tibesti et d'El Melba.

Entre cette ligne et celle que nous venons d'étudier, nous n'avons à signaler, comme pouvant se rattacher aux eaux minérales, que le lac de natron des environs du Caire.

Sur le prolongement de la même chaîne, mais plus à l'ouest, sur le méridien de Constantine, le haut plateau de *Tassili* est également volcanique.

§ 5. — *Axe éruptif Atlantique.*

On a remarqué, depuis longtemps, que l'Atlantique semblait former un axe de symétrie pour l'ensemble de la terre. Dans cette grande dépression marine, les courbes de profondeur accusent surtout des directions grossièrement N.-S., comme les bords extrêmes du bassin et, notamment, un axe médian surélevé, bien net, qui va de l'Islande aux Açores, à l'Ascension et à Tristan da Cunha. Le long de ce relèvement, qu'on peut prolonger au nord vers la terre de Jean Mayen, au sud vers les îles Sandwich, il existe une série de manifestations éruptives, qui, chacune dans le détail (Açores, Canaries, Cap Vert¹ etc.), accusent cette forme en arc de cercle et cette disposition transversale à l'axe général de fracture, si caractéristiques de tous les phénomènes éruptifs. Quelques-unes de ces îles volcaniques, telles que l'Islande ou les Açores, sont remarquablement riches en sources thermales.

C'est probablement à ce système de dislocations atlantiques qu'il convient de rattacher l'existence, assez imprévue au premier abord, de sources chaudes, parfois jaillissantes, au Groenland : telles que celles d'*Ounartok* dans le Groenland méridional² : ou les jets d'eau intermittents, que Nordenskiöld a vus, en 1870, s'élaner à de grandes hauteurs par les fissures de la glace ; ou encore les sources thermales, parfois signalées dans l'Archipel polaire.

La description des geysers d'Islande se trouve dans tous les ouvrages de géologie.

Les roches basaltiques de l'île Fernando de Noronha, sur la côte du Brésil, marquent, sans doute, la limite ouest de cet effondrement, comme les Hébrides sa limite est. — Sur l'ancien continent effondré de l'Atlantide, voir SCSS, *loc. cit.*, I, 371.

Voir, sur la structure géologique du Groenland : SCSS, *loc. cit.*, II, 89. Au Groenland, comme au Spitzberg, le grès rouge repose en discordance sur des terrains plus anciens plissés. Les terrains mésozoïques et tertiaires sont également horizontaux et les mouvements récents se sont traduits par des dislocations, non par des plissements.

D'anciens récits des frères Zeni (in *Reclus*, t. XV, p. 100) parlent de sources thermales très abondantes, qui, en se déversant dans la mer, auraient formé un port libre. On a supposé qu'il avait pu exister, entre le Groenland et l'Islande, des îles volcaniques, aujourd'hui disparues. On remarquera, à ce propos, combien, malgré l'enveloppe de glace qui doit les masquer si souvent, les traces de manifestations éruptives récentes sont fréquentes dans les régions polaires ; ce qui concorde bien avec l'allure, à peu près méridienne, de tant de dislocations terrestres.

Le *grand geyser*, au sud de l'île, présente, dans l'intervalle des jaillissements, la forme d'un bassin circulaire, où l'eau bouillante s'élève peu à peu et finit par s'écouler par les échancrures de ses bords. La température est de 100° à la surface, de 104° à 10 m. de profondeur, de 124° à 20 m.

Le jaillissement principal se produit toutes les vingt-quatre ou trente heures et monte à une trentaine de mètres ; toutes les deux heures, il se produit, en outre, une petite colonne de 6 à 7 m.

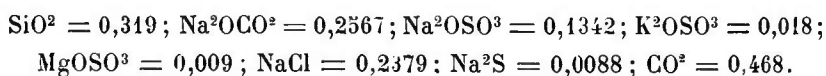
Le *Strochur*, ou nouveau geyser, est à quelques mètres du premier.

Dans le nord de l'île, la source d'Uxahver, à 101°, forme trois jets, dont l'un s'élève à 4 m.

Enfin, la source intermittente et jaillissante de *Reykoll* est à l'est de l'île.

Toutes ces sources, qui dépassent la température de l'ébullition, ont une minéralisation, où dominant le carbonate et le chlorure de sodium.

Au grand geyser d'Islande, M. Damour a trouvé un résidu fixe de 1 225 milligrammes par litre, soit :



Aux Açores², dans l'île de San-Miguel, le *val das Furnas*, ou « des Fournaies » est percé d'innombrables ouvertures, d'où s'élancent, avec fracas, des jets d'eau et de vapeur, plus ou moins volumineux, dont la température atteint 98°.

Aux Canaries, le volcan du pic de Teyde (Ténérife) produit des jets de vapeur à 86°, mêlés à l'acide carbonique et à l'acide sulfureux³.

1847. A. DAMOUR. *Analyse de quelques eaux thermales silicifères de l'Islande*. (B. S. G. F., 2^e sér., t. IV, p. 542.) — 1851. BICKELL. *Analyse de quelques eaux minérales de l'Islande*. (Ann. d. M., 4^e sér., t. XIX, p. 254.)

1873. FOUQUÉ. *Voyages géologiques aux Açores* (Rev. des Deux Mondes).

Citons, dans l'ouest de l'Afrique, une source abondante de bitume, à l'est de la lagune d'*Assini*.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES GÉNÉRAUX RELATIFS
AUX SOURCES THERMALES ET A L'HYDROLOGIE SOUTERRAINE

I. — Historique.

(Ouvrages antérieurs au XIX^e siècle.)

1538. LAURENT FRIESEN. *Tractat von den Eigenschaften und Wirkungen aller Wildbäder, so in Deutschland gelegen* (in-4^o, Strasburg).
- MIGUEL SAVONAROLA. *Tratado general sobre las aguas minerales*.
1542. REMACLE FUCHS. *Historia omnium aquarum* (Paris).
1546. GEORG. AGRICOLA. *De natura aquarum quæ effluunt e terra* (in-fol., Bâle). — *de medicatis fontibus*.
1552. VIOTTI. *Traité des bains naturels*.
1554. *De Balneis omnia, quæ existant apud Graecos, Latinos et Arabes. tum medicos, etc., in unum volumen redacta, in quo aquarum et thermarum omnium, quæ in toto orbe terrarum sunt, metallorum, item et reliquorum mineralium natura, vires atque usus explicantur, ad Franc. Cantarenum* (in folio, Venise).
1560. GEORG. PICTORIUS. *Badebüchlein, oder von Mineralbädern* (in-8^o, Mulhouse).
1560. JOS. JAC. HEGGELIUS. *Badebüchlein, oder Bericht von allerhand mineralischen Bädern Deutschlands* (in-8^o, Mulhouse).
1562. PARACELSE. *Badebüchlein, oder sechs fastliche Trachtütchen von Wasserbädern*, publié par Adam von Bodenstein (in-4^o, Mulhouse).
1563. WILL. TÜRNER. *A book of the bathes in England, Germany and Italy* (Colin, 1563, in-folio).
- 1564-1584-1613. MARTIN RULAND. 1. *Badebüchlein*. — 2. *Schropfbüchlein*. — 3. *Aderlassbüchlein* (Bâle, in-8^o).
1565. JOHANN GUINThER VON ANDERNACH. *Commentarius de balneis et aquis medicatis, in tres dialogos distinctus* (Argentorat., apud Richelium, in-8^o).
1568. MARTIN RULAND. *Hydriatice, sive aquarum medicarum* (Dillingae, apud Mayer, in-8^o).
1571. BACCI (A.). *De thermis* (Venise).
- 1571-1599. GALLUS ESCHENREUTER. *Beschreibung aller heilsamen Bäder, Sauerbrunnen und anderer Wässer, so in Teutschland bekannt* (in-8^o, Strasbourg); éditions augmentées 1609, 1616).
1571. GALLUS ESCHENREUTER. *De natura et viribus et affectibus balnearum* (in-8^o, Argent.).
1572. LEONHARD THURNEIZER ZUM THURM. *Zehn Bücher von kalten, warmen, minerischen und metallischen Wassern, sammt deren Vergleichung mit den Plantis oder Erdgewächsen* (in-folio, Francfort. Revu et corrigé par Job. Rud. Salzmann, Strasbourg, 1612).
1576. PARACELSE. *Schreiben von den warmen oder wildbädern* (in-8^o, Bâle).
1576. JOHANN GOEBELIUS. *Diographe thermalium aquarum, etc., cui accessit appendix thermarum Germaniæ* (Lipsie, 1576).
- 1579-1613. MARTIN RULAND. *Balnearium restauratum et distinctum in libros III* (in-8^o, Bâle).
1589. PARACELSE. *Œuvres complètes*, publiées par J. Huser (in-folio, Francfort).
1617. KRETSCHMAR. *Tabellarische Übersicht der Mineralwässer Deutschlands, nach ihren wirksamen Bestandtheilen klassificirt* (in-8^o, Dessau).
1624. GASPAR HERRERA. *Sobre la virtud de los baños de Hermes* (Espagne).
1634. TOMAS FERRER DE ESPARZA. *Tratado de... los baños de Teruel* (Espagne).
1657. AUGUSTIN HAUPTMANN. *Uralter Wolkensteinischer warmer Bad und Wasserschatz, etc.*, (in-8^o, Leipzig).
1665. ATHANAS KIRCHER. *Mundus subterraneus*, in LXII divisus (in-fol., Amsterdam).
1669. JOH. MATH. FABRI. *Epistola de hydrographia medica Germaniæ* (in Ephemer. natur. curios., dec. III, ann. 3).

1670. AUG. DE BOIS. *Von Ursprung, grossen Unterschied, Wirkung und heilsamen Nutz der Wasserflüsse und Brunnen, insonderheit aber des egerischen Schleder Süerlings.* (Eger.)
- DON CALMET. *Traité historique des eaux et bains de Plombières, de Bourbonne, de Luxeuil et de Bains.*
1670. DUCLOS et BOURDELIN. *Observations particulières des sels et des terres des Eaux minérales, qui ont été examinées en l'Académie royale des sciences, ès-années 1670-1671.* Mémoires, t. IV.
1688. BLONDEL (FR.). *Thermæ Aquisgranensis et Porcetanzæ, earum salubres usus.* (En allemand.) *Gebr. zu Aachen, bei J.-H. Clémens, pet. in-4°.*
1697. D. ALF. LIMON MONTERO. *Espejo cristalino de las aguas minerales de España.*
1699. MARTINEZ ANDUEZA. *Los baños de Arnedillo.*
1699. J. LAROUVIÈRE. *Nouveau système des Eaux minérales de Forges, où l'on découvre quelle est la nature de ces eaux; avec plusieurs observations de personnes qui ont été guéries par leur usage, Paris, in-12.*
1729. GROSSE. *Bibliotheca hydrographica, avec bibliographie, in-4°, 52 p., Nürnberg.*
1740. FRIEDRICH HOFFMANN. *Opera omnia physico-medica* (in-fol., Genève).
1746. GOTTW. SCHUSTER. *Hydrologia mineralis* (Schemnitz, in-8°).
1751. JOH. GOTTL. WALARIUS. *Hydrologie* (trad. du Suédois, Berlin, in-8°).
1758. FRIED. CARTHEUSER. *Rudimenta hydrologiæ systematicæ.*
1761. VANDELLIUS. *Tractatus de thermis Agri Patavini, in-4°, Patavii, avec bibliographie.*
1764. D. PEDRO GOMEZ DE BEDOYA. *Historia universal de las fuentes minerales de España.*
1766. JOH. SPRINGER. *Physikalische, praktische und dogmatische Abhandlung von deutschen Gesundbrunnen, Göttingen (in-8°).*
1767. C. LUKAS. *Versuch von den Wässern* (in-8°, Altenburg).
1772. FRANC. DIETL. *De austriaci imperii aquis medicatis* (Vienne, in-8°).
1776. G. FRIEDR. LÜCKERT. *Syst. Beschr. aller Gesundbrunnen und Bäder Teutschlands* (Berlin, in-4°).
1778. DEBREST. *Traité des eaux minérales de Chateldon, de celles de Vichy et Haute-Rive en Bourbonnais, avec le détail de leurs propriétés médicinales et leur analyse.* Moulins, in-12°.
1779. J.-W. BAUMER. *Fundamenta geographiæ hydrographiæ subterrancæ* (Giessæ, in-8°).
1783. CARRÈRE. *Catalogue raisonné de tous les ouvrages sur les eaux minérales* (in-4°, VIII, 584 p., à Paris, chez Cailleau).
1789. J.-G. KÜHN. *Systematische Beschreibung der Gesundbrunnen und Bäder Deutschlands* (in-8°, Breslau et Hirschberg).
1789. C.-A. HOFMANN. *Erw. Tabelle über etliche 40 Mineralwasser und Gesundbrunnen, nach ihren Bestandtheilen* (Weimar).
1792. FR. CHR. SCHEIDEMANTEL. *Anl. zum vernünfft. Gebr. aller Gesundbr. und Bäder Deutschlands* (in-8°, Gotha).
1793. K.-A. ZWIRLEIN. *Allgemeine Brunnenschrift..., nebst kurzer Beschr. der berühmtesten Bäder Deutschlands* (in-8°, Weissenberg et Leipzig).
1793. D. JUAN DE DIOS AYUDA. *Examen de las aguas medicinales que hay en las Andalucias.*
1794. K.-A. HOFFMANN. *Taschenbuch... aller Gesundbrunnen Deutschlands* (in-8°, Weimar).
1881. CHABOUILLET. *Sur les inscriptions et antiquités provenant de Bourbonne-les-Bains.* (Revue archéol., janv., fév., mars 1880 et mai 1881).

B. — Ouvrages généraux du XIX^e siècle.

1813. POUMIER. *Analyse et propriétés médicales des eaux minérales et thermales.*
1813. HOFFMANN. *Systematische Uebersicht und Darstellung der Resultate von 212 chemischen Untersuchungen mineralischen Wasser* (avec bibliographie des ouvrages sur les eaux thermales), in-8°, Berlin.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE DES SOURCES THERMALES 415

1820. *Die wichtigsten Bäder Europas*, in-8°, Berlin.
1821. E. OSAN. *Darstellung der bekannten Heilquellen Europas* (in-8°, Berlin).
1824. BISCHOF. *Des eaux minérales de l'Allemagne et de la France*. (Ann. d. M., 1^{re} sér., t. XII, p. 276.)
1824. LONGCHAMP. *Chaleur des eaux thermales naturelles*. (Ann. d. M., 4^e sér., t. IX, p. 365.)
1826. ALIBERT. *Précis historique sur les eaux minérales les plus usitées en médecine*. (1 vol. in-8° de 636 p. Paris, Bachel.) (Voir p. 504 à 601, sur les eaux minérales exotiques.)
1826. BISCHOF. *Eaux minérales de France et d'Allemagne*. (Ann. d. mines, 1^{re} sér., t. XII, p. 276.)
1826. BERTHIER. *Dépôts des sources minérales*. (Ann. d. mines, 1^{re} sér., t. XIII, p. 495.)
1826. BERTHIER. *Dépôts ferrugineux des eaux minérales*. (Ann. d. mines, 1^{re} sér., t. XIII, p. 356.)
1830. PATISSIER. *Manuel des Eaux minérales*.
1831. BOUÉ. *Sur les alluvions et les sources minérales*. (B. S. G. F., 1^{re} sér., t. I, p. 94.)
1832. J. ANGLADA. *Mémoire pour servir à l'histoire générale des eaux thermales et minérales sulfureuses*. (Ann. d. M., 3^e sér., t. II, p. 406.)
1834. VON HOFF. *Geschichte der durch Ueberlieferung nachgewiesenen natürlichen Veränderungen der Erdoberfläche*, 3^e partie, in-8°, Gotha).
1835. LONGCHAMP. *Mémoire sur les eaux minérales*. (Ann. d. M., 3^e sér., t. VII, p. 504.)
1837. BOURDON. *Les Eaux minérales*.
1837. MÉRAT (F.-V.). *Rapport sur les eaux minérales de France (1834-36)*. Paris.
1840. CHENU. *Essai pratique sur l'action thérapeutique des eaux minérales, suivi d'un précis analytique des sources minérothermales connues* (in-8°, Paris, Fortin, Masson).
1841. *Statistique des eaux minérales françaises* (ministère des travaux publics).
1841. FONTAN. *Composition des eaux minérales d'Allemagne, Belgique, Suisse, Savoie*. (Recueil des savants étrangers, C. R.)
1841. AUBERGIER. *Eaux minérales sulfureuses*. (Ann. d. M., 3^e sér., t. XIX, p. 496.)
1842. DIETRICH. *Bibliotheca hydratica*, in-8°, 53 p. Leipzig, Baumgärtner.
1844. DUPASQUIER. *Théorie sur la formation des eaux minérales*. (B. S. G. F., 2^e sér., t. I, p. 805).
1844. *Description physique des sources minérales connues en France* (ministère des travaux publics).
1849. DACBRÉE. *De l'existence et de l'origine des eaux souterraines, qui se meuvent souvent à une faible profondeur*. (B. S. G. F., 2^e sér., t. VI, p. 473.)
- Vers 1850. LENSCH. *Mineralquellen Lehre und Hydrochemie*.
1851. *Annuaire des eaux de la France pour 1851-1854*, publié officiellement sur d'initiative de Dumas.
1852. IZARIÉ. *Aperçu sur le eaux chaudes*.
1852. ALIBERT (C.). *Des eaux minérales* (Paris).
1853. FONTAN. *Recherches sur les eaux minérales des Pyrénées, de l'Allemagne, de la Belgique, de la Suisse et de la Savoie*. (J.-B. Baillière, 1 vol. de p. 510 p.)
1854. F. DELANOÛE. *Des sources sulfurées*. (B. S. G. F., 2^e sér., t. XI, p. 369.)
1856. E. BENOIT GONOD. *Etudes sur les plantes qui croissent autour des sources minérales*, in-8°, 5 fol., Paris, Thunot.
1857. Dr GLOVER. *On mineral waters*
1858. ROTUREAU. *Des principales eaux minérales de l'Europe*.
1859. ROUBAUD. *Les eaux minérales de la France*, in-8° Jésus, VIII, 364 p., Paris, Librairie nouvelle.
1860. DURAND-FARDEL, LE BRET, LEFORT et FRANÇOIS. *Dictionnaire des eaux minérales*. (2 vol. in-8°, chez J.-B. Baillière.) — (Tous les articles relatifs au captage et à l'aménagement sont de François.) En tête de l'ouvrage est un Index géographique développé des sources thermales du monde entier.
1861. *Les eaux minérales dans leurs rapports avec la science de l'ingénieur*.

1862. *Eaux minérales françaises à l'Expos. de Londres.*
1862. GIO GARELLI. *Notizie intorno ai principali Stabilimenti termali militari d'Europa* (Torino, tip. subalpina).
1862. SEEGEN. — *Heilquellenlehre.*
1862. DAUBRÉE. *Mémoire sur les eaux minérales pour l'Exposition de Londres.*
1867. BÜCHTING. *Bibliotheca balneologica et hydrotherapeutica* (in-8°, 106 p., Nordhausen).
1868. J. ITIER. *Du rôle qu'ont joué les eaux minérales dans les fonctions géologiques postérieures aux dépôts des derniers terrains tertiaires.* (B. S. G. F., 2° sér., t. XXV, p. 277.)
1872. BARRAULT (E.). *Parallèle des eaux minérales de France et d'Allemagne* (Paris).
1873. BRAUN. *Bulnéothérapie.*
- 1875-76. A. DAUBRÉE. *Exemples de formation contemporaine de la pyrite de fer dans des sources thermales.* (B. S. G. F., 3° sér., t. IV, p. 53.)
1883. PEALE. *Some geyser Comparisons.* (États-Unis, Cambridge Sc., t. II, p. 101.)
1884. A. INOSTRAUZEFF. *Sur la variabilité de la concentration et de la composition des sources minérales.* (C. R., t. XCVIII, n° 7-13, p. 452.)
1884. BALDWIN-LATHAM. *On the Influence of Barometric Pressure on the Discharge of Water from Springs.* (British Association for the advancement of science. Report of the fifty third Meeting, p. 493.)
1885. *Analyses de diverses eaux min. françaises.* (Ann. d. M., 8°, t. VII, p. 79.)
1886. JACQUOT et WILLM. *Revision de l'annuaire des eaux minérales de la France,* in-8°, 28 p. Paris, Imp. nationale.
1888. POSEPNY. *Über die Bewegungs Richtung des unterirdisch circulirenden Flüssigkeiten.* (Congrès géol. internat. Berlin, 1888, p. 71.)
1888. A. DAUBRÉE. *Les eaux souterraines aux époques anciennes.* (1 vol. in-8°, Paris, Dunod.)
1888. A. DAUBRÉE. *Les eaux souterraines à l'époque actuelle.* (2 vol. in-8°. Paris, Dunod.)
1889. MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. *Statistique des eaux minérales françaises.*
1889. *Catalogue des ouvrages sur l'hydrologie médicale, les Eaux minérales, etc.* (Bibliothèque nationale, Sciences médicales, t. III.)
1889. HARLEY (G.). *What is a Geyser?*
1891. GOLDBERG (A.). *Ueber Entstehung der Mineralquellen, insbesondere über die dabei Stattfindenden chemischen Prozesse.* (Zeitschr. z. praktische Geol., p. 92.)
1892. SCHWEITZER. *Mineralwaters of Missouri,* avec bibl. gén. des eaux minér. depuis le XVI^e siècle (geol. suiv. of Missouri, t. III.)
1893. ANDREA (A.). *Intermittirende Springquellen ohne Dampf oder Gasgeysire.* 1 pl. (N. Jahrb. 1893, p. 19-23.)
1893. MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. *Statistique détaillée des sources minérales exploitées ou autorisées en France et en Algérie au 1^{er} juillet 1892,* in-4°, x-97 p. et carte en couleurs.
1894. JACQUOT et WILLM. *Les eaux minérales de la France,* 1 vol. in-8°, 602 p. et carte. (Baudry.)
1894. CARNOT (Ad.). *Analyses des eaux minérales françaises, exécutées au bureau d'essai de l'École des Mines.* (Ann. d. Mines, 9^e série, t. VI, p. 355-457.)
1894. HAAS (H.-J.). *Quellenkunde. Lehre von der Bildung und Vorkommen der Quellen und des Grundwassers.* Leipzig, J.-J. Weber, in-8°, viii-220 p., avec 45 fig.
1895. TUCKERMANN. *Index to the mineral waters of the World* (New-York).
1896. LABAT (Dr). *L'acide carbonique et les carbonates alcalins dans les eaux minérales.* (Rapport présenté au Congrès d'hydrologie de Clermont-Ferrand. In-8°, 10 p., Clermont, 1896.)
1896. DE MARGERIE. *Catalogue des bibl. géologiques.* (Paris, Gauthier-Villars.)
- Voir, en outre, diverses publications périodiques, telles que le *Bulletin de la Société d'hydrologie, la Gazette des Eaux minérales, le Bulletin de la Société belge d'hydrologie, etc.*
- Les recueils suivants donnent périodiquement des renseignements bibliogra-

phiques : *Annales des Mines. Bulletin de la Société géologique française, Annuaire géologique, Bibliografia geologica* (Bruxelles), *Petermann's Mittheilungen, Rassegna delle scienze geologiche in Italia.*

La liste précédente comprend, en 1729, 1785, 1815, 1842, 1867, 1889, 1896, une série de bibliographies hydrothermales.

C. — Hydrologie. Sources et nappes artésiennes.

1834. WETHERELL (N.-T.). *Observations on a Well dug on the South Side of Hampstead Heath.*
1837. WEST (W.). *On the Varieties of Water.*
1843. REY. *Le puits artésien de Grenelle.* Paris.
1843. SAGEY (G.). *Sur le Jaugeage des puits artésiens.*
1847. CUNNINGHAM. *Geological Formation of Liverpool as respects Water Supply.*
1848. BALDWIN (G.-R.). *Report on supplying the City of Quebec with pure water.* (Boston), pl.
1849. SWINDELL (J.-G.). *Treatise on Well-digging.*
1851. Abbé JACQUET. *Origine des sources.*
1851. RANGER (W.). *On the various Sources of Water-supply.* Southampton.
1851. CH. SAINTE-CLAIRE-DEVILLE. *Sur la nature des eaux de France.* (B. S. G. F., 2^e série, IX, 42.)
1852. ANSTEA (D.). *On the Water Contents of Chalk.*
1854. DELANŒUF. *Des eaux ordinaires.*
1855. BARLOW (P.-W.). *On the Water bearing Strata of the London Basin.*
1855. PRESWICH. *On the Boring at Kentish Town.*
1857. WARD (F.-O.). *L'Eau des grandes villes.* (Bruxelles, 8 vol.)
1858. DE VIC. *Hydroscopie. Sources minérales, thermales et intermittentes. Indication de fontaines, puits, sources d'irrigations, puits artésiens,* in-fol., 3 col., 4 p. Paris, Maulde et Renou.
1859. PARAMELLE. *Art de découvrir les sources,* in-8°, XXIV, 428 p. Paris, Dunod.
1861. ACHESON (F.). *On the Collection and Storage of Water in Victoria.*
1861. DELESSE. *Recherches sur l'eau dans l'intérieur de la terre.* (B. S. G. F., 2^e série, XIX, 64.)
1862. HULL (E.). *On the New Red Sandstone and Permian Formations, as sources of Water supply for Towns.*
1863. DEWALQUE. *Sur un puits artésien à Ostende.* (B. S. G. F., 2^e série, XX, 235.)
1864. LUDWIG (H.). *Die natürlichen Wasser... Les eaux naturelles dans leurs rapports chimiques avec l'air et avec les roches.* 1 vol. in-8°.
1864. VILLE. *Notice sur les sondages exécutés pendant les années 1859 à 1862 dans le territoire militaire de la province d'Alger,* suivie d'études géologiques.
1866. HEMANS ET HASSARD. *On the future Water Supply of London.*
1869. BEGGS. *Water supply of London.* Quarterly review.)
1869. BELGRAND (E.). *Histoire générale de Paris. La Seine. Le bassin parisien aux âges antéhistoriques.* (In-fol., 2 vol. Paris, Imprimerie nationale.)
1871. BOUÉ (A.). *Ueber die unterirdischen grossen Wasserläufe,* etc.
1871. VILMOS (Z.). *Tupasztalain az Artezi szökőkutak furasa körül.* Pest.
1872. BELGRAND (E.). *La Seine. Etudes hydrologiques; Régime de la pluie, des sources, des eaux courantes; Applications à l'agriculture.* (In-8°, Paris, Dunod.)
1872. PRESTWICH (J.). *Address: Our Springs and Water-supply.*
1873. RINAHAN (G.-H.). *Water basin of Lough Derg, Ireland.*
1873. PEYTON (J.). *The Boring at Netherfield.*
1874. *Bericht der Commission ueber die Wasserabnahme in den Quellen und Strömen* Wien.
1874. GÉRARDIN (A.). *Allération, corruption et assainissement des rivières.*
1874. ERTBORN (O. van). *Sondages de la province d'Anvers.*
1874. MACADAM (S.). *On Water supply.*
1874. VOLKMER (O.). *Das Wasser des Artillerie-Arsenals zu Wien.*
1875. BELGRAND. *Les Eaux* (in-8°, 237 p.).

1875. BELGRAND (E.). *Les travaux souterrains de Paris*, 1^{re} partie, Introduction : *Les aqueducs romains*. 1^{re} section : *Les anciennes eaux*; 2^e section : *Les eaux nouvelles*. (In-8°, 3 vol., avec 3 atlas in-folio : Paris, Dunod).
1876. HULL (E.). *Scheme of water supply for the central and eastern contries*.
1876. PRESTWICH. *On the Mineral Water discovered in sinking the Artesian Well at St. Clement's, Oxford*.
1877. BELGRAND. *Les anciennes eaux* (in-8°, 775 p.).
1877. SCHMIDT. *Hydrologische Untersuchungen* Ar. d. Sc. de St-Petersbourg, t. XXIV, p. 177-419).
1878. PRESTWICH (J.). *On the Section of Meux's Artesian Well in Tottenham Court Road*.
1879. HAUGHTON (S.). *Annual Water Discharge of large Rivers*.
1880. ABBOTT (T.-K.). *On Wells in Liverpool plains*. (Sydney, carte).
1880. PARFITT (E.). *On Well-boring in Exeter*.
1881. BLAKE (F.-H.). *On the Conservancy of Rivers, Prevention of Floods, Drainage and Water Supply*. (Hertford.)
1881. BOECKH (J.). *Geologische und Wasserverhältnisse der Umgebung der Stadt Fünfkirchen* (Budapest.)
1881. CRUDELI (C.). *L'Antica Fognatura delle Colline Romane*.
1881. MEDLICOTT (H.-B.). *Artesian Borings in India*
1881. RANCE. *The water Supply...* (Le régime des eaux de l'Angleterre), in-8°, 610 p.
1881. DELESSE. *Les eaux de la Savoie* (Ann. d. M., 7^e, XIX, 161).
1881. DRU. *Mission Roudaire* (Hydrologie), Paris.
1881. BELGRAND. *La Seine, études hydrologiques*.
1882. READE. *Rivers*, in-8°.
1882. SERRES (H.). *Matériaux pour servir à l'étude des eaux de l'Adour à Dax*, in-8°.
1883. SERRES. *Some geological Conditions affecting the question of Water supply from the Chalk*.
1883. SERRES. *Water supply from wells*.
- 1883-84. E. DELVAUX. *Les puits artésiens de la Flandre*. (Ann. de la Soc. géol. de Belgique, t. XI, p. 5 et 119, Liège.)
1884. RANCE (C.-E.). *Reports on the Circulation of underground Waters*, in-8°.
1884. RANCE. *On the Palaeozoic and Secondary Rocks of England as a Source of Water Supply for Towns and Districts*, in-8°.
1884. RANCE. *Possible Increase of Underground Water Supply*, in-8°.
1884. READE (T.-M.). *Circulation of Water in Sandstone*, in-8°.
1884. WHITAKER (W.). *On the area of Chalk, as a source of Watersupply*.
1884. *Ninth Report on the circulation of the Unterground Waters in the permeable formations of England and the quality and quantity of the Waters supplied to various towns and Districts from these formations*. (British Association for the advancement of Science. — Report of the fifty third meeting, p. 499.)
1885. CHAMBERLIN (T.-C.). *The Requisite and qualifying condilions of Artesian Wells*; illustre, Washington.
1885. FIRKET. *Nappes d'eau souterraines de la vallée de la Meuse et aux environs* (Liège, in-8°, 20 p.).
1885. STANFORD (W.). *Excursion to the Hury Reservoir*.
1885. WHITAKER. *Some Hertfordshire Well-sections*.
1886. BLAS (C.). *Contributions à l'étude et à l'analyse des eaux alimentaires et spécialement des eaux de Louvain et de quelques autres localités de la Belgique*. (Bruxelles.)
1886. VAN DIEST. *Note on the artesian wells of Denver*. (Colorado scientific Society Proceedings, vol. II, p. 50.)
1886. WHITAKER. *Some Surrey Wells and their Teachings*.
1886. WHITAKER (W.). *On some Borings in Kent*.
1886. WHITAKER. *Some Essex Well-sections*.
1886. WOODWARD (H.-B.). *Account of a Well-sinking at Swindon*.
1887. HAYWARD (R.-B.). *On Water in the Chalk beneath the London Clay*.
1887. RANCE (C. E.). *On the Enson Moor Boring*.

1887. WARINGTON (R.). *Contribution to the Study of Well Waters*, in-8°, pl.
1887. MARCHAND (E.). *Des eaux potables en général et, en particulier, des eaux utilisées dans l'arrondissement du Harre et d'Yvetot*. Paris (carte).
1887. ENGLEBERT. *Les sources naturelles*.
1887. WHITAKER (W.). *Further Borings in Kent*.
1888. LEMRKE. *Du mouvement des eaux souterraines* (Cuyper, t. III, p. 285.)
1888. OLDHAM (R.-D.). *On the Law that governs the Action of Flowing Streams*.
1888. ORMEROD (G.). *Deep Borings at Teignmouth*.
1888. DELVAUX. *Les puits artésiens de la Flandre*, in-8°, 2½ p.
1888. VAN DEN BROECK ET RUTOT. *Galeries d'eau alimentaires de Liège*
1888. J. GOSSELET. *Leçons sur les nappes aquifères du Nord de la France*. (Soc. géol. du nord. Ann. XXIV, 5^e livrais.)
1888. LEUREUX. *Nappe artésienne de Valognes*. (Soc. binnéenne de Normandie, 4^e série, 2^e vol.)
1888. HUET. *Sur le puits artésien de la Chapelle à Paris*. (C. R., t. CVI, p. 150.)
1888. VAN HOEGAERDEN (P.). *Distribution d'Eau. Dérivation des sources de Modave*. Bruxelles.
1889. WHITAKER. *Hampshire wellsections*.
- 1890 RUTOT (A.) et VAN DEN BROECK (E.). *Eaux artésiennes de Belgique* (Bull. Soc. belge de géologie, IV. Mémoires, p. 170-220.)
1890. FORDHAM (H.). *Water-level in a Well at Odsey Grange* (2 pl.)
- 1890-91. LUEGER. *Die Wasserversorgung der Städte* (in-8°, Darmstadt) : avec bibliographie des ouvrages relatifs à l'hydrologie).
- 1890-91. L. DE LAUNAY et MARTEL. *Note sur quelques questions relatives à la géologie des grottes et des eaux souterraines*. (B. S. G. F., 3^e sér., t. XIX, p. XXII et 142.)
1891. HOPKINSON (J.). *Water and Water-supply* (carte).
- JAEGER (G.). *Ueber die Ruhe und Bewegung des Wassers auf der Oberfläche der Erde*.
1895. HOLMES. *Notes on the underground supplies of potable water in the South atlantic Piedmont plateau* (Trans. of the am. inst. of min. eng).
1896. NELS. HOR. DARTON. *Artesian Well prospects in the Atlantic coastal plain region* (Bul. of the U. S. geol. Surv. n° 138).
1897. ED. IMREUX. *Les eaux potables de Meurthe-et-Moselle* (1 vol. et atlas, Nancy).
1898. G. DARIÈS. *Calcul des conduites d'eau* (br. Dunod).
1898. A. DUMONT. *Le canal d'irrigation du Rhône et les eaux de Nîmes, de Paris et de Londres* (Dunod, 1 vol. in-4°).
1898. DE MANDOUX. *Les eaux d'alimentation de la ville de Toulouse* (in-8°).

LIVRE SECOND

CAPTAGE

DES EAUX THERMO-MINÉRALES

GÉNÉRALITÉS

AVANTAGES ET DANGERS DU CAPTAGE COMPARAISON AVEC L'EXPLOITATION D'UN GÎTE MÉTALLIFÈRE

La mise en valeur des eaux thermo-minérales, qui est la conclusion pratique de l'exposé théorique, fait dans le premier livre de cet ouvrage, comprend : 1° leur recherche ; 2° leur captage proprement dit ; 3° leur aménagement extérieur, en vue d'une utilisation immédiate ou éloignée (pompage, embouteillage, transport, refroidissement, réchauffement, etc.). Nous nous occuperons surtout du captage, qui est la partie la plus délicate du travail et celle où l'on a le plus besoin de recourir à la science du géologue et de l'ingénieur.

Capter une source thermale, c'est, par définition, employer les dispositifs propres à lui assurer un maximum de débit, de température et de minéralisation, ou, tout au moins, à porter à leur maximum, dans la mesure compatible avec les circonstances, celles de ces qualités qui se trouveront, suivant les besoins du service médical, présenter une importance prépondérante.

Ces dispositifs, pour lesquels chaque ingénieur essaie de se créer une pratique personnelle, n'ont fait, jusqu'ici, à notre connaissance, l'objet d'aucun travail d'ensemble¹. C'est, sans

¹ Nous ne pouvons, cependant, passer sous silence les mémoires de M. François dont nous dirons bientôt toute l'importance, celui de M. Dru sur le Caucase, qui nous a été d'un précieux secours, et enfin l'intéressant article inséré par M. Laurans,

doute, en partie, pour ce motif qu'il règne, au sujet du captage des eaux thermales, comme en tout ce qui touche ce sujet des eaux, où le goût du merveilleux s'est donné libre carrière, tant d'idées fausses et d'appréhensions irraisonnées.

En général, dans toute ville, où se trouve une source thermale, les habitants, qui vivent de l'exploitation de leurs eaux, éprouvent une profonde terreur à l'idée qu'on puisse entamer un terrain, d'où ces eaux précieuses sortent depuis tant de siècles, et, cette idée préconçue se trouvant encore fortifiée par les difficultés réelles de l'opération, qui demande beaucoup de tact et d'expérience, le moindre accident momentané leur paraissant aussitôt irréparable, ils en arrivent à empêcher les perfectionnements les plus simples et les mieux conçus. Tous les ingénieurs des mines, qui ont eu à s'occuper de travaux de sources, en savent quelque chose et nous pourrions citer tel cas assez récent, où, à la suite d'un coup de mine, qui avait un instant ouvert une brèche, d'où s'échappaient les eaux thermales, mais qu'une poignée de ciment suffit à aveugler, les habitants exaspérés ne parlaient de rien moins que de noyer l'ingénieur dans le puits. Nous nous contenterons de rappeler le cas plus ancien de Bagnères-de-Luchon, où les craintes de la municipalité empêchèrent, en 1835, M. François d'abaisser, comme il le désirait, de 2 m. de plus le niveau de captage : ce qui aurait incontestablement augmenté le débit.

Il en résulte, pour l'ingénieur qui veut tenter un captage rationnel, des difficultés, qui, bien que n'étant pas d'ordre technique, n'en sont pas moins réelles et souvent capitales, et nous serions heureux si, en dissipant certains préjugés, en faisant mieux connaître certains principes, nous contribuions à les amoindrir.

Ce que nous voudrions bien mettre en relief, c'est que le captage d'une source thermale est, comme le défilage d'un filon métallifère, auquel il ressemble fort, un travail qui ne dépend pas seulement de certaines habitudes empiriques, mais qu'on peut conduire rationnellement, en vertu de règles générales et bien déterminées.

Nous n'entendons, d'ailleurs, nullement par là qu'il faille, dans

ingénieur en chef des mines, au Congrès d'hydrologie de Clermont en 1897, article dont l'auteur a bien voulu nous autoriser à reproduire ici plusieurs figures.

Pour la captation des eaux douces, qui, dans bien des cas, n'est pas différente, de celle des eaux thermales, on est beaucoup plus favorisé et il nous suffira de signaler l'ouvrage de M. BECHMAX. *Salubrité urbaine, distributions d'eau, assainissement* (Baudry, 1888). — Voir, également, du même auteur : *Cours d'hydraulique agricole et urbaine*, à l'école des ponts et chaussées, 1895 (autographié).

cette occasion plus que dans toute autre question industrielle, agir avec un esprit absolu, sans tenir compte des circonstances locales et nous citerons, au contraire, de suite, quelques cas, où l'on a avantage à ne pas atteindre, pour le débit de l'eau thermale, le maximum théorique de notre définition, sans même parler de celui que chacun peut prévoir, où les chances de bénéfices supplémentaires ne compensent pas les dépenses assurées et les risques, si légers soient-ils, qu'un travail fait toujours courir à une source.

C'est ainsi qu'on peut, comme nous l'avons vu, accroître considérablement le débit d'une source, en plaçant une pompe au-dessus du griffon ; cependant, on sera, dans diverses circonstances, empêché de le faire, non seulement par une raison d'économie, mais aussi par la crainte d'attirer des eaux froides, ou, quand il s'agit d'eaux gazeuses, par l'inconvénient de troubler l'homogénéité du mélange d'eau et de gaz.

De même, le captage rationnel d'une source semblerait devoir conduire, en principe, toutes les fois qu'on le peut, à atteindre, dans la profondeur du sol, sous les éboulis, détritiques, etc., la roche en place¹. Néanmoins, il est quelquefois préférable, en pratique, de s'arrêter auparavant, même quand aucune difficulté technique n'empêche de creuser davantage.

Telle est, en particulier, la solution à adopter pour certaines eaux, dérivant des eaux sulfureuses, qui subissent, dans les éboulis, à travers lesquels elles circulent avant d'atteindre leur émergence naturelle, des altérations capables de les modifier profondément et parfois avantageusement. Utiles ou non, ces altérations constituent, depuis un temps immémorial, une source thermale de propriétés connues, dont on a pu expérimenter longtemps les effets, de telle sorte que le service médical demande toujours à ce qu'on change le moins possible l'état de choses existant : ce qui arriverait certainement par un captage plus parfait sur la roche en place. L'emploi des eaux altérées ou dégénérées est bien connu dans toutes les stations sulfureuses, aussi bien au Caucase que dans les Pyrénées, et l'on a évidemment tout intérêt à ne pas empêcher la nature de produire, sur ces sources, les modifications qui leur donnent leurs propriétés spéciales.

¹ Plus une eau fait un parcours prolongé dans les terrains superficiels, plus elle a chance de s'altérer ; il y a donc, en principe et sauf dans les cas exceptionnels, que nous citerons plus loin, avantage à aller la chercher dans la fracture même, qui la ramène de la profondeur.

Il peut même arriver que le mélange avec des eaux superficielles refroidissantes présente certains avantages¹.

D'une façon générale, il est bon, d'ailleurs, de ne pas pousser à l'extrême la comparaison que nous faisons, tout à l'heure, entre un filon hydrothermal et un filon métallifère. Il ne s'agit pas ici d'aller chercher l'eau thermale sous la forme se rapprochant le plus de celle qu'elle apporte des profondeurs du sol, mais sous la forme où elle est médicalement utilisable et nous sommes plutôt dans des conditions comparables à celles d'un mineur, travaillant sur un minerai tel que le diamant, l'oxyde d'étain, etc., qui, par transport à la surface, par altération météorique de sa gangue, peut se concentrer spontanément peu à peu, jusqu'à une certaine distance de son point de départ : personne n'ira, par principe, travailler sur le filon initial, s'il trouve, avant de l'atteindre, des alluvions déjà tout naturellement enrichies.

Enfin, quel que soit le travail à exécuter sur une source, ce n'est pas un vain préjugé de croire qu'il faut y procéder avec une extrême prudence et un esprit très conservateur : d'où cette conclusion qu'on a, dans bien des cas, avantage à se contenter des résultats acquis, si le progrès espéré n'est pas considérable, en vertu de ce proverbe commode que « le mieux est l'ennemi du bien ». Une station thermale, qui ne peut utiliser qu'une quantité d'eau réglée par ses débouchés commerciaux, n'a, sauf le cas spécial des eaux à embouteiller, aucun intérêt à accroître démesurément le débit de ses sources, au delà de ses besoins, tandis qu'elle risque, par une tentative maladroite, de compromettre le présent. Il est peu de travaux plus délicats que ceux où il s'agit d'atteindre ou d'attirer à soi les eaux souterraines et, précisément parce que, comme nous le verrons, on peut, avec des mesures appropriées, diriger, vers un point prévu, l'afflux d'eau thermale, il est évident qu'une mesure maladroite expose, au contraire, à l'envoyer se perdre au loin ou, tout au moins, chez des voisins. Pour ne citer qu'un exemple de captages mal conçus et, par suite, pernicieux, on voit souvent des propriétaires de sources créer, sans le vouloir, sur leur griffon, une charge hydrostatique, au moyen d'une retenue d'eau, d'un barrage, d'un réservoir

¹ Tel paraît être le cas à Geleznovodsk (Caucase), où les eaux chaudes, sortant de la roche en place, rencontrent des eaux froides, qui les modifient et les altèrent utilement. Cette considération, non moins que la difficulté qu'on aurait eu à se garer dans les travaux contre l'invasion de ces eaux froides, ont empêché, dans ce cas, d'aller capter très profondément.

voir, d'un tuyau élévatoire¹ : ce qui est exactement le moyen le faire refluer la source vers un autre point d'émergence, surtout si la source sort d'un terrain un peu perméable.

Ces remarques faites, la définition du captage, que nous avons donnée plus haut, se résume en deux termes d'inégale importance :

1° *Empêcher l'eau thermale et ses gaz de se perdre, autrement dit en recueillir la plus grande quantité possible ;*

2° *Éviter les infiltrations d'eaux superficielles, l'action refroidissante et oxydante de l'air, ou toute autre circonstance de nature à altérer le produit qu'on veut recueillir : en un mot, isoler la source.*

Ces deux points se ramènent, en général, aux deux suivants : 1° dégager l'émergence ; 2° l'envelopper d'une colonne de captage en bois, ciment, maçonnerie, béton, terre cuite, métal, etc.

A ce point de vue du captage, c'est-à-dire de l'exploitation, nous retrouvons, suivant une remarque précédente, entre les eaux thermales et un gîte minéral ou métallifère quelconque, un rapprochement essentiel, qui s'explique, du reste, aisément, puisque ces derniers gîtes ont été, en grande partie, déposés par les eaux.

Aux deux grandes catégories de gîtes, les filons et les sédiments, correspondent deux catégories d'eaux thermales, distinguées dès le début de cet ouvrage : les eaux filoniennes, en circulation descendante dans des cassures verticales, et les nappes, réparties souvent sous pression suivant des strates horizontales, qu'elles imprègnent. Pour exploiter une eau minérale, nous serons donc naturellement conduits à employer des méthodes analogues à celles qui servent pour les gîtes métallifères : c'est-à-dire que, pour les filons aqueux, nous commencerons par atteindre la fracture, suivant ses particularités locales, soit par une simple tranchée à ciel ouvert, soit au moyen d'un travers-bancs horizontal, soit par un puits vertical ; après quoi nous mènerons, au besoin, une ou plusieurs galeries d'allongement ; et, pour les nappes, quand elles ne viendront pas affleurer au jour, nous descendrons jusqu'à elles par des sondages ou des puits, à partir desquels il nous arrivera d'établir, dans la nappe aquifère, un véritable traçage de galeries.

¹ A Châtelguyon, on a longtemps capté des eaux très gazeuses, en appliquant, par un attache, sur le griffon, une cloche entourée de béton et munie d'un tube de dégagement, conduisant à un niveau supérieur. Il est évident qu'on mettait ainsi une charge sur la source. De même, à Evaux, pour avoir de l'eau à un niveau propre au service des douches, on a coiffé certains griffons d'une cheminée de maçonnerie ou d'un tube de fonte, au haut desquels on n'a plus nécessairement qu'un débit tout fait réduit, etc.

Cependant, il va de soi que la similitude ne se poursuit pas jusqu'au bout; il y a, entre une eau minérale et un gîte métallifère, pour l'exploitation, la même différence qui peut exister, pour une opération chirurgicale, entre un corps vivant et un cadavre, c'est-à-dire que l'eau possède, à la fois, les avantages et les inconvénients de la vie, qui, tous les deux, résident essentiellement ici dans sa mobilité. Une source est à un filon ce qu'une rivière est à une route.

Les avantages consistent en ce que l'eau n'est pas une substance inerte, qu'il faut nécessairement aller chercher au point déterminé où elle git, mais, au contraire, qu'on peut, par des artifices spéciaux, en tenant compte des lois de son mouvement, la faire venir à soi, l'aspirer, la drainer. Les procédés, par lesquels on peut amener l'eau à se concentrer en un point, — qu'ils soient simples comme un sondage, un drain, une pompe, etc., ou complexes, comme la méthode, dont nous reparlerons, des pression hydrostatiques réciproques, — se ramènent tous à un même principe : déterminer, en ce point, une moindre pression, un minimum de charge hydrostatique.

Les inconvénients tiennent à ce que, par sa mobilité même, l'eau peut, si, involontairement et par maladresse, on se trouve l'attirer en sens contraire de ce qu'on voudrait (par exemple, par une fuite ouverte dans un coup de mine malencontreux), être perdue pour l'exploitation.

Des gênes d'un autre genre consistent dans la difficulté ou l'impossibilité, qu'éprouve l'homme, à travailler dans l'eau chaude, et même dans les gaz qu'elle dégage : ce qui nécessite des épaissements coûteux. Les gaz, notamment, joueront, dans les sources thermales, un double rôle important ; car il faudra, d'une part, se garantir contre eux dans les travaux et, de l'autre, ne pas les laisser se perdre dans le captage, etc.

De ce que nous venons de dire résulte une première grande division à établir dans les procédés de captage des eaux : ou bien, ce qui sera l'objet du chapitre premier, on peut traiter l'eau comme une substance minérale, (sauf certaines précautions spéciales, bien entendu), aller la chercher dans son gisement, en résumé, atteindre son griffon ; ou bien (chap. II) l'on se sert de la mobilité spéciale de l'eau pour l'attirer à soi, en diminuant, de ce côté, la pression, c'est-à-dire la résistance.

Un cas, jusqu'à un certain point intermédiaire, est celui des

sondages donnant des eaux artésiennes, puisque, là, on commence par aller au devant de l'eau, qui, ensuite, se trouve aspirée dans la colonne de moindre pression, résultant du sondage. Nous en ferons l'objet d'un chapitre spécial (chap. III).

L'indécision, qui se présente dans ce cas particulier, pourra, d'ailleurs, exister dans bien d'autres; il est évident que la démarcation précédente, commode pour une description raisonnée de très nombreux captages de sources, est loin d'être absolue et que l'on aura souvent à appliquer, à la fois, un mélange des deux méthodes.

D'une façon générale, nous ajouterons seulement que le procédé de captage à adopter pour les sources dépend essentiellement de leur mode d'arrivée à la surface, de la disposition orographique et de la nature du terrain autour du griffon. Il importe donc, avant de choisir un système, d'étudier, avec l'attention la plus minutieuse, ces trois éléments. C'est par ce moyen seulement qu'on pourra enrichir des sources connues, ou même en découvrir de nouvelles, en se guidant d'après ces premiers suintements superficiels, qui sont, presque toujours, pour l'ingénieur, le point de départ initial et nécessaire des recherches hydrothermales.

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE ET RECHERCHE DES EAUX THERMO-MINÉRALES

§ 1. — *Exploration géologique du terrain. Détermination du mode d'émergence et du régime des eaux thermales, ainsi que de l'allure des eaux froides superficielles. Choix d'un niveau de captage.*

Dans la première partie de cet ouvrage, nous avons envisagé, d'une façon générale et théorique, la façon dont les eaux thermales arrivent au jour ; nous avons vu qu'elles pouvaient le faire, soit par un réseau de diaclases, soit par un pli brusque des terrains, soit par une faille ou par un filon, et nous avons, à ces divers modes d'émergence naturelle, joint le cas des nappes interstratifiées dans le sol, que l'on va atteindre par des sondages.

Ce que nous avons étudié ainsi en théorie, il faut que, dans chaque cas particulier, l'ingénieur, chargé du captage d'une source ou de l'exploration d'une région hydro-thermale en vue de la découverte de sources nouvelles, l'examine et le détermine en pratique : c'est-à-dire qu'il ne considère pas la source thermale comme un phénomène extraordinaire et mystérieux, d'origine inconnaissable, mais qu'il vise à se rendre compte géologiquement des chenaux souterrains, par lesquels l'eau chaude arrive à ses griffons naturels et même, s'il est possible, qu'il se fasse une idée approximative du bassin d'infiltration, par où ces eaux ont commencé par s'introduire dans le sol.

Cette première partie du travail, qu'on est très souvent porté à traiter sommairement et négligemment, présente une importance capitale. En cette matière, comme en toute œuvre humaine, l'expérience montre, en effet, que, moins on se presse au début, plus on établit avec solidité ses fondations ou ses projets, plus on marche vite et sûrement dans la suite.

Pour arriver à bien connaître sa source thermique, une exploration géologique détaillée de la région, qui avoisine la source, est, tout d'abord, nécessaire. Cette exploration fera, le plus souvent, reconnaître la nature de l'accident, diaclyse, faille ou fracture, qui amène les eaux, (que nous supposons d'abord filoniennes), sa direction et son inclinaison. Une semblable reconnaissance des affleurements du filon et de l'intersection de celui-ci avec la surface topographique du pays permettra, également, de déterminer le point le plus bas, où, rationnellement, devrait être dirigée l'attaque, pour recueillir l'eau sous un minimum de charge et, par suite, avec un maximum de débit.

Ce point le plus bas de l'intersection du filon avec la surface est, en principe, celui où se trouvera placée l'émergence naturelle. Cependant, il pourra arriver que la source vienne apparaître plus haut ; il est alors capital d'examiner les choses de près et de se rendre compte de la nature de l'obstacle, qui a arrêté les eaux dans leur cheminement logique ; car, souvent, cet obstacle sera facile à faire disparaître et, suivant que l'on aura ou non intérêt à déplacer la source, il faudra le franchir ou, au contraire, se garder, avec grand soin, d'y toucher.

De même, au-dessous du point le plus bas de l'intersection naturelle, on pourra reconnaître la possibilité, par un court travers-bancs, d'accéder au filon. Cette constatation sera encore essentielle ; car, il faudra, de ce côté, suivant les conditions de la propriété du sol, soit porter ses propres efforts, soit se protéger (au besoin, par l'intervention administrative) contre une tentative des voisins.

En résumé, la détermination géologique du mode d'émergence de la source est indispensable pour permettre, tant de la capter rationnellement, avec son maximum de température et de débit, que de la protéger contre un de ces vols légaux, si habituels en pareille matière.

Cette détermination géologique exigera, on le conçoit, avant tout, la reconnaissance des accidents stratigraphiques de la région, tels que plissements, failles, systèmes de filons, etc., et l'on ne devra pas craindre de la prolonger jusqu'à une certaine distance (au moins 10 à 15 km. de rayon) ; car une fracture, notamment, étant loin d'être rectiligne, sa direction moyenne ne peut se déterminer avec exactitude en un point isolé, mais exige des recoupes transversales, suffisamment espacées les unes des autres.

Dans cette exploration, l'analyse chimique des roches et des terrains sera parfois d'un précieux secours, pour reconnaître, par

comparaison avec celle de l'eau, où celle-ci a dû puiser ses éléments et, par suite, en tirer un indice sur la direction, dans laquelle elle a cheminé sous terre.

Mais, bien souvent, l'exploration de la surface ne suffira pas : soit que cette surface soit formée d'un terrain meuble de peu d'épaisseur, alluvions, éboulis, etc., à travers lequel l'eau se disperse au sortir de son véritable griffon ; soit que cette eau thermale soit emmagasinée en profondeur sous forme de nappes artésiennes. Dans ces divers cas, il faudra recourir à une série de sondages méthodiquement groupés, ou, tout au moins, utiliser les sondages et puits faits, pour une raison quelconque, dans la région considérée et se rendre compte, en particulier, par les variations de débit, de niveau ou de pression, de l'influence réciproque de ces sondages les uns sur les autres.

Je suppose, par exemple, le cas d'une nappe artésienne. Ce terme de nappe, qui est généralement usité, a le tort de laisser supposer un niveau d'eau absolument continu, sans interruption et partout de même épaisseur, qu'il suffit d'aller chercher, à une profondeur déterminée, en un point quelconque. En réalité, cette nappe est plutôt assimilable à une ou plusieurs larges rivières souterraines, coupées d'îles : d'où l'inégal succès de sondages, parfois très voisins et l'on peut, surtout quand la nappe est à faible profondeur, se proposer de déterminer les zones riches, soit que l'on veuille exploiter simplement par des sondages plus rapprochés, placés sur cette zone, soit que l'on se propose d'aller ensuite capter la nappe par un travail à plus grandes dimensions, galeries ou tranchées.

Nous prendrons, pour fixer les idées, le cas d'Essentouky (Caucase), où une exploration semblable a été faite méthodiquement par M. Léon Dru, ingénieur, dont nous aurons, à diverses reprises, à citer les travaux ¹

A Essentouky, ² des eaux alcalines arrivent par une fracture N. 20°E., au milieu de marnes éocènes, d'environ 80 m. d'épaisseur, recouvertes par des alluvions et circulant sous ces alluvions, que leurs dépôts calcaires ont, à la base, cimentées en un banc de poudingues.

Les suintements naturels se produisent à l'intersection d'un ravin.

¹ *Rapport sur les eaux minérales du Caucase*, 1884, chez Chamerot, p. 72. — Voir, p. 479 fig. 85 et p. 551, fig. 118, des exemples de sondages semblables à Geleznovodsk et à St-Yorre.

² Voir plus haut, p. 377.



La fracture thermale étant masquée par le poudingue et par les alluvions, son existence n'a pu être constatée qu'à la suite de sondages, conduits de manière à déterminer un périmètre englobant toutes les sources alcalines¹. En analysant, au fur et à mesure, l'eau des sondages, on a pu reconnaître, dans ce périmètre, une ligne d'alcalinité maxima et de dégagements gazeux plus abondants, qui correspondait à la fracture hydro-thermale et c'est alors au voisinage de cette ligne qu'on a placé les travaux subséquents.

Dans une recherche de ce genre, il aurait pu arriver que le périmètre ne se fermât pas, la nappe souterraine étant assimilable à un véritable cours d'eau, venant de plus ou moins loin. Dans ce cas, le profil longitudinal de la nappe, déterminé par les profondeurs où elle est recoupée dans les sondages, montrerait le côté amont, où il faudrait, à priori, chercher l'origine des eaux.

Quand on fait un sondage semblable, il arrive souvent qu'on traverse, avant d'arriver à la véritable nappe thermale, d'autres niveaux d'eau, parfois minéralisés partiellement par des infiltrations. Il faut alors étudier successivement ces diverses eaux, en les isolant l'une de l'autre au moyen de tubages et les analysant au fur et à mesure de leur rencontre².

On peut encore parfois, par des sondages superficiels, reconnaître la position et l'allure d'un filon thermal plus ou moins incliné.

C'est ainsi qu'à Châtelguyon M. Caméré a eu l'idée de faire forer, à la barre à mine, une série de trous de sonde, sur chacun desquels on plaça un tuyau en plomb, bien calfaté à son pied et suffisamment haut pour prévenir tout écoulement à sa partie supérieure.

D'une part, au moyen des trous de sonde, on pouvait se rendre compte de la profondeur à laquelle était la fissure thermale et,

¹ Dans un cas comparable, à Pougues, où les eaux doivent émerger d'une fracture profonde pour suivre les fissures d'un calcaire, M. Friedel a reconnu, par l'analyse, un appauvrissement en alcalis, quand on s'éloigne de la position présumée de cette fracture, qui n'apparaît pas au jour. (Voir plus haut, p. 184 et 269.)

² Pour éviter un tubage proprement dit, on peut, tout au moins, pendant la prise d'essai, obstruer les nappes adventives, en descendant dans le trou de sonde un ballon en caoutchouc épais, protégé extérieurement par une forte enveloppe de toile, muni d'un petit tube qui permet de le gonfler en y insufflant de l'air et traversé, d'autre part, par un tube en fer, au moyen duquel on va puiser l'eau à un niveau inférieur.

Il convient également d'étudier au manomètre l'influence respective des variations de niveau dans les sondages et les puits voisins.

Enfin, M. Dru mentionne (*loc. cit.*, p. 79) la possibilité d'apercevoir parfois la circulation de l'eau, dans un sondage peu profond, au moyen d'un miroir placé à l'orifice.

d'autre part, au moyen de la hauteur d'eau dans ces tubes piézométriques, de la charge hydrostatique au même point.

En règle générale, si tous les trous de sonde pénètrent dans le filon thermal proprement dit, cette charge hydrostatique sera à peu près la même partout; s'ils ne recourent, au contraire, que des dérivations mêlées d'eau douce, elle sera d'autant plus faible qu'on s'éloignera davantage de la fracture initiale.

Ayant ainsi reconnu quels sont les sondages correspondant au filon proprement dit, la profondeur à laquelle ils rencontrent l'eau minéralisée donne un certain nombre de points du plan de fracture hydrothermale, qui se trouve ainsi déterminé.

Quand, par une série de travaux et d'investigations semblables, on est arrivé à élucider, dans la mesure du possible, le régime profond des eaux chaudes minéralisées, on n'a pas encore terminé cette première partie préliminaire de sa tâche et il importe, presque autant, de bien connaître le régime des eaux froides superficielles; car, ainsi que nous l'avons dit déjà et que nous aurons à y revenir souvent, un bon captage consiste, non moins à se garer de ces eaux froides, qu'à recueillir toutes les eaux chaudes.

Cette seconde étude, qui dépend surtout des conditions superficielles du terrain, de sa perméabilité, de sa porosité, de la présence de fissures ou de nappes sableuses, de l'allure du niveau hydrostatique reconnu par les puits d'eau douce, etc., pourra se compléter par quelques sondages, comme la première.

Enfin, lorsqu'on sera parvenu à s'expliquer la circulation souterraine, tant des eaux chaudes que des eaux froides et à mesurer leur influence réciproque, il faudra, comme première conclusion logique, arrêter, d'après les diverses circonstances locales, d'après les besoins médicaux, etc., le niveau général de captage le plus convenable, pour combattre, à la fois, l'accès des eaux froides et la perte des eaux chaudes, en assurant, dans la mesure désirée, le maximum de thermalité et de débit.

Cette question du niveau de captage, du plan de niveau, du plan d'émergence ou du plan d'eau¹ (suivant le nom qu'on voudra lui donner) est de premier ordre; car, suivant une remarque antérieure, capter trop haut, c'est souvent créer, sur la source thermale, une

¹ Ce plan n'est pas nécessairement un plan géométrique, surtout lorsque les travaux de captage présentent une certaine extension; il y a à tenir compte: d'une part, de la surface piézométrique, correspondant aux charges diverses de l'eau thermale et, d'autre part, de la surface hydrostatique des eaux froides.

surcharge, qui nuit à son débit; capter trop bas, c'est, en bien des cas, drainer des eaux froides, qui affaiblissent l'eau thermale.

Le choix du niveau de captage le plus favorable sera facilité par la théorie des pressions hydrostatiques réciproques, que nous exposerons plus tard.

Mais la pire des solutions, dont il est malheureusement trop d'exemples dans des captages hâtifs et irrationnels, c'est de ne pas savoir soi-même à quel niveau on capte; c'est, surtout dans des travaux un peu étendus, d'avoir des plans de captage différents, qui se contrarient les uns les autres et qui, en s'influencant réciproquement, amènent parfois des résultats désastreux.

Ces défauts, que nous attribuons là à une simple maladresse, sont, en nombre de cas, l'effet de la concurrence entre voisins, qui cherchent mutuellement à se dérober l'eau thermale en allant la puiser plus profondément, plus directement sur le griffon, etc.

Il n'est guère de station thermale importante qui n'ait vu des exemples de ces luttes fameuses, à coups de sondages et de pompes, avec procès verbaux, constats d'huissiers, expertises, procès, appels, cassations, etc., où l'on risque souvent, non seulement de nuire à une propriété antérieure, mais même de causer à une richesse publique un dommage irréparable.

L'ingénieur a souvent à intervenir en pareille matière, soit pour apprécier le dommage et en déterminer la cause directe, qui est toujours sujette à litige, soit pour le réparer et c'est également en vue d'éviter les inconvénients les plus graves, pouvant résulter d'un semblable état de choses, que la législation a prévu l'institution de périmètres de protection, pour la détermination rationnelle desquels il est non moins nécessaire d'examiner en détail le régime de la source thermale.

§ 2. — *Choix d'un système de captage. Tableau des divers modes d'émergence des sources thermales, avec le procédé de captage correspondant.*

L'exploration du terrain étant achevée et le mode d'émergence de la source, ainsi que le régime des eaux, déterminés, il y a lieu de choisir le mode de captage le plus approprié. Dans la troisième partie de ce livre, quand nous étudierons en détail les divers systèmes de captage, classés d'après leur principe même, en donnant

des exemples de chacun d'eux, nous aurons à revenir, du même coup, sur les raisons, qui, dans chaque cas de détail, motivent le choix entre eux. Mais nous voulons ici, dès le début, condenser les résultats de cette étude dans un tableau d'ensemble, indiquant, au contraire, les conclusions pratiques à tirer aussitôt du mode d'émergence observé pour le griffon et permettant, par suite, ce mode d'émergence étant connu, de se référer aux exemples ultérieurement décrits ; ce classement préliminaire expliquera également l'ordre adopté dans nos descriptions.

Auparavant, nous devons faire, au sujet de ces questions de captage, deux remarques générales, ajoutées à celles qui ont été développées déjà au paragraphe précédent :

La première, c'est que, presque toujours, on n'est pas, dans le choix d'un captage, libre de se régler uniquement sur des considérations théoriques.

Il est, en effet, exceptionnel aujourd'hui, surtout dans un pays tel que la France, où l'industrie des eaux minérales est déjà très développée, qu'on se trouve en présence d'une source nouvelle, vierge de tout captage, et éloignée de toute habitation. Presque toujours, on rencontre un commencement de captage plus ou moins ancien (fréquemment des substructions romaines) ; on a déjà un rudiment d'installation, qui parfois masque le griffon naturel ; en même temps, la source appartient à un propriétaire, dont le domaine a des limites, en dehors desquelles on ne peut la conduire ; elle est parfois entourée de maisons, auxquelles on n'a pas le droit de toucher, etc. ; il y a là tout un ensemble de circonstances, pour lesquelles on conçoit qu'on ne puisse donner d'avance de règles de conduite, mais dont il faudra nécessairement tenir grand compte.

En second lieu, nous allons voir que diverses influences superficielles ont, presque autant que l'origine profonde des eaux, à intervenir dans le captage.

Ainsi la disposition orographique du sol autour de la source, la position de celle-ci, soit dans une vallée, soit sur un plateau, soit à flanc de coteau, soit dans un ravin latéral, soit au bord d'une rivière, sur une plage, etc.

Ainsi encore la nature du sol, plus ou moins compact, imperméable, ou fissuré, poreux, etc., l'abondance plus ou moins grande des eaux douces, dont on peut craindre l'infiltration, etc.

Il serait donc dangereux de faire des raisonnements à priori sur

la simple inspection d'une carte géologique et topographique, si exacte qu'elle pût être et l'examen approfondi des moindres circonstances locales peut avoir son utilité, en évitant ultérieurement des dépenses inutiles et des fausses manœuvres.

Les principaux cas, qui se présentent pour le gisement d'une source thermale, sont ceux que nous allons essayer de classer méthodiquement dans le tableau suivant (p. 437).

Nous avons également indiqué, pour chacun d'eux, quel mode de captage est à adopter de préférence, en renvoyant à des exemples, qui seront développés ensuite.

Nous ne pouvons avoir la prétention d'énumérer ici toutes les combinaisons de circonstances spéciales, qui peuvent exister dans la nature et qui, dans chaque projet de captage nouveau, amèneront à adopter, en le modifiant plus ou moins, suivant les besoins locaux et les facilités dont on dispose, l'un des types décrits ici; nous demandons également qu'on ne se trompe pas sur la forme de ce tableau, nécessairement impérative par sa brièveté même : le mode de captage, que nous signalons dans chaque cas, peut ne pas être le seul à employer et les procédés indiqués pour les cas voisins sont souvent également recommandables. Il y a là, néanmoins, un premier aperçu sommaire, qu'il sera facile de compléter en cherchant, plus loin, parmi les exemples que nous étudierons en détail, ceux qui se rapprochent le plus du cas qu'on aura à traiter et recourant, au besoin, pour les indications complémentaires, aux renseignements bibliographiques, donnés à propos de chaque source étudiée.

Historiquement, les procédés de captage ont été successivement découverts et utilisés à peu près dans l'ordre où les énumère notre tableau, qui part du cas le plus simple, pour arriver aux cas les plus complexes.

La première idée, toute simple et toute naturelle, de creuser, sur le griffon même, une sorte de cuvette, où l'on concentrerait l'eau thermale dans une enceinte de maçonnerie, a été appliquée presque de tout temps et on en trouve des exemples dans nombre de captages antiques. Mais les Romains, qui étaient très experts en travaux hydrauliques, avaient déjà été plus loin.

Ils ont, dans certains cas, attaqué le griffon par un puits d'appel, en faisant partir, du fond de celui-ci, des galeries ou des drains souterrains.

Il leur est arrivé (notamment à Plombières) d'employer la pres-

Procédés employés. — Exemples.

Modes d'émergence.

1^o Cas où la fissure hydrothermale (griffon en roche compacte) est à la surface, ou à une profondeur assez faible sous les terrains meubles, pour qu'on puisse l'atteindre directement par une excavation restreinte.

(Entre ce cas et le suivant, il existe tous les intermédiaires, en sorte que les méthodes du second cas peuvent être également employées dans le premier.)

a. Griffon dans une dépression d'une plaine, une vallée assez large, ou un plateau; aucun ravin plus profond n'existe au voisinage.
 b. Griffon au fond d'un ravin encaissé; aucun point plus bas n'existe au voisinage.
 c. Griffon dans un vallon latéral à une plus grande vallée, formant un pont bas au voisinage, ou au pied d'un coteau.

a. Griffon en profondeur sur un plateau ou dans une large vallée; griffon dans un terrain fissuré donnant un éparpillement en veines à la surface.
 b. Griffon à flanc de coteau, pouvant être recouvert par des terrains meubles, ou masqué par une épaisseur de roche massive.

a. Cas d'une vallée étroite.
 b. Cas d'une large vallée d'alluvions.
 c. Cas d'une source à flanc de coteau.
 d. Cas d'une source dans un lac.

3^o Griffon en roche compacte, impossible à atteindre directement, parce qu'il est recouvert par des terrains meubles ou par une nappe d'eau, ou impossible à fixer parce qu'il est dans un terrain trop fissuré.

a. Captage en roche dure, dans une fosse murillée ou dans un simple cuvelage en bois, avec pompage au besoin (Bourbon-l'Archambault, Geleznovodsk, Schinznach, Maizères).
 Captage en terrain perméable par tranchées et puits (Aulus), ou par enceintes successives (Euzet, Saint-Gervais).
 Captage en terrain marneux, dans une enceinte de maçonnerie fondée sur pilotis (Geleznovodsk).
 Emploi de trous de sonde pour des sources gazeuses (Vals, Alet).
 b. Captage dans une fosse, avec dispositifs spéciaux, parfois avec application de la pression hydrostatique (Pflaefers).
 Emploi de trous de sonde pour des sources gazeuses (Chalchtyon).
 c. Capt. dans une fosse murillée, avec précautions spéciales pour éviter la fuite à l'aval (Evaux, Ners).
 Captage par un réservoir appliqué au coteau (sources froides de Geleznovodsk).

Captage par fosses, excavations, petits puits, tubes ascensionnels, ou courts trous de sonde.

1^o Griffon atteint par puits (puits divers à Vichy).
 2^o Griffon capté par puits d'isolement, entourant un tube ascensionnel (Vittel, Contrexéville, Fumades).
 3^o Griffon formé de fissures multiples, atteint par sondage (la Bourboule).
 4^o Galeries de drainage avec puits (Uriage).
 2^o Travers-bancs allant recouper le griffon (Saint-Jean-du-Gard, Pflaefers, Cantourel).
 3^o Travers-bancs, parfois accompagné de galeries de drainage en direction (Plombières, Lamalou, Geleznovodsk, Ponzoles).

Captage par puits et sondages.
 Captage par galeries de mines, travers-bancs, sondages horizontaux, etc.

a. Emploi d'une couverture en béton ou d'une nappe d'eau (Pflaefers, Plombières, Bourboule, Evaux, Barèges).
 b. Emploi de la pression hydrostatique d'une nappe d'eau (Ussat).
 Emploi des enceintes successives (Euzet, Saint-Gervais, La Motte-les-Bains).
 c. Réseau de galeries avec emploi de la pression hydrostatique (Bagnères-de-Luchon).
 d. Captage par cuvelage, avec utilisation de la pression hydrostatique (Enghien).

Captage par le jeu des pressions. (Emploi accessoire des enceintes successives.)

(Vichy, Saint-Yorre, Vals, Geleznovodsk, Essentouly, etc.)
 (Pongues, Vittel, Contrexéville, Fumades.)

Captage par puits ou sondages.
 Captage par puits ou sondages avec précautions spéciales.

I. Sources fluviales, arrivant de la profondeur par une fracture quelconque.

II. Sources interstratifiées en profondeur dans une couche perméable ou fissurée.

sion d'une nappe de béton extérieure, parfois très étendue, pour refouler les eaux vers une colonne de moindre charge, de barrer la vallée en aval par une digue de béton pour empêcher la déperdition de l'eau chaude, etc.

Enfin, ils ont fréquemment entouré la source chaude de travaux de drainage superficiels, pour empêcher l'afflux des eaux froides extérieures.

Ils ont, néanmoins, été arrêtés, là comme dans leurs exploitations de mines, par les difficultés d'épuisement et de ventilation, qui étaient si considérables pour les vieux mineurs et, en outre, il est un procédé très ingénieux, qui appartient bien en propre aux modernes, c'est celui dit des pressions hydrostatiques réciproques, imaginé par François, inspecteur général des mines, vers 1840 et appliqué par lui, dans nombre de captages, en France, au Caucase, etc., particulièrement à Bagnères-de-Luchon et à Ussat.

DEUXIÈME PARTIE

MESURES GÉNÉRALES

POUR L'EXÉCUTION DE TOUS LES PROCÉDÉS DE CAPTAGE

Avant d'aborder la description détaillée des divers systèmes de captage, il y a lieu d'examiner ici les procédés d'exécution généraux, qui peuvent s'appliquer à tous.

C'est là une question d'une certaine importance pratique, sur laquelle nous ne croyons pas néanmoins nécessaire de nous étendre bien longtemps.

En effet, les travaux de captage de sources thermales, puits, travers-bancs, galeries, etc., s'exécutent, en grande partie, comme des travaux de mines, avec lesquels, sauf certaines précautions spéciales, tenant à la nature fluide ou gazeuse du minerai exploité ici, ils peuvent même s'identifier. Quant à la composition des maçonneries à employer pour le revêtement des excavations diverses, des réservoirs, etc., nous rentrons dans le cas de la plupart des travaux hydrauliques, ou, plus spécialement, si l'eau est très minéralisée, très corrosive, de ceux de ces travaux exécutés dans les ports et destinés à résister à l'action chimique de l'eau de mer.

Nous pouvons donc, pour bien des problèmes, renvoyer aux ouvrages spéciaux, où ces matières sont traitées et nous insisterons surtout ici sur ce que de pareils travaux peuvent présenter de spécial, quand ils s'appliquent à des eaux thermo-minérales.

Nous étudierons successivement les points suivants :

§ 1. Épuisement.

§ 2. Aération.

§ 3. Exécution des boisages, muraillements, revêtements en ciment, béton, etc.

§ 4. De l'emploi des métaux dans les captages.

§ 5. Défense extérieure des captages.

Le travail des galeries de captage (boisages provisoires, muraillements, etc.) sera, en outre, spécialement décrit au chapitre concernant les modes de captage fondés sur leur emploi ¹

§ 1. — *De l'épuisement dans les travaux de captage.*

Toutes les fois qu'on exécute une galerie souterraine, on a à s'occuper de l'épuisement; car, sauf le cas exceptionnel de roches particulièrement compactes, cette galerie constitue toujours un drainage, un appel pour toutes les eaux des terrains avoisinants, qui se précipitent vers cette ligne de moindre pression. Il en est de même, à fortiori, pour les travaux de captage d'eaux thermales, où l'on a affaire, non seulement à ce qu'il peut se présenter d'infiltrations superficielles, mais surtout à l'invasion inévitable de l'eau thermale elle-même, que le travail a précisément pour but d'aller chercher.

Le système d'épuisement différera, du tout au tout, on le conçoit aussitôt, suivant qu'on restera en tranchées ouvertes ou galeries au-dessus du niveau hydrostatique et, plus spécialement, au-dessus du thalweg de la vallée, ou, inversement, que l'on descendra, par excavations, puits ou galeries, au-dessous de ce niveau.

1° Dans le premier cas, il va de soi que l'on tâchera de donner aux travaux de recherches une pente suffisante vers le jour, pour assurer l'écoulement naturel des eaux par rigoles ou conduites.

Il n'en restera pas moins nécessaire de se garer contre une irruption subite d'eau thermale, qui pourrait atteindre et noyer les ouvriers.

C'est pourquoi, lorsqu'on approchera du filon thermal, — ce dont on sera généralement averti par la chaleur croissante, par des suintements d'eau chaude et surtout par la distance calculée au moyen des études à l'extérieur, — on aura avantage à se faire précéder par un sondage horizontal.

Il est même souvent bon, à tous les points de vue, de ne pas accéder directement par galerie dans le filon aqueux, tant pour éviter un coup d'eau subit que pour ne pas troubler violemment le régime hydrothermal; aussi laissera-t-on volontiers, entre ce filon AB et le fond de la galerie D, un massif protecteur, traversé seulement par un sondage horizontal, qui se trouvera constituer, en pratique, la source (fig. 65).

2° Si l'on est forcé de s'enfoncer verticalement au-dessous de la surface du sol au point considéré, on n'a que deux ressources : la première, praticable seulement dans certains cas, consistant à creuser aux eaux une tranchée d'écoulement jusqu'à un thalweg plus ou moins éloigné ; la seconde, presque toujours nécessaire, à se servir de pompes.

Toutes les fois qu'on peut éviter d'employer des pompes, on a avantage à le faire ; car, avec les pompes, on reste toujours à la merci d'un accident venant les arrêter, ou seulement d'une irruption d'eau plus abondante, dépassant leur puissance effective et l'on peut

voir alors des maçonneries en cours d'exécution submergées avant la prise complète des ciments : ce qui en compromettrait l'étanchéité. En outre, le travail par tranchée, une fois fait, sert ensuite constamment, sans nouveaux frais, tandis que la manœuvre de la pompe exige une dépense constante de charbon ou de force motrice.

Par contre, l'installation d'une pompe présente cette commodité de s'opérer rapidement et économiquement, tandis qu'une tranchée est une chose coûteuse. Et surtout, ce qui dispense de toute discussion, il arrive très souvent que l'on n'a pas le choix et que l'on est forcé de pomper.

Épuisement par pompes pendant les travaux. — Les pompes à employer dans les travaux de captage n'ont pas, comme celles destinées plus tard à l'épuisement¹, à satisfaire à des conditions spéciales (pour préserver le métal de l'altération chimique, etc.).

Il n'y a donc rien de très particulier à en dire. Suivant la quantité d'eau à extraire et la durée présumée des travaux, on pourra les faire manœuvrer, soit à bras d'hommes, soit au moyen d'une locomobile.

Il convient seulement, quand on calcule la force de la machine à choisir, de tenir largement compte de ce fait que le débit en profondeur pourra être facilement le triple ou le quadruple de celui constaté à l'émergence naturelle. C'est là un fait que nous avons

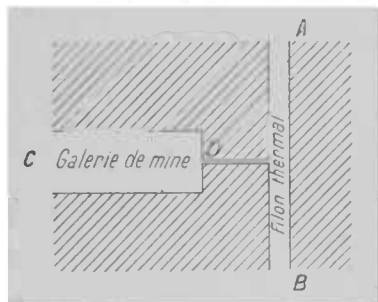


Fig. 65. — Plan d'une galerie de captage, accédant au filon thermal par un sondage horizontal.

¹ Voir plus loin, page 595.

suffisamment expliqué dans la première moitié de cet ouvrage et qui tient au régime même de la source thermique. Il s'y joint, surtout dans les premiers temps de l'épuisement, que celui-ci a pour résultat d'assécher progressivement les terrains avoisinants, en

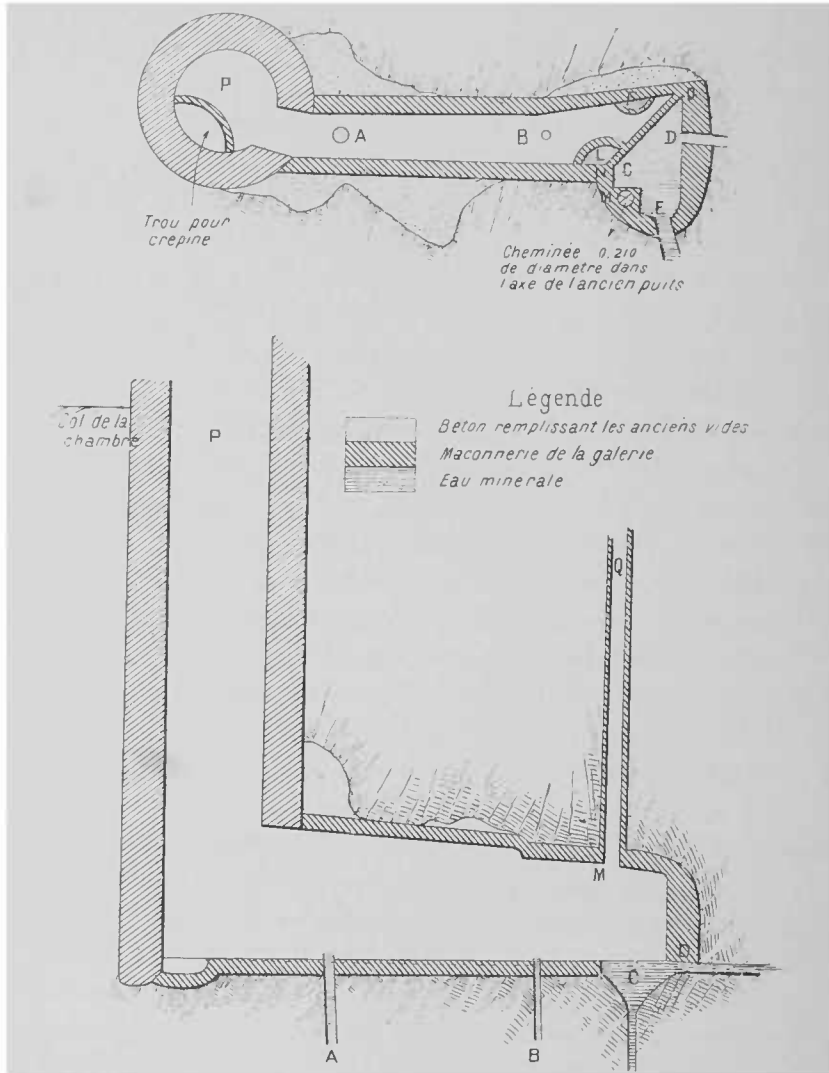


Fig. 66 et 67. — Coupe et plan au puits Lucas de Vichy. (Travaux de 1888.)
Echelle de 0,075 pour 10 m.

attirant vers les travaux toutes les infiltrations froides superficielles. Si ces terrains ne contiennent pas de nappe d'eau proprement dite, cette seconde cause d'augmentation peut aller en s'atténuant avec la durée des travaux ; mais elle devra, néanmoins, entrer en ligne de compte. Enfin, dans un travail de ce genre, où la part d'inconnu

et d'imprévu est aussi considérable, il est prudent de majorer ses chiffres très largement.

Nous citerons, comme exemple, des travaux que nous avons eu l'occasion de faire exécuter, en mai 1888, au puits Lucas, à Vichy, (fig. 66 et 67). Le débit de ce puits était, à l'orifice, avant les travaux, de 26 742 litres par vingt-quatre heures. Il s'agissait, au fond de ce puits P, profond de 9.50 m., d'achever et de cimenter une galerie souterraine de 8 m. de long, dirigée vers le griffon C : galerie que les premiers auteurs du captage avaient précisément dû abandonner jadis à la hâte et sans la finir, faute de moyens d'épuisement suffisants. A l'état naturel, puits et galerie étaient absolument remplis d'eau minérale. L'épuisement a été fait au moyen d'une pompe placée à côté de l'orifice du puits et actionnée par une machine locomobile de six chevaux, qui avait, en même temps, à faire mouvoir un ventilateur, dont nous reparlerons en traitant de l'aération. Cette pompe a permis de mettre la galerie complètement à sec pendant tout le temps nécessaire pour la réfection des travaux ; elle débitait, à ce moment, 102 850 litres par vingt-quatre heures, c'est-à-dire près du quadruple de son débit à l'orifice.

Quand les travaux ont été finis et qu'on a laissé remonter l'eau thermale dans le puits, on a trouvé, à l'orifice, un débit permanent de 52 294 litres, c'est-à-dire environ le double de ce qu'il était auparavant.

§ 2. — *Aération des travaux de captage.*

Les travaux de captage d'eaux thermales, bien que très peu développés, en général, par rapport aux travaux d'exploitation des mines et toujours voisins de la surface, exigent cependant une ventilation soignée : 1° à cause de la chaleur des eaux et de la vapeur d'eau, qui deviennent rapidement une gêne pour les ouvriers ; 2° en raison de l'abondance spéciale de gaz délétères, acide carbonique ou acide sulfhydrique, que ces eaux, qui en sont parfois saturées, déversent abondamment dans l'atmosphère.

Lorsque, pour une exploration sommaire de travaux de captage anciens, on se contente de faire l'épuisement de l'eau, contenue dans des puits et des galeries souterraines, il reste, au fond, si la source est carbonatée, une couche plus ou moins épaisse d'acide carbonique, dont on doit, avant tout, vérifier la présence et l'épaisseur par le procédé habituel, en descendant une bougie allumée,

qui s'éteint un peu après avoir pénétré dans la couche. On constate ainsi si cette épaisseur permet à un homme de respirer au fond du puits; mais, lors même que la couche n'aurait pas plus de 1 m. de haut, la prudence exige, dans ce cas, que l'homme se fasse attacher par une corde et reste constamment en vue des ouvriers restés en haut, qui le remonteraient au besoin, si un brusque dégagement d'acide carbonique, ou simplement une chute, amenaient un commencement d'asphyxie.

Quand la couche dépasse la hauteur d'un homme, on peut encore faire une exploration rapide, en se munissant d'appareils respiratoires, communiquant par un tube avec l'air libre et en s'éclairant au moyen de lampes électriques.

Ces procédés deviennent naturellement impraticables, dès qu'il y a un travail à exécuter et il faut alors adopter un système de ventilation spécial¹. Nous décrirons l'installation très simple et rudimentaire, que nous avons appliquée dans les travaux, signalés plus haut², *du puits Lucas à Vichy*, travaux précédemment explorés par le moyen sommaire que nous venons de dire et qui, après un épuisement complet et le fonctionnement à vide pendant un certain temps de la pompe comme machine aspirante, contenaient encore une couche d'acide carbonique de plus de 3 m. d'épaisseur (fig. 66 et 67).

Comme nous l'avons dit, au fond du puits Lucas, à 9,50 m. de profondeur, il s'agissait de terminer et de murailles une galerie de 8 m., dirigée vers les griffons principaux C D E.

Une locomobile, ayant été placée à l'orifice du puits P, actionna un ventilateur de 0,50 m. de diamètre aux ailettes, sur 0,18 m. de largeur, produisant une dépression de 0,60 m. d'eau et faisant 1230 tours par minute. Ce ventilateur aspirait l'acide carbonique du puits au moyen d'une gaine carrée, en bois, de 0,20 de côté, continuée par un tuyau de caoutchouc de 0,10 m. de diamètre et le rejetait au jour par une conduite en bois semblable.

Mais, lorsqu'il fallut travailler à l'extrémité de la galerie souterraine en D, on s'aperçut que la ventilation était insuffisante pour enlever les quantités considérables d'acide carbonique, incessamment produites par la source. Les ouvriers ne pouvaient séjourner sur le chantier. On réalisa alors une circulation d'air continue en perçant, au-dessus du griffon et jusqu'à la surface, une cheminée d'aérage M Q de 0,20 m. de diamètre : travail qui, dans ce cas spécial, se trouva

Les ventilateurs peuvent être, comme dans les mines, soit aspirants, soit soufflants; on sait qu', pour les grands ventilateurs de mines, on préfère, en général, le type aspirant, tandis que les petits ventilateurs à bras sont, le plus souvent, soufflants.

facilité par l'existence, en Q, d'un ancien puits de 6 m. de profondeur, dit puits des Acacias. Une fois le percement effectué, il suffit d'installer, au haut de ce puits Q, un petit ventilateur soufflant, en communication avec la galerie par un tuyau de caoutchouc et de le faire fonctionner à la main, de temps à autre, pour rendre la respiration au bas des plus faciles.

Les opérations de cimentage ayant été achevées, avant de laisser rentrer l'eau dans la galerie, on a mis ce percement en état de resservir une autre fois, en y plaçant un tube de tôle, entouré de béton.

Le procédé, dont nous venons d'indiquer une application très ordinaire au puits Lucas et qui consiste à aérer une galerie en y établissant une circulation continue par un puits d'aéragé arrivant au fond de taille, pourra être d'une utilité fréquente dans les

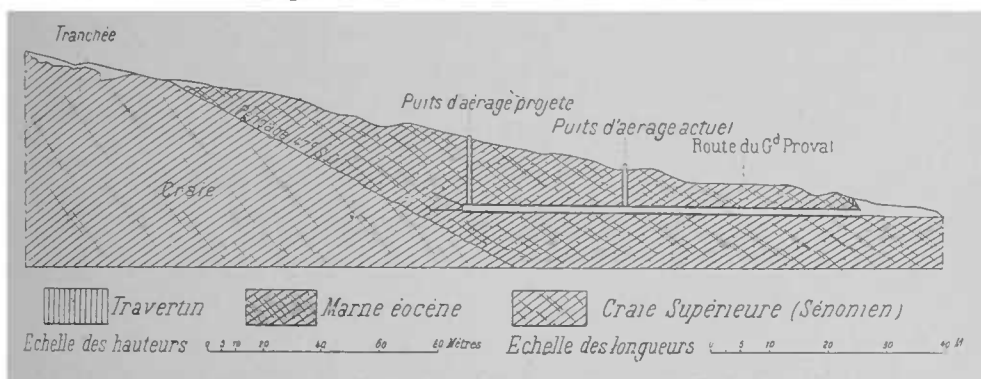


Fig. 68. — Coupe géologique N 10° O par l'axe de la galerie Tobieff, à Piatigorsk, montrant la disposition des puits d'aéragé (d'après M. Dru)

sources très chargées d'acide carbonique, qui sont celles où l'aéragé demande le plus de soins.

On s'en servira également pour se débarrasser de l'hydrogène sulfuré, ou simplement pour diminuer la température. La figure 68 indique la disposition adoptée, à cet effet, à la galerie Tobieff, à *Piatigorsk (Caucase)*, où une galerie, menée à travers les marnes éocènes vers les fissures thermales, a été aérée successivement par deux puits¹

Dans les travaux de réfection du captage de la source de *Lavey*² en 1883, on a pu travailler, au fond d'un puits de 18 m. de profondeur et 1,20 m. de diamètre, donnant de l'eau à près de 50° et l'approfondir de 2 m., au moyen d'un simple ventilateur aspirant.

¹ Voir, sur la source de Piatigorsk, p. 74, 141, 377, 604, 609, 616.

² OTTO OSSENT. (*Bull. Soc. Vaud. des Ingén. et Archil.*, mars 1885.) Voir p. 172 et 332.

Voici les données numériques relatives à ce cas :

Le ventilateur à hélice, de 40 cm. de diamètre, aspirait 15 m³, en faisant 600 tours par minute, 30 m³ en en faisant 800 ; il était relié avec le fonds du puits par un tuyau de tôle de 25 cm. de diamètre.

En supposant 600 tours, on introduisait $30 \times 60 = 1800$ m³ par heure, qui, pour augmenter leur température d'un degré, devaient absorber $1800 \times 0.2957 = 532$ calories, la capacité calorifique de l'air à 10° étant de 0,2957 calories par m³.

D'autre part, une paroi à 40°, mise en contact avec de l'air à 10°, perd une quantité de chaleur égale, d'après Pécelet, à 2,74 [40 — 10] [1 + 0,0073 (40 — 10)], soit environ 100 calories par m² et par heure, ou, sur un puits de 1,20 m. de section et 10 m. de profondeur, $10 \times 1.20 \pi \times 100 = 3768$ calories, de telle sorte que l'air froid, primitivement à 10°, passerait à $\left(10 + \frac{3768}{532}\right)$, ou 17°.

La résistance, due au frottement de l'air dans le tuyau d'aspiration, donne, d'après les formules déterminées par M. Stockalper lors du percement du Saint-Gothard, comme perte de charge en atmosphères :

$$J = 1 - \sqrt{1 - 0,00025 \alpha L v^2 [1 + 0,004 t]},$$

où l'on fait :

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,8526, \text{ pour } D \text{ (diamètre)} = 0,25 \\ L &= 18 \text{ m. } v = 0,50 \text{ m}^3. \text{ } t = 20^\circ \end{aligned}$$

en sorte que $J = 0,0017$ atmosphères = 0,01756 m. d'eau.

Enfin, l'on a pu quelquefois faciliter la ventilation d'un puits de captage en amenant, au fond, par un tuyau, un jet de vapeur, que fournissait une petite chaudière placée à la surface. Ce système a été imaginé par M. Faucille dans les premiers travaux du puits Lucas de Vichy en 1854 ¹

§ 3. — *Exécution des boisages, muraillements, revêtements en ciment, béton, etc.*

Une galerie de captage de source demande, comme une galerie de mine quelconque, un boisage provisoire et parfois un véritable coffrage, ou cuvelage, lorsqu'on est dans les terrains coulants, puis un muraillement, plus ou moins complet, suivant le degré de compacité et de solidité de la roche.

Ces travaux présentent un certain avantage apparent sur ceux

Note sur l'emploi de la vapeur d'eau et sur d'autres moyens de chasser l'acide carbonique des recherches souterraines d'eaux minérales. (C. R. 1861, t. XXII, p. 530 et FRANÇOIS, *ibid.*, t. XXIII, p. 5.)

des mines, en ce que l'on n'est pas ici dans un terrain ébranlé de toutes parts et entouré par les vides de l'exploitation.

Il est évident, par contre, qu'on se trouve dans des circonstances spécialement difficiles en ce qui concerne le délitement, la désagrégation et, par suite, la mobilité des couches encaissantes, puisqu'on est nécessairement en présence de l'eau et d'une eau, qui, par sa pression, non moins que par sa température et sa minéralisation, est particulièrement propre à attaquer et corroder les roches.

Cet effet est destiné à se prolonger après l'exécution du captage et nous avons déjà, dans la première moitié de cet ouvrage¹, indiqué l'action dissolvante, que les eaux thermo-minérales exercent sur les parois de leurs chenaux souterrains, avec la possibilité de cavités souterraines et d'éboulements connexes, qui en résulte.

Il est donc nécessaire de donner aux travaux de captage souterrains un revêtement suffisamment solide pour résister à ces causes de destruction ; cela est d'autant plus utile dans les travaux de captage à niveau plein qu'il est ensuite difficile d'y rentrer, lorsqu'on a laissé remonter les eaux et qu'on a, dès lors, rarement l'occasion de venir constater les dégradations, plus ou moins étendues, qui ont pu se produire.

En outre, le captage même exige, pour la localisation convenable des griffons, l'exécution de certaines maçonneries spéciales, dont il est inutile de signaler l'importance.

Il en résulte donc, de toutes façons, que, dans les captages de sources, on a à exécuter des travaux de soulèvement et de muraillement, parfois très développés, qui doivent répondre à cette condition essentielle de pouvoir résister à l'action chimique prolongée d'une eau minéralisée et chaude. Ce sont ces travaux dont nous allons ici dire quelques mots.

Nous n'avons pas besoin d'ajouter que, toutes les fois que ce sera possible, on devra s'arranger pour en faciliter la visite et l'entretien.

1^o Boisages. — Les bois de mines, laissés dans une galerie de mine entièrement noyée et, par suite, à l'abri de l'air, peuvent se conserver très longtemps ; mais il est difficile d'en former un gar-

nissage assez élanche pour éviter, à la longue, des fuites d'eau thermale, des désagréments du terrain encaissant, surtout si ce dernier est marneux ou schisteux et, en fin de compte, des coulées de boue dans la galerie, qui se trouve obstruée. L'impossibilité d'exercer une surveillance peut, en pareil cas, rendre la rupture d'un cadre, sous la poussée des terrains. désastreuse.

Dans une galerie de captage, où l'on circule, au contraire, librement, l'inconvénient est moindre en un sens, puisqu'on est à même de remplacer les cadres brisés, au fur et à mesure ; mais, d'autre part, ils pourrissent rapidement.

Le boisage, qui est presque la règle pour les galeries d'exploitation de mines, destinées, par leur nature même, à subsister peu de temps, est donc rarement employé, et seulement à titre provisoire, dans les captages de sources, où l'on vise à constituer un ouvrage tout à fait durable.

Cependant nous citerons, à Maizières, à Enghien, etc., quelques exemples de captages de sources faits au moyen de puits verticaux cuvelés en bois.

Quand on doit laisser les boisages permanents, sans les remplacer par de la maçonnerie, on emploie de préférence un bois résistant à l'humidité et peu cassant, comme le chêne.

2^e Maçonneries. — Les maçonneries servent pour des enceintes de captage, des réservoirs, des revêtements de puits et de galeries, etc¹

Les maçonneries proprement dites, quel qu'en soit l'usage, peuvent être faites simplement en briques, avec un enduit de ciment hydraulique, ayant jusqu'à 0,05 m. d'épaisseur, au contact de l'eau ; mais il est nécessaire d'en soigner, tout particulièrement, l'exécution, puisque, de leur bonne conservation dans la suite, dépendra la préservation de la source dans son intégrité.

Souvent, pour établir une *fosse de captage* dans une roche dure, comme un granite ou un gneiss, mais fissurée, on commence par faire des revêtements de terre glaise, sur lesquels on applique une première enceinte de béton et c'est dans cette première enceinte qu'on en établit une seconde en moellons ou en briques, recouverte, à son tour, d'un enduit de ciment hydraulique.

Si le terrain, où doit s'établir cette enceinte de captage, est très

¹ Les détails relatifs à l'exécution des maçonneries se trouvent dans nombre d'ouvrages classiques, notamment dans le *Traité de mécanique générale* de Résal, t. V.

affouillable et délitable, par exemple composé d'argiles, de

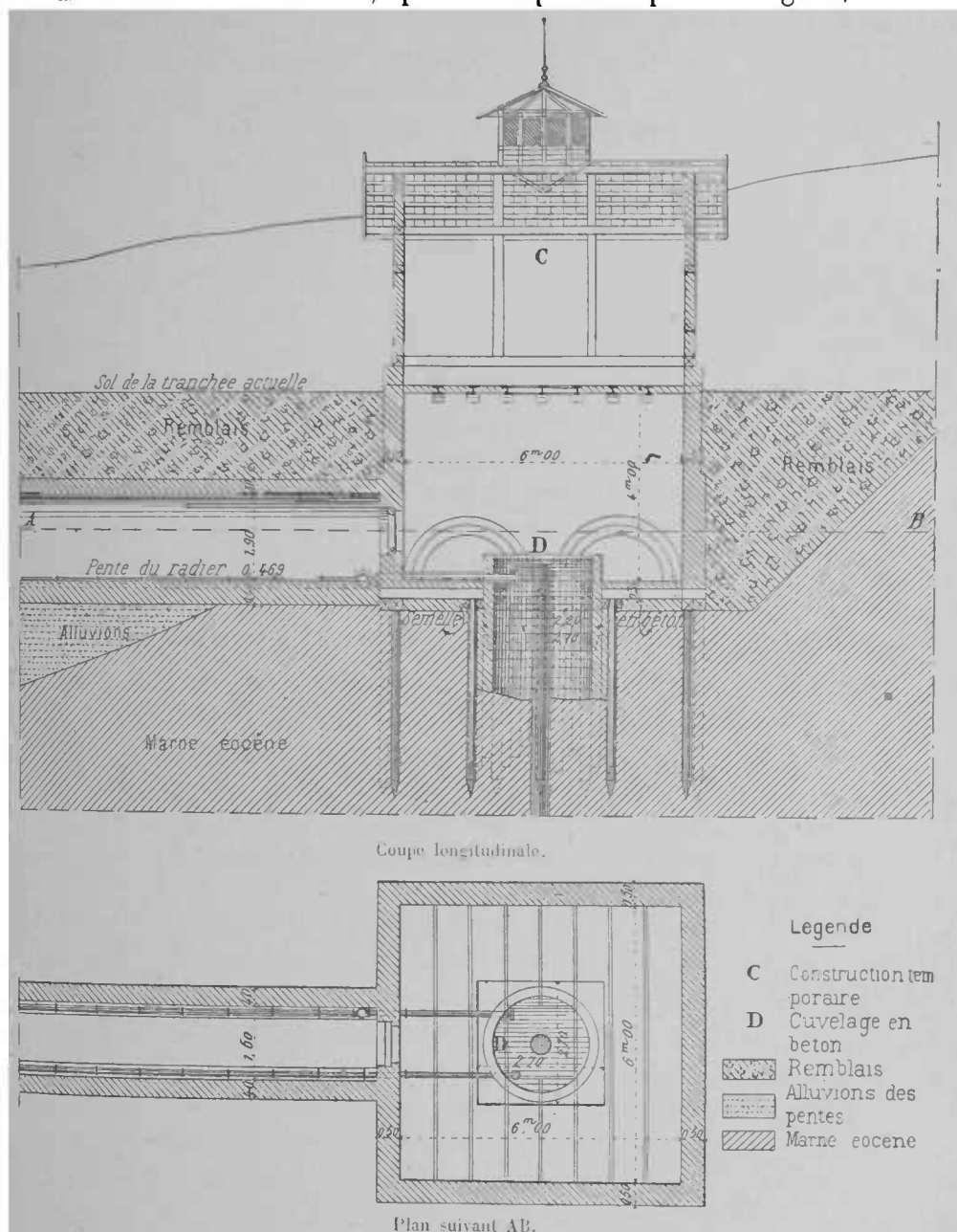


Fig. 69 et 70. — Geleznovodsk ; sous-groupe de l'Est. Travaux de recherches et d'aménagement de la source Giaznouchka supérieure. Coupe longitudinale et plan suivant AB (d'après M. Dru).

marnes ou de schistes, on est obligé de prendre des précautions toutes spéciales.

Dans un cas de ce genre, à Geleznovodsk (source Griaznouchka) où la source se trouvait au milieu de marnes éocènes très friables (fig. 69 et 70), M. Dru ¹ a proposé d'entourer son émergence d'une enceinte de protection, fondée sur pilotis et palplanches.

La difficulté est alors d'éviter des charges trop fortes, qui risqueraient d'amener un glissement des terrains et une obstruction de la source en profondeur.

On doit faire le battage des pieux et palplanches à petits coups, avec charge et sous pression, si cela est possible, pour éviter un refoulement des marnes compressibles ; on les relie ensuite par des traverses moisées et boulonnées. Puis, sur ce cadre, on fait un béton, noyant la tête des pieux et l'on édifie le mur au-dessus.

Quand, au lieu d'une enceinte de captage, il s'agit d'une galerie à établir dans ces terrains affouillables et fissurés, qui constituent la difficulté la plus grande, à tous égards, pour le captage des sources, il est essentiel de ne pas laisser de vides, de cloches d'éboulement au toit ou sur le pourtour de ces galeries ; on bourre alors ceux de ces vides, qui pourraient exister, avec des fragments de briques et du ciment, du béton, des scories, etc., ainsi que le montrent, plus haut, les figures 66 et 67.

Si les cavités de ce genre sont trop grandes, à mesure que l'on enlève les boisages provisoires, on peut maintenir les terrains par de petits murs de soutènement en briques, perpendiculaires à l'axe de la galerie, qui se trouvent ensuite noyés dans le béton.

Pour des dimensions encore plus considérables, on se servira de barres de fer appuyées au rocher, etc.

Dans ce genre de terrains délitables et, plus généralement, toutes les fois qu'on est amené à faire un revêtement sur toute la section de la galerie, on donnera volontiers à cette section une forme ovoïde, analogue à celle des égouts, pour opposer une meilleure résistance aux poussées extérieures.

Enfin, comme dernière précaution, quand on a terminé un travail de captage quelconque, on peut vérifier la résistance des maçonneries et leur étanchéité en les mettant en charge pendant quelque temps, puis épuisant de nouveau.

Renseignements numériques. — Nous ajouterons seulement, pour mémoire et à titre de simple indication approximative, quelques renseignements numériques sur les matériaux utilisés dans les maçonneries.

1884. *Eaux du Caucase*, p. 49 et pl. 27. Voir, plus loin, p. 483.

Un *béton* est dit gras ou maigre, suivant qu'il entre plus ou moins de mortier hydraulique entre les interstices des cailloux.

C'est un béton gras (formé de 0,55 m³ de mortier et 0,77 de cailloux) qu'on emploie généralement pour les radiers et réservoirs soumis à une pression considérable.

Pour les égouts de la ville de Paris, on prend 0,52 de mortier et 0,78 de cailloux : c'est alors un béton ordinaire.

Le prix d'un semblable béton, mis en place, pour comblement de puits, est, à Paris, de 22,70 fr. le m³, avec une plus-value de 8,55 fr. par m³ pour emploi, dans le mortier, de ciment de Vassy.

Le mètre cube de béton en mortier, au bout de six mois, peut peser 1850 kg. ; on lui fait porter pratiquement, au maximum, 4 à 5 kg. par centimètre carré.

Pour les captages de sources, on remplace souvent les pierres cassées par des fragments de briques ou de tuiles : ce qui augmente énormément la ténacité.

Le *mortier de ciment* a un poids, qui varie de 1500 à 2000 kg. au mètre cube et une résistance à la rupture d'environ 40 kg. au centimètre carré, qui peut atteindre 135 kg. avec le ciment de Vassy.

Le mortier hydraulique revient environ à 10 fr. le mètre cube.

Les *briques* ont, comme dimensions ordinaires, 0,22 × 0,11 × 0,055 et pèsent, en moyenne, 3 kg. Leur prix varie de 10 à 20 fr. le mille.

Par mètre cube de maçonneries en briques, on consomme 0,200 m³ de mortier et 640 briques et l'on compte, en moyenne, 15 heures de travail

On compte, à Paris : pour la meulière, 13 fr. le m³; pour les moellons de premier choix, 12 fr. : pour le sable, 7 fr. : pour la chaux hydraulique, 24 fr. ; pour le ciment de Vassy, 7,50 fr. les 100 kilos.

La mise en place d'un mètre cube de *maçonnerie* demande un peu plus d'une journée du maçon et de son aide et peut coûter : pour mur en moellons, 31 fr. le m³, d'après la série des prix de la ville de Paris : pour mur en maçonnerie de béton, 18 fr. 50 le m³.

Dans les travaux de puits, on prévoit, à Paris, pour maçonnerie de murs de puits en moellon de 0,25 m. d'épaisseur au minimum, hourdée et jointoyée au mortier de chaux hydraulique :

Jusqu'à 10 m. de profondeur : 40 fr. le m³ ;

De 20 à 30 m. — : 50 fr. —

Plus-value pour jointoiement en ciment de Vassy : 1,40 fr. le m² superficiel¹.

§ 4. — *De l'emploi des métaux dans les captages d'eaux thermales.*

Quand on est amené à employer des métaux dans les captages pour les tuyaux, conduites, tubages, etc., on se heurte à une difficulté assez grave, c'est l'attaquabilité de la plupart des métaux

¹ Pour des renseignements complémentaires sur les ciments, on peut consulter les articles suivants :

1882. BARREAU. *Sur les qualités et essais des ciments à prise lente, dits portland.* (Ann. p. et ch., 6^e sér., 1882, t. II, p. 150 à 225.) — 1887. GOBIN. *Sur la fabrication*

en présence d'eaux chaudes et minéralisées, exerçant sur eux une action prolongée.

L'intensité plus ou moins grande de cette attaque dépend, naturellement, de la composition chimique des eaux et de leur degré de minéralisation ; mais, si faiblement minéralisée que soit l'eau, l'expérience montre qu'au bout d'un temps plus ou moins long tous les métaux pratiquement utilisables, le fer, le plomb, le cuivre, etc., sont attaqués. Nous en avons déjà donné une preuve indirecte, quand nous avons décrit ¹ les effets produits par les eaux de Plombières et de Bourbonne sur des monnaies de cuivre, des tuyaux de plomb ou des objets de fer, restés, depuis dix-huit siècles, dans des captages romains.

Il ne s'agit donc pas de chercher un absolu irréalisable, mais seulement de trouver, dans chaque cas, la meilleure solution applicable sans dépenses exagérées, et en tenant compte du temps que les appareils employés auront à résister, ainsi que de la facilité qu'on aura à les visiter.

Nous commencerons par donner quelques exemples, pour préciser le mode d'action d'un certain nombre d'eaux thermo-minérales sur divers métaux et nous terminerons par des indications pratiques.

Prenons, d'abord, une eau très peu minéralisée, comme celle de *Bourbon-l'Archambault* ; sa température est de 52° ; elle contient, par litre : 1,77 gr. de chlorure de sodium, 0,47 gr. de carbonate de soude, 0,35 gr. de sulfate de soude, 0,15 gr. de sulfate de potasse, etc. Il est facile de constater qu'en présence de l'air elle attaque rapidement le fer, et la découverte d'objets romains en cuivre ou en fer dans le puisard a permis à M. de Gouvenain d'étudier leur altération, qui se traduisait, en résumé, par la formation de sulfures ; cependant, à l'abri de l'air, l'attaque sur le fer même est assez lente pour qu'on ait pu, en raison de la grande économie, que présente l'emploi de ce métal, par rapport au cuivre, utiliser, sans inconvénient, des conduites d'eau en fonte ; pour des objets de moindre dimension, le cuivre est tout indiqué.

L'eau de *Bourbonne-les-Bains*, également chlorurée, est plus minéralisée. Sa température est de 60 à 70°. Elle contient, par litre d'eau : 5,70 gr. de chlorure de sodium et 0,87 gr. de sulfate de chaux, puis 0,38 gr. de chlorure de magnésium, 0,12 gr. de sulfate de potasse, etc. On a reconnu que le cuivre s'y attaquait rapidement, dans certains cas : sous l'action de l'eau et de l'acide carbonique, il y avait formation de carbonate et le cuivre finissait par se percer. Dans d'autres cas, cités par M. Rigaud, il avait, au contraire, résisté.

des chaux hydrauliques dans le bassin du Rhône. (Ann. p. et ch., 6^e sér., 1887, t. II, p. 464 à 490.) — 1889. GOBIN. *Sur la fabrication et les propriétés des ciments de l'Isère.* (Ann. p. et ch., 6^e sér., t. I, p. 755 à 828.) — FÉRET. *Expériences concernant les ciments faites au laboratoire du Pas-de-Calais.* (Ann. p. et ch., 6^e sér., p. 313 à 380.)

Le laiton et le fer ou le fer-blanc s'y altèrent beaucoup plus vite.

Le plomb, ou mieux l'étain, résistent à peu près complètement.

Dans ces conditions, lors de captages exécutés en 1875 sur ces sources, les services civils ont préféré le cuivre; les services militaires, le plomb, qui est plus dispendieux pour des pressions élevées.

L'eau d'*Evauz* est encore une eau peu minéralisée, légèrement chlorurée et sulfurée; les objets de cuivre romains s'y sont transformés en sulfures.

Quand on a affaire à une eau sulfureuse, la détérioration est, en général, particulièrement rapide et l'on s'ingénie, avant tout, à diminuer le plus possible les surfaces métalliques. En fait de métaux, ceux qui résistent le mieux sont le fer émaillé, le plomb étamé, ou le cuivre, qui donne cependant des sulfures.

Enfin, dans les eaux carbonatées de *Pougues*, on a pu constater, lors d'une réfection du captage, que des tubages en fer avaient été complètement corrodés: ce qui montre combien est illusoire, ou du moins précaire, le système, souvent employé pour les sondages de sources gazeuses, qui consiste à y descendre un tube en fer, enveloppé de béton.

En résumé, toutes les fois qu'une conduite doit durer longtemps et ne pourra être inspectée aisément, il faut proscrire le fer, à moins d'une nécessité économique.

Au contraire, quand on sera à même de remplacer les pièces détériorées, le fer ou la fonte sont tellement moins coûteux qu'on les emploiera en dépit de leurs inconvénients. Il faudra alors faciliter, de toutes manières, la surveillance des pièces et leur démontage par parties.

Pour les conduites au jour, la fonte s'impose, quand on n'emploie pas le bois, comme nous le verrons faire souvent en Suisse. Outre son bas prix, elle est, en effet, moins conductrice de la chaleur que le cuivre et amène, par suite, moins de pertes dans la thermalité.

Dans les pièces délicates, le fer émaillé donnera une solution approximative.

Quand on est amené à renoncer au fer, on a le choix entre le plomb et le cuivre.

Le plomb, outre qu'il est peu altérable, est commode pour les tuyaux de diamètre inférieur à 0,05 m., surtout s'ils présentent des inflexions très marquées. Par contre, il est trop mou pour des conduites verticales de grandes dimensions et, dès que la pression devient un peu forte, il exige une telle augmentation d'épaisseur qu'elle fait plus que compenser le prix moindre du métal.

Le cuivre donne plus de peine à courber, bien qu'on y arrive avec quelques précautions; mais, pour les gros tuyaux, il a l'avantage d'être plus facile à poser; car des tuyaux de plomb de 0,16 m. de

diamètre, ayant au moins 15 mm. d'épaisseur, pèseraient près de 100 kg. par mètre courant, au lieu de 12 kg., poids des tuyaux en cuivre de même calibre et de 2.5 mm. d'épaisseur.

Si les tuyaux de cuivre doivent être soumis extérieurement à l'action de l'eau minérale, il est bon de les recouvrir d'une couche de goudron de houille, entretenue avec soin.

Nous aurons, d'ailleurs, à reparler de ces questions, en traitant plus loin du transport des eaux thermales à leur point d'utilisation¹

§ 5. — *Protection extérieure des captages² Dangers à prévoir. Remède aux disparitions de sources thermales, produites par des fissures accidentelles.*

L'étude géologique des sources thermales a suffisamment montré comment, dans bien des cas, une source, captée en un point, pouvait être détournée, soit accidentellement, soit volontairement, vers un autre, au détriment de son premier propriétaire.

Ce danger résulte immédiatement de la loi générale, qui pousse l'eau souterraine à se diriger du côté où elle rencontre la moindre pression à vaincre.

Il peut arriver qu'un coup de mine maladroit brise une des parois de la fracture hydrothermale³ et la perde, au moins momentanément, dans les terrains superficiels du voisinage.

Quelquefois aussi, c'est une tranchée, ou un travail de mine, qui se trouvera recouper en profondeur la nappe alimentaire de la source, et qui provoquera sa disparition.

Ainsi, à Teplitz, en 1879, les travaux de la mine de lignite d'Osseg amenèrent l'arrêt de la source thermique.

Plus souvent, c'est un concurrent, qui viendra, par un travers-

Voir p. 590.

Nous consacrerons ultérieurement un chapitre à la protection du captage contre les infiltrations froides (3^e partie, ch. iv, p. 562).

³ Un cas de ce genre, auquel il a été facile de remédier en aveuglant avec du béton la voie d'eau, s'est produit en 1884, lors du captage des eaux de Bourbon-l'Archambault et y a causé une petite émeute.

Dans un cas du même genre, à Teplitz, on a interprété la disparition de la source d'une façon plus originale, en prétendant qu'elle se cachait par mécontentement de ce que l'on faisait payer pour l'utiliser en bains. (Reuss. *Die Bäder von Teplitz*, p. 117, 1835.)

Nous reviendrons, plus loin, longuement (p. 537 à 540) sur les accidents des sources de Teplitz.

bancs, un puits, un sondage, etc., créer à l'eau minérale une issue plus facile que l'ancienne, ou encore qui placera des pompes sur un puits déjà existant et, en exerçant par là une aspiration sur l'eau souterraine, détournera la source à son profit¹.

Il est absolument indispensable de prévoir tous les dangers de ce genre, — ce à quoi on arrivera par une étude géologique attentive, dont nous avons donné, plus haut, les règles générales — et d'y remédier, dans la mesure du possible, soit par des travaux de défense, tels que des barrages en béton, lorsqu'on en aura la facilité, soit même en recourant à la protection de la loi, qui a permis, dans certains cas, l'interdiction de tous travaux pouvant nuire à une source déjà existante.

Nous ne faisons ici que mentionner pour mémoire ce genre de questions ; car nous n'avons pas la compétence voulue pour traiter les intéressants problèmes juridiques, qui se posent à l'occasion des eaux minérales² et, en ce qui concerne la détermination pratique des périmètres de protection, lorsqu'ils ont été reconnus utiles, l'étude même du régime souterrain de la source, que nous avons

Les sources de la Bourboule, de Vichy, de Vals, et, récemment, de Saint-Romain, dans la Loire, ont donné des exemples mémorables, et parfois fort plaisants pour les spectateurs, de ces sortes de duels entre propriétaires voisins, cherchant à se subtiliser mutuellement les faveurs de la source thermale, en la fascinant par une dépression de plus en plus savante.

¹ La principale loi, qui protège les eaux minérales, est celle du 14 juillet 1856, complétée par le décret du 8-20 septembre 1856 (déclaration d'intérêt public, fixation du périmètre de protection, autorisation des travaux dans l'intérieur du périmètre, etc.). Un décret du 28 janvier 1860 est relatif à l'inspection médicale, un autre du 2 mars 1857 aux produits salins extraits des eaux minérales.

On sait que l'on distingue : 1° les sources simples, exploitées, sans protection spéciale, en vertu d'une autorisation du ministère du commerce ; 2° les sources déclarées d'intérêt public, et, enfin, 3° les sources munies, en outre, d'un périmètre de protection. Dans l'intérieur d'un tel périmètre, personne ne peut faire de travaux souterrains d'aucun genre sans l'autorisation ministérielle. Indépendamment ou en dehors de celui-ci, des travaux nuisibles à une source peuvent également être arrêtés par l'administration, si cette source a été déclarée d'intérêt public. La compétence des ingénieurs des mines, qui sont chargés en France de cette surveillance des eaux minérales, a été réglée par les décrets du 28 janvier 1860, du 14 avril 1869 et du 30 août 1871.

On trouvera des renseignements sur cette législation dans le dictionnaire de Durand-Fardel (1860) aux articles *autorisation*, *législation*, *périmètre de protection*, etc. L'article *législation* reproduit la loi de 1856 et les décrets consécutifs.

Voir encore, sur la législation des eaux minérales : FLICHE. *Régime légal des eaux de source et des eaux thermales*. — DE LAVIGNE. *La législation des eaux minérales en France*. — NADAULT DE BUFFON. *Traité des eaux de source et des eaux thermales*, considération sur le régime légal des eaux de sources naturelles et artificielles. — SABADEL. *La législation sur les eaux minérales*. — GUBLER. *Rapport général à M. le ministre de l'agriculture et du commerce sur le service médical des eaux minérales en France (1870-1874)*.

développée antérieurement, doit donner à peu près tous les éléments nécessaires : ce qu'il reste encore à en dire sera examiné à l'occasion du captage.

En particulier, pour les sources artificielles, alimentées, au moyen de sondages, par une nappe artésienne, nous avons vu ¹ quelle influence réciproque pouvaient avoir des forages voisins. Les cas de Vichy, Saint-Yorre, Vals, Pougues, etc., montrent assez à combien de contestations délicates peuvent donner lieu, en pareil cas, la protection du droit de propriété, la détermination du travail précis qui, entre plusieurs exécutés simultanément, a nui à telle ou telle source, la définition exacte de la *nappe* minéralisée, du bassin hydrothermal, etc.

Dans le même ordre d'idées, le captage doit être défendu extérieurement, non seulement contre les pertes d'eau chaude, mais aussi contre les infiltrations froides. Spécialement, lorsqu'on se trouve au voisinage d'une rivière ou d'un lac, ou encore quand on est dans un terrain crevassé, comme le sont souvent les calcaires, il y a là un péril, contre lequel il faut se prémunir. Mais c'est là un genre de travaux, pour la bonne exécution desquels le jeu des pressions hydrostatiques réciproques doit, presque toujours, intervenir et nous en renvoyons l'examen au moment où nous étudierons les procédés de captage fondés sur cette méthode ²

Quand une fissure accidentelle a ouvert une issue à la source thermale et a amené sa disparition ou sa diminution sensible et l'abaissement de son griffon, le premier remède est, évidemment, de la mettre à sec, pour la reconnaître et de l'aveugler, comme on le ferait pour la voie d'eau d'un navire : ou bien, provisoirement avec des tampons d'étoupe ; ou bien, plus solidement, avec du ciment.

Si l'on connaît l'issue nouvelle, que s'est frayée la source thermale, il est bon, en même temps, de lui opposer une surcharge de ce côté, soit en fermant complètement l'orifice, si l'on n'y voit pas d'inconvénient, soit, au moins, en surmontant ce griffon nouveau d'un tube piézométrique pour la mettre en charge, quand on désire conserver là une seconde source ³.

¹ Page 483.

Page 516.

Nous avons eu l'occasion de décrire (p. 484) le cas des sources de Pougues, où l'on avait créé une source nouvelle, moins minéralisée que l'ancienne par suite de son mélange avec des eaux froides, en sorte qu'on désirait, avant tout, remettre la source primitive dans son ancien état, mais où, néanmoins, on était bien aise de conserver, comme supplément, la source nouvelle.

Le plus souvent, ces simples moyens suffisent à remettre les choses en état; mais, parfois, l'abondance des venues d'eau thermale nécessite des mesures de défense plus considérables. Nous verrons, plus tard ¹, comment, à Teplitz, où la source thermale produisait une véritable inondation dans une mine, on a commencé par couper les galeries, où pénétrait l'eau, au moyen de barrages en maçonnerie, munis de clapets de retenue. Après quoi, une nouvelle inondation s'étant produite, on a dû, faute de pouvoir épuiser, percer des trous de sonde jusqu'à la chambre vide, par laquelle se produisait l'inondation et y couler, à distance, des masses de béton, jusqu'à ce que la fissure d'arrivée se soit trouvée aveuglée.

Dans certains cas, où l'on ne pouvait arriver à capter une source dans un terrain fissuré, on a été amené à couler un béton dans toutes les fissures et à percer ultérieurement un trou de sonde à travers ce béton.

Ce système, qui a été employé par François à Lamalou, peut même servir comme remède extrême pour protéger un trou de sonde, qui va chercher en profondeur une nappe thermale, contre les infiltrations d'une nappe d'eau douce superposée.

Celle-ci traversée une première fois, on coule un béton, à travers lequel on refore ensuite le trou de sonde jusqu'à l'eau thermale ²

¹ Page 537.

² Voir plus loin, p. 457, le cas de Sauerbrunn.

TROISIÈME PARTIE

DESCRIPTION DES DIVERSES MÉTHODES DE CAPTAGE

Nous avons déjà, antérieurement ¹, montré, par un tableau sommaire, quelles formes principales pouvait présenter, dans la pratique, le gisement d'une source thermo-minérale, en indiquant quel système de captage était, le plus généralement, appliqué pour chacune d'elles. Nous allons maintenant aborder l'étude des procédés de captage dans un ordre différent, en fondant notre classification, non sur les cas où l'on utilise telle ou telle méthode, mais sur les principes généraux qu'on y met en pratique. Ce seront donc ces principes mêmes, qui établiront les grandes divisions naturelles dans cette partie de notre travail.

La première distinction fondamentale à établir entre les divers procédés de captage consiste à séparer :

D'une part, ceux où l'on traite l'eau minérale absolument comme un minerai métallique, en allant la chercher, dans la fente filonienne où elle se trouve, par des travaux de mines plus ou moins complexes : excavations, puits, sondages, travers-bancs, galeries, etc. ;

D'autre part, ceux où l'on se fonde sur la nature spéciale de ce minerai, qui est l'eau thermale, pour l'attirer à soi, pour la faire venir en des points particulièrement favorables au captage, par le jeu des pressions et des dépressions : ces pressions et dépressions pouvant être réalisées d'une façon quelconque.

A cette dernière méthode se rattacheront, comme corollaire, tous les procédés de sondages portant sur les nappes thermo-minérales artésiennes, procédés qui consistent, en somme, dans la création d'une dépression au-dessus de cette nappe minérale, au point où le sondage est foré.

¹ Page 437.

Nous examinerons donc, en résumé :

CHAPITRE I. — *Méthodes de captage, où l'on atteint le griffon.*

CHAPITRE II. — *Méthodes, où l'on met en jeu les différences de pression sur le griffon et autour du griffon, pour attirer à soi l'eau thermale.*

CHAPITRE III. — *Recherche des sources thermo-minérales par sondages verticaux.*

CHAPITRE IV. — *Parties accessoires du captage. Captage des gaz. Protection contre les infiltrations froides.*

CHAPITRE PREMIER

MÉTHODES DE CAPTAGE OU L'ON ATTEINT LE GRIFFON

Les méthodes, que nous allons décrire dans ce chapitre, consistent toutes à aller chercher, par un travail de mine, la fissure hydrothermale, dont l'allure et le régime ont dû être antérieurement étudiés, ainsi que nous l'avons montré dans le premier livre de cet ouvrage.

Ce sont là évidemment les procédés de captage les plus simples et les plus élémentaires, dont l'invention a précédé de beaucoup celle des systèmes plus raffinés, examinés ultérieurement au chapitre II.

Leur emploi sera, tout naturellement, indiqué, quand on pourra atteindre et mettre à nu, sans trop d'efforts, la fracture géologique, par laquelle la source remonte au jour, de manière à l'isoler complètement des terrains encaissants, à la garder intacte et sans mélange, à la capter en un mot.

Au contraire, il est facile de concevoir, dès maintenant, qu'on rencontrera toute une série de circonstances, où leur application sera impossible : si l'émergence naturelle de la source se trouve, par exemple, au milieu d'épaisses alluvions, dans la berge d'une rivière, en sorte qu'il faudrait peut-être un puits de 100 ou 150 m., rendu pratiquement inexécutable par la présence de la rivière voisine, pour aller recouper en profondeur la roche en place.

Nous avons déjà vu comment le fait même que les eaux thermales viennent sourdre sur des points bas de la surface topographique les amène à se présenter, très fréquemment, au milieu de semblables terrains meubles : alluvions d'une rivière, éboulis d'un flanc de coteau, sables ou galets d'une plage, etc.

En pareil cas, il faut évidemment, puisqu'on ne peut plus aller chercher l'eau thermale dans son griffon en roche compacte, la décider à venir d'elle-même, tout entière et sans infiltration froide,

au point que l'on désire et, pour cela, faire intervenir le jeu des pressions, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

Entre ces cas extrêmes, il est toute une série d'exemples intermédiaires, où l'on pénètre aisément jusqu'à la fracture géologique du griffon, sans être gêné par les dépôts superficiels, mais où ce griffon se trouve dans un terrain fissuré, disloqué, parfois délitable, tel que des marnes, des schistes, ou même certaines roches plus compactes, mais crevassées en tous sens, comme tels calcaires et tels porphyres, dans lesquels il est très difficile d'arriver à le fixer et à le localiser.

Dans une pareille catégorie de gisements, qui s'est présentée, notamment, à Geleznovodsk au Caucase, à Vichy, à Bagnères-de-Luchon, etc., et, d'une manière différente, à Pougues ou à Vittel, le captage est loin d'être complet, quand on a enfermé les griffons reconnus dans une enceinte en maçonnerie, plus ou moins étanche : on peut être obligé, en outre, de faire intervenir déjà puissamment cet équilibre des pressions hydrostatiques, que l'ingénieur, chargé d'un captage hydrothermal, ne doit jamais perdre de vue, dans quelque cas que ce soit. Il en résulte donc, en pratique, un mélange presque constant et nécessaire des divers modes de captages, que nous allons distinguer, pour plus de clarté, dans notre étude. On s'en apercevra, d'ailleurs, aisément en retrouvant parfois, à plusieurs paragraphes distincts, la mention des mêmes sources.

Ces remarques faites, nous allons partir de quelques exemples extrêmement simples, où le captage a consisté dans le simple creusement d'une fosse ou d'un puits, au besoin avec diverses précautions spéciales contre les infiltrations froides, ou contre les pertes de gaz ; puis nous examinerons des sources, où l'on a travaillé par puits ou sondages et enfin nous arriverons aux types, déjà plus compliqués, des captages comportant de véritables travaux de mines, tels que galeries d'allongement¹, travers-bancs, sondages horizontaux, etc.

L'étude de ces captages types de différents genres² sera, pour

¹ Une galerie d'allongement, ou de direction, est, par définition, une galerie de niveau horizontale, tracée le long d'un filon, dans son plan. Un travers-bancs, également horizontal, est, au contraire, perpendiculaire à la direction du filon.

² Nous ne pouvons ici entrer dans de grands détails sur chaque captage ; mais les renvois et indications bibliographiques donnés en note permettront à ceux qui le désireraient de compléter nos indications sommaires, en recourant aux mémoires originaux.

nous, accessoirement, une occasion de préciser les conditions de gisement de certaines sources.

Nous prions, d'avance, les susceptibilités locales de vouloir bien nous excuser, si quelque type de captage, décrit comme employé dans une station thermale, y a été, dans la suite, remplacé par un autre plus perfectionné. Notre but n'est point de faire connaître ici les stations thermales, dont nous parlerons et encore moins de distribuer à leurs captages des critiques ou des éloges, mais simplement de montrer ce qui peut se faire dans tel ou tel cas, en disant ce qui, dans la réalité, s'est fait à une époque ou à une autre.

§ 1. — *Captages par fosses, excavations peu profondes, petits puits, courts trous de sonde, etc. — Exemples de Schinznach, Maizières, Bourbon-l'Archambault, Evaux, Néris, Châtelguyon, Vals, Alet, Karlsbad, Célestins de Vichy, Pfæfers, Geleznovodsk, Aulus, Vittel, les Fumades, Euzet, Saint-Gervais, etc.*

Dans tous les exemples, que nous groupons en ce paragraphe, les travaux d'excavation, destinés au captage de la source, ont toujours été de peu d'importance, presque superficiels, profonds au plus de quelques mètres et, par suite, exécutés, le plus souvent, par des moyens assez rudimentaires, sans forte machine d'épuisement, sans ventilation, etc., à peu près comme l'on opérerait pour capter une source d'eau douce.

Le principe général de ces travaux, qui est extrêmement simple, consiste, d'abord, à mettre à nu les fissures thermales, en enlevant la couche de terrains meubles et de terre végétale, supposée, par hypothèse, peu épaisse, puis à creuser dans la roche une chambre de moindre pression ou de drainage, consistant en une excavation de forme variable, suffisamment profonde pour y concentrer les griffons thermaux, enfin à protéger extérieurement ce captage contre les infiltrations froides par des enceintes en béton, garnissages, cuvelages, tubages, etc., dont nous indiquerons toute une série de systèmes.

Dans certains cas, comme ceux de Geleznovodsk, d'Evaux et de Néris, où le griffon capté domine une vallée en aval, vers laquelle des circonstances accidentelles pourraient aisément provoquer sa fuite, il a fallu adjoindre au captage ordinaire un système de défense spécial du côté de l'aval.

Enfin, pour appliquer ce mode de captage à des eaux gazeuses sortant de roches massives, on emploie des réservoirs fermés¹ ou des tubes ascensionnels d'un type spécial.

Nous allons, tour à tour, examiner des captages exécutés :

1° En roche solide, dans un simple cuvelage en bois : **Schinznach** (captage incomplet) ;

2° En roche solide, dans une fosse entourée d'un drainage superficiel : **Maizières** ;

3° En roche solide, dans une fosse creusée au milieu du gneiss compact et garnie de maçonnerie : **Bourbon-l'Archambault** ;

4° En roche solide, également dans une enceinte en maçonnerie à ciel ouvert, au milieu du gneiss ou du granite, mais avec une protection contre les fuites en aval : **Évaux, Nérís** ;

5° En roche dure fissurée, par de courts trous de sonde, allant chercher une eau gazeuse, éparpillée, au voisinage de la surface, dans les diaclases d'un granite ou d'un gneiss : **Châtelguyon, Vals, Alet**, etc. ;

6° En roche dure fissurée, par recoupe de dépôts de travertin, ou dégagement d'incrustations calcaires, déposées précédemment dans les fissures par les sources elles-mêmes : **Karlsbad, Célestins de Vichy**, etc. ;

7° En terrain fissuré, sous le lit d'un torrent, par tubages englobés dans un massif de maçonnerie et aboutissant au-dessus du niveau de l'eau : **Pfäfers** ;

8° En terrain fissuré, par un réservoir directement appliqué contre des griffons à flanc de coteau : sources froides de **Geleznovodsk** ;

9° En terrain fissuré ou meuble, par tranchée et puits sur le griffon, avec garnissage étanche : **Aulus** ;

10° En terrain fissuré ou meuble, par puits d'isolement enveloppant un tube ascensionnel : **Vittel, les Fumades** ;

11° En terrain fissuré ou meuble, par enceintes successives enveloppant le griffon : **Euzet, Saint-Gervais** ;

12° En terrain fissuré marneux, par une excavation, avec enceinte de maçonnerie fondée sur pilotis : **Geleznovodsk**, source Griaznouchka.

Dans tous les captages que nous décrivons ici, on applique, en somme, en plus ou moins grand, le procédé presque instinctif, qui consiste, lorsqu'on se trouve en présence d'une source naturelle, à lui creuser une cuvette, à en rassembler le plus possible les filets épars, à en élargir et désobstruer les orifices, ne fût-ce qu'en donnant quelques coups de pioche, ou en enfonçant dans la fissure thermale une barre à mine, pour lui donner du jeu.

Quand le terrain est extrêmement compact et la fracture hydro-

M. LAURANS (*Congrès de Clermont*, p. 177) cite, comme étant dans ce cas, *Marcols et Desaignes-César* (Ardèche), *Sail-sous-Couzan* et *Saint-Galmier* (Loire), sources très gazeuses situées sur le granite.

thermale absolument localisée, comme cela arrive dans certaines roches massives, granites non altérés, gneiss, etc., on peut parfois se contenter d'une tranchée rectangulaire de 2 ou 3 mètres de large, ayant sa plus grande longueur suivant l'allongement du filon et descendant à peine à quelques mètres de la superficie, avec un mur enduit de ciment sur chacun des quatre côtés.

Plus le terrain, au contraire, sera fissuré, poreux et, par suite, perméable aux eaux dans les deux sens, — soit, à partir de la source, dans le sens d'une fuite de l'eau thermale; soit, vers celle-ci, dans le sens d'une introduction d'eau froide, — plus le travail devra être profond et son enceinte rigoureusement défendue contre ces circulations intempestives par des barrages en béton.

Les travaux profonds se feront, de préférence, à la barre à mine et au pic. Les explosifs, pouvant toujours amener une fissuration des roches, ne doivent être employés qu'avec beaucoup de réserve et de prudence.

Enfin, dans les terrains difficiles, on pourra, comme nous l'avons dit, compléter ces procédés sommaires par l'emploi plus ou moins étendu des méthodes fondées sur la pression, qui font l'objet du chapitre second.

CAPTAGE DE SCHINZNACH (ARGOVIE, ¹ — Source dans une large vallée d'alluvions, au voisinage d'un torrent. — Captage incomplet, par cuvelage en bois, avec pompage à force pour éviter la perte des eaux chaudes.

La source de Schinznach sort, au voisinage de l'Aar, d'une faille qui met en contact le trias et le lias. Elle a été captée par un simple cuvelage en bois (fig. 71).

Ce cuvelage est elliptique (2,12 m. sur 2,80 m.) et d'une épaisseur de 0,25 m. Il est fermé, à sa partie supérieure, par un couvercle de bois. L'eau thermale est puisée dans le cuvelage par une pompe, qu'actionne une roue hydraulique et envoyée dans des réservoirs, d'où elle se rend aux bains.

Cette source subit, tout naturellement, l'influence du niveau de l'Aar, qui est parfois plus élevé que le sien; on voit alors, à la fois, le débit augmenter et la minéralisation diminuer. Le phénomène inverse, que l'on eût pu redouter pour une source semblable, — à savoir la fuite, vers l'Aar, d'une partie des veines sulfureuses, —

¹ Voir p. 175 et 337; bibl., p. 337.

est rendu plus difficile par l'usage des pompes, qui créent une dépression sur le griffon.

Il est évident qu'un tel système de captage est très incomplet et

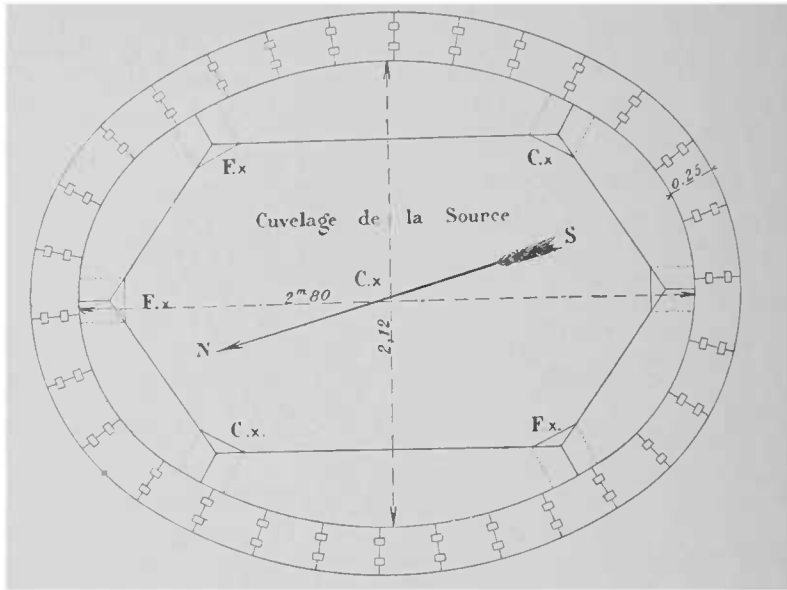


Fig. 71. — Plan du cuvelage de la source de Schinznach (Argovie)
(d'après M. Grandeau).

demanderait à être perfectionné par l'emploi des pressions hydrostatiques réciproques, comme nous en verrons des exemples à Ussat.

CAPTAGE DE MAIZIÈRES (CÔTE-D'OR)¹ — *Source froide émergeant, au fond d'une vallée, sous 1 m. d'alluvions. — Captage par simple fosse creusée dans le rocher, avec protection superficielle contre les infiltrations des terrains voisins.*

La petite source de Maizières, commune de Magnien (Côte-d'Or), que nous avons pu étudier en 1889, présente, comme bien des sources françaises, un captage romain.

Elle émerge de la microgranulite (fig. 72), sur le bord d'un massif de cette roche encaissé dans les tufs porphyritiques du culm, au voisinage d'un filon transversal de porphyre à quartz globulaire. La forte proportion de lithine, qui est le trait caractéristique de cette source chlorurée sodique (3,64 de résidu par litre, dont 2,77 de NaCl, 0,25 de KCl et 0,069 de LiCl) laisserait supposer une

relation avec un grand massif de granulite à micas blancs lithini-
fères, situé au S.-E.

Le captage antique (fig. 73 et 74) consiste dans une fosse de

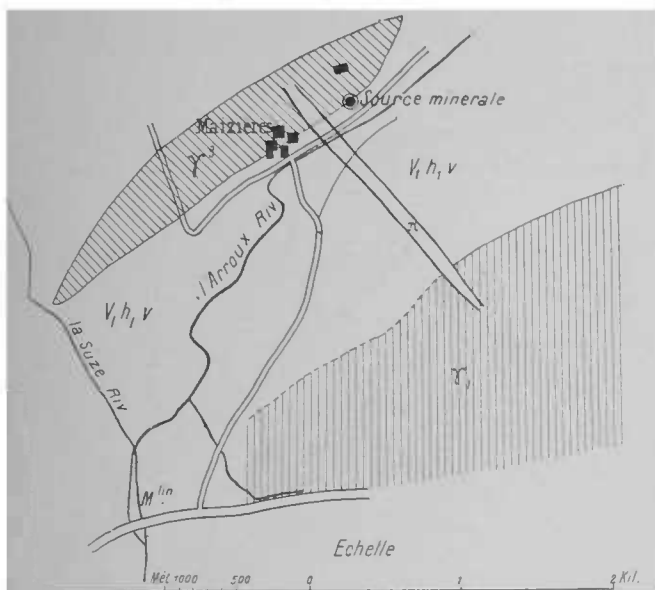


Fig. 72. — Croquis montrant la situation géologique des sources de Maizières.

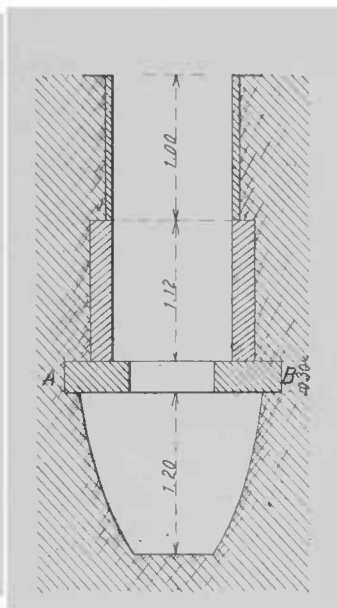


Fig. 73. — Coupe verticale du captage de la source de Maizières.

1,20 m., creusée dans la microgranulite : fosse, où la source débouche par des diaclases de la roche. Cette fosse ACOO est recouverte d'une dalle ABCDE en grès de 0,20 m. à 0,30 m.¹ munie d'une ouverture demi-circulaire ABC, de 1 m. de diamètre, sur laquelle s'élève un puits rectangulaire en maçonnerie MNPQ.

Le captage est complété par un drainage, fait tout autour du puits, de manière à isoler la source d'un pré marécageux qui l'environne.

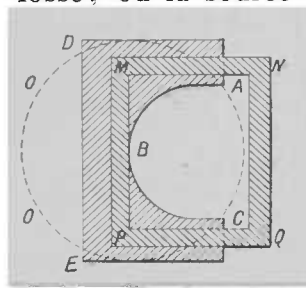


Fig. 74. — Plan du captage de Maizières.

CAPTAGE DE BOURBON-L'ARCHAMBAULT (ALLIER)². — *Source thermique, non gazeuse, arrivant à la surface par une fissure d'une roche solide (gneiss), à un niveau assez bas pour nécessiter l'emploi*

¹ Cette dalle est creusée, à sa partie inférieure, de plusieurs rainures, dont l'origine est peut-être purement accidentelle. Si elles ont eu pour but un détail de captage, ce pourrait être pour drainer les gaz dégagés par l'eau.

² Voir, plus haut, p. 64, 69, 102, 126, 147, 154, 162, 166, 168, 180, 255, 283; et fig. 9 p. 63.

de pompes, mais avec un débit suffisamment accru par le pompage, pour qu'on ait pas eu à se préoccuper de faire des travaux de drainage sur le prolongement du filon.

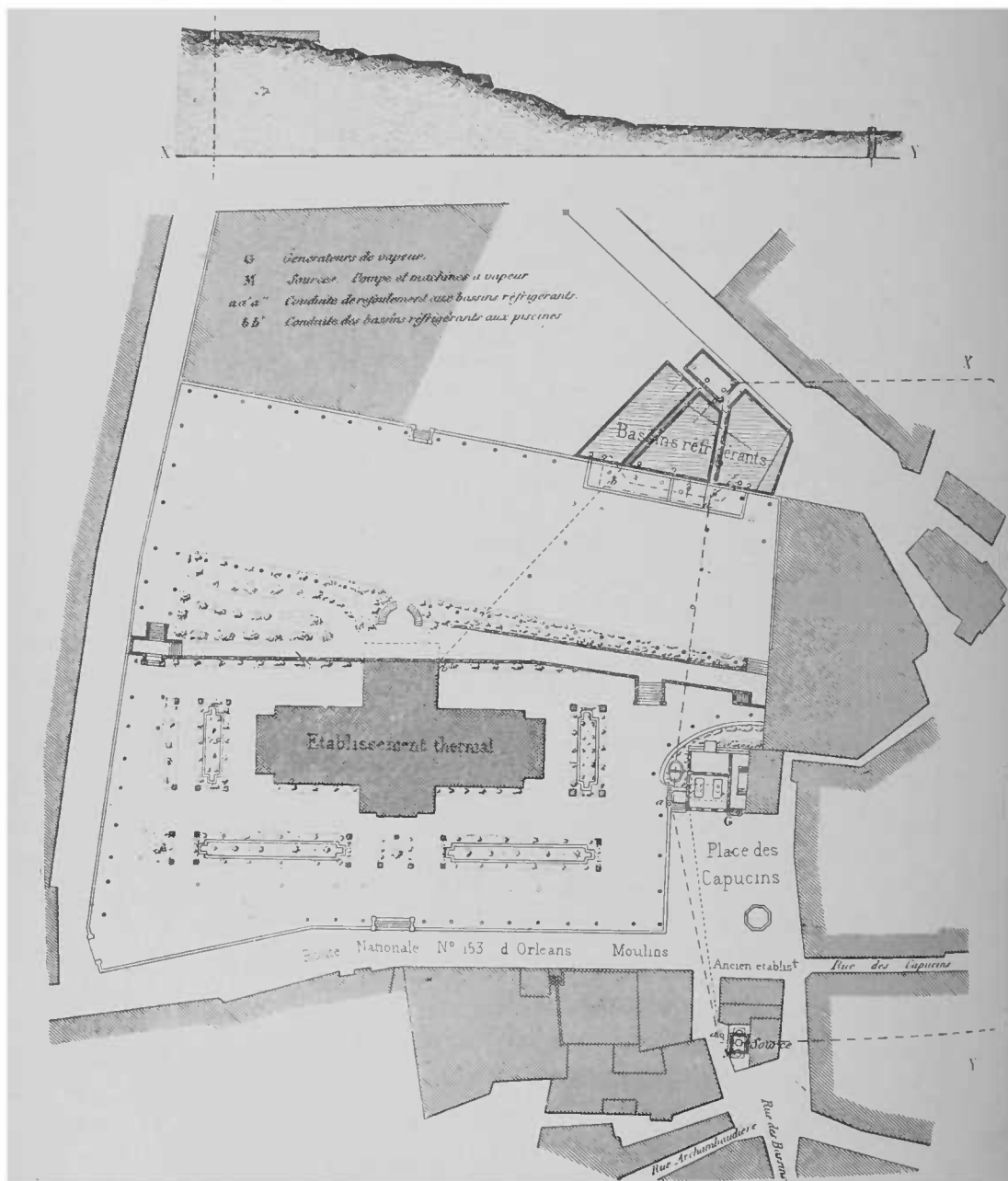


Fig. 75. — Plan général et profil en long des installations de captage et d'exhaussement à Bourbon-l'Archambault.

Echelle de 0,60 par mètre.

La source de Bourbon-l'Archambault (fig. 75) sort, comme nous l'avons vu, au fond d'un entonnoir (qui constitue, pour toute la région, une zone de moindre pression), le long d'un filon ancien, recoupant le gneiss. Sur le trajet de ce filon, les sources se trouvent naturellement localisées dans l'espace très restreint, occupé par un petit vallon latéral du ruisseau, la Burge. Au sud, la dépression

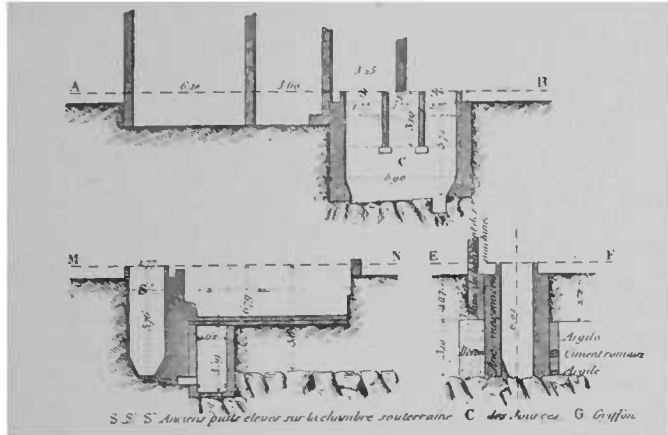


Fig. 76, 77 et 78. — Coupes suivant AB, EF et MN (fig. 79).

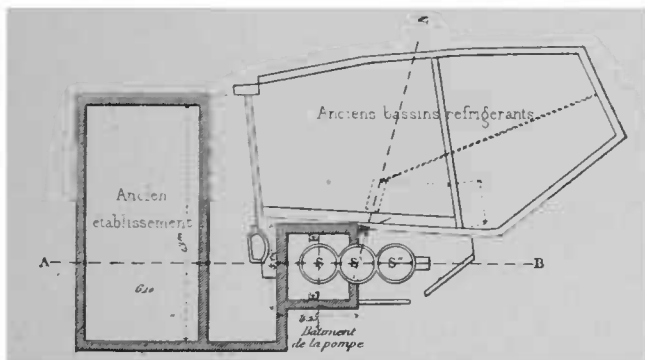


Fig. 79. — Plan du captage des sources de Bourbon-l'Archambault.

occupée par le gneiss est immédiatement dominée par des coteaux permien, que traversent des veines de silice, barytine et fluorine, en relation avec la fissure thermique¹; au nord, après avoir recoupé un coteau de 25 m. de hauteur, où ont été construits les bassins réfrigérants, le filon disparaît sous un étang d'un kilomètre de long, qui, retenu artificiellement par un barrage pour le service d'un moulin, doit contribuer indirectement par sa pression à concentrer les eaux dans une source unique.

¹ Comparer ce que nous avons dit plus haut, p. 283, des sources de Luxeuil et de Bains.

Dans ces conditions particulièrement simples, un travail de captage, qui remonte à l'époque romaine, a consisté à creuser, sur le filon thermal, une fosse rectangulaire de 5,70 m. de profondeur, 5,90 m. de long et 1,80 m. de large (fig. 76 à 79), dont on a garni les parois d'un béton étanche.

Par une disposition assez originale, on a, sur cette fosse, placé trois puits cylindriques en maçonnerie contigus S, S', S'' qui en occupent toute la largeur, mais, en profondeur, s'arrêtent à 2,70 m. du fond. Peut être a-t-on voulu, par une idée bien erronée, établir là, au-dessus des griffons, des sortes de tuyaux d'aspiration, qui n'exercent, en réalité, aucune influence sur le régime des eaux.

Le volume total de cette chambre de captage est de 51 m³.; le débit de la source est, à l'émergence, quand la chambre est mise à sec, de 1 000 m³ par vingt-quatre heures; avec une hauteur d'eau de 5 m. il se réduit à 270 m³.

Le captage romain avait été garni, jusqu'au rocher, de béton, avec des revêtements extérieurs en terre glaise, de manière à isoler complètement cette chambre thermale.

Dans les travaux de réfection, qui furent exécutés en 1884, on porta l'épaisseur de béton et maçonnerie, dans toute la partie inférieure, à 2 m. et on la recouvrit, avec des précautions spéciales, d'une couche de ciment de 0,05 m. d'épaisseur¹.

L'eau est pompée de cette chambre, ainsi que nous le dirons² et refoulée sur le haut d'une petite colline voisine, vers des bassins réfrigérants (fig. 75), d'où elle redescend, sous pression, à l'établissement.

CAPTAGE D'ÉVAUX (CREUSE)³. — Source thermale, non gazeuse, arrivant au jour par une fissure d'une roche solide (gneiss), le long d'un filon de quartz, dans un vallonnement secondaire, sur le flanc d'un coteau. — Eaux surabondantes pour les besoins, permettant un captage sommaire

La source d'Évaux arrive au jour en plein massif de gneiss, le long d'un filon de quartz, connu sur plus de 20 km. de longueur, à l'extrémité nord de ce filon, qui est, en même temps, sa partie la plus déprimée. La surface du quartz constitue, évidem-

¹ Ces travaux de réfection ont coûté 2 000 francs.

² Page 596.

³ Voir plus haut, p. 64, 69, 82, 102, 130, 168, 234, et fig. 29, p. 233.

ment, un plan de drainage, le long duquel il doit subsister d'assez larges cassures ouvertes ; car les eaux sourdent avec une grande abondance et, bien qu'il existe, à peu de distance du filon, des points plus bas que leur griffon naturel, n'ont qu'une faible tendance à s'y diriger. Au lieu de sortir en *f* par exemple (fig. 29, p. 255), elles arrivent en *b, c, d* et la pression hydrostatique, aussi bien que la température et la minéralisation, diminuent très rapidement de *b* en *d* : ce qui montre que les sources *c* et *d* sont alimentées par des branchements très superficiels des sources *b*. Le fait est d'autant plus frappant que la schistosité des gneiss, dirigée suivant le plan même de la coupe, et le thalweg du petit ravin secondaire, où jaillit la source, transversalement au quartz, favoriseraient un épanchement vers *d* ou *f*.

Le captage, qui remonte entièrement à l'époque romaine, a consisté à creuser, à l'aplomb des griffons naturels *b'c'd'*, une grande tranchée de 13 à 15 m. de profondeur maxima, 60 m. de long et 60 m. de large, en s'approfondissant spécialement sur les émergences thermales. Après quoi, on a nivelé le sol, de *b* en *d*, au moyen d'un revêtement de béton, qui atteint jusqu'à 3,50 m. d'épaisseur autour des sources et l'on a ménagé, dans ce béton, sur les sources, des cheminées d'ascension, sous forme, soit de puits en maçonnerie, soit de simples tuyaux de plomb verticaux. Les sources arrivent au jour dans des bassins avec déversoirs et elles y débouchent, en *b*, avec une pression telle que l'on a pu autrefois (par une disposition, d'ailleurs, tout à fait irrationnelle) placer, sur certaines d'entre elles, des tuyaux de fonte verticaux d'environ 3 m. de haut, destinés à alimenter directement les réservoirs des douches.

Comme le montre la figure 29, ce captage ne peut, d'ailleurs, être suffisant que parce que la fissure *aa* est assez large et, au contraire, la roche dans le sens *af* assez compacte, pour que la vallée *f* ne produise pas un drainage des eaux chaudes. Il n'est pas impossible, en outre, que d'anciens bétons romains jouent un rôle de protection ignoré. Dans un terrain plus fissuré, il aurait été, probablement, nécessaire d'amener la source en *f* par un travers-bancs, allant de ce point vers le filon.

Telles que sont les choses, on pourrait, au besoin, augmenter le débit des sources, soit simplement, en mettant des pompes sur les sources *b*, soit en creusant, au niveau du captage actuel, une galerie allant de *b* vers le filon.

CAPTAGE DE NÉRIS (ALLIER)¹ — *Mêmes conditions qu'à Evaux, avec nécessité d'eaux plus abondantes.*

Tandis que la plupart des sources thermales arrivent au jour, ainsi que nous l'avons vu, dans le fond d'un ravin ou au pied d'un coteau, les eaux de Nérès, comme celles d'Evau, présentent cette anomalie de sourdre, à flanc de coteau, à une altitude assez élevée au-dessus de la vallée voisine, — qui, ici, est le Cher, — située près de 200 m. plus bas. Le fait est d'autant plus frappant que ces sources sont en relation à peu près certaine avec des filons de quartz à fluorine, dont la direction, prolongée au nord, va précisément vers la vallée du Cher, dans le sens de Montluçon. Nous l'expliquons par l'existence d'un filon de quartz perpendiculaire et plongeant au nord, dont l'intersection avec les premiers doit déterminer une colonne de moindre pression, de drainage hydrostatique, le long de laquelle remontent les sources; en même temps, ce filon peut, dans une certaine mesure, jouer le rôle d'un barrage.

Quoi qu'il en soit, le griffon des sources est nettement localisé et la dépression, où il se trouve, n'ayant à l'aval qu'une pente très faible, on n'a pas, comme à Evau, la crainte possible d'une perte des eaux dans ce sens. Tout au plus, devrait-on redouter un travail de mine, venant, de ce côté, recouper le quartz transverse.

Là encore, le captage remonte à l'époque romaine et paraît avoir consisté dans l'établissement d'un revêtement de béton horizontal, avec cheminées à l'aplomb des griffons principaux.

Des pompes, placées sur les sources, en augmentent, aujourd'hui, le débit et envoient les eaux trop chaudes dans des bassins réfrigérants, situés au flanc d'un coteau voisin, d'où elles redescendent, sous pression, pour le service des douches.

CAPTAGE DE CHATELGUYON (PUY-DE-DOME)². — *Sources gazeuses, émergeant, au fond d'un ravin, par des fractures multiples d'un granite. — Captage par petits trous de sonde. — Précautions pour recueillir les gaz.*

Ce cas se distingue surtout des précédents, en ce qu'on a affaire à des eaux très gazeuses, dont la richesse en acide carbonique fait une grande partie de la valeur : par suite, tous les détails de cap-

Voir plus haut, p. 64, 102, 168, 254, 285; bibl., p. 254.

Voir, plus haut, p. 69, 74, 169, 259, et fig. 31, p. 260.

tage ont dû être subordonnés à la conservation de ces gaz. Nous allons donc examiner les dispositifs spéciaux, adoptés pour recueillir les gaz ; mais nous voulons, en outre, attirer l'attention sur l'emploi, dans cette circonstance, non plus d'excavations ou de puits, mais de simples petits trous de sonde, correspondant, en somme, avec un peu plus de régularité, aux quelques coups de pic ou de barre à mine, qui servent, si souvent, nous l'avons dit, à réunir les eaux thermales dans une fissure élargie ¹

Les sources de Chatelguyon jaillissent, comme cela a été précédemment expliqué ², des diaclases d'un granite, au voisinage d'une faille, qui paraît les amener de la profondeur. L'étude de ces diaclases et la détermination de leur position par des lignes de petits sondages à la barre à mine, puis par des tranchées, a donc été le point de départ du captage.

Si l'on avait pu utiliser les sources sur place, ces trous de sonde auraient, à eux seuls, constitué un captage ; mais il s'agissait de recueillir l'eau et de la transporter, à une certaine distance, en prenant les précautions nécessaires pour éviter les brusques coups de bélier, dus au dégagement intermittent des gaz.

Pendant longtemps, on avait adopté un procédé vicieux, consistant à coiffer le griffon d'une cloche en plomb, appliquée sur la roche par un battage et englobée dans un massif de béton : cette cloche portait, à sa partie supérieure, un tuyau de conduite, menant au lieu d'emploi, généralement plus élevé que la source, en sorte que celle-ci se trouvait constamment surchargée et avait une tendance à s'échapper ailleurs.

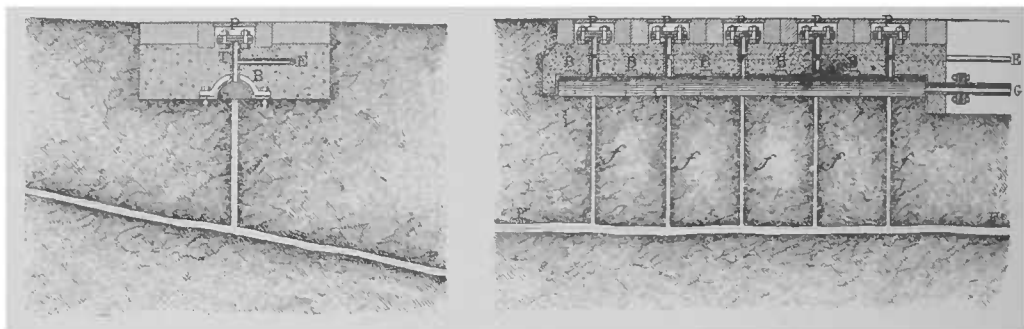
En 1882, M. Caméré modifia ce système, de façon à le rendre plus rationnel. Ayant fait niveler la roche sur 0,30 m. de chaque côté des sondages, il les coiffa, comme dans la méthode précédente, d'une conduite en plomb C demi-cylindrique, appliquée sur la roche par ses bords inférieurs repliés horizontalement et assujettie, en outre, par des colliers de fer B vissés, au moyen d'écrous, sur des crampons scellés dans le rocher (fig. 80 et 81). Mais, au lieu de laisser en charge, dans cette conduite, un mélange tumultueux d'eau et de gaz, il plaça, sur la conduite, au droit de chaque forage, des tubulures verticales T, surmontées de plaques pleines mobiles P et reliées entre elles par une conduite en plomb E de 0,27 m. de diamètre

¹ Nous reviendrons dans un chapitre spécial, p. 533, sur tout ce qui concerne l'application des sondages aux sources minérales.

² Page 259.

intérieur, de telle sorte que les gaz en excès pussent s'échapper librement par la conduite E, tandis que l'eau minérale s'écoulait en G. Ces deux conduites arrivaient alors séparément dans le réservoir d'emmagasinement.

Tout l'ensemble fut, d'ailleurs, surmonté d'un massif de béton de ciment de 2 m. de largeur, avec revêtement en maçonnerie,



Coupe en travers.

Coupe en long.

Fig. 80 et 81. — Type de captage par cloche longitudinale pour eaux minérales gazeuses (d'après M. Caméré).

Echelle de $\frac{1}{110}$.

FF, filon d'eau minérale dans la roche. — *f*, forages pour atteindre le filon. — *C*, cloche longitudinale en plomb. — *B*, brides d'attache. — *T*, tubulures pour visite des forages. — *p*, plaques pleines, fermant les tubulures. — *E*, conduite collectrice des gaz. — *G*, conduite des eaux.

appareillée de manière à laisser apparentes les plaques pleines des tubulures et à permettre ainsi de venir les dégager de leurs incrustations calcaires¹.

CAPTAGES DE VALS (ARDÈCHE) ET D'ALET (AUDE)² — *Forages peu profonds dans la roche dure fissurée, pour captages d'eaux gazeuses.*

A Vals, les eaux carbonatées gazeuses sortent des fractures du gneiss. On va chercher les filets thermaux par des forages de 10 à 30 m. de profondeur, que l'on coiffe d'une cloche en ciment, formant réservoir fermé et munie de robinets pour le puisement de l'eau minérale.

La figure 82 montre, d'après M. Laurans³, la disposition adoptée pour une source de Vals, dont le forage avait recoupé 7 m. d'al-

¹ On verra plus loin, p. 586 et fig. 139, comment se fait la reconstitution de l'eau gazeuse au point d'arrivée.

² Voir, plus haut : sur Vals, p. 65, 69, 108, 273, avec bibl., p. 273 ; sur Alet, p. 168, 313, 320, avec bibl., p. 320.

³ *Congrès de Clermont, 1897, loc. cit., fig. 2.*

lutions, avant d'arriver au gneiss. On y voit le tube ascensionnel du sondage, entouré d'une colonne en ciment.

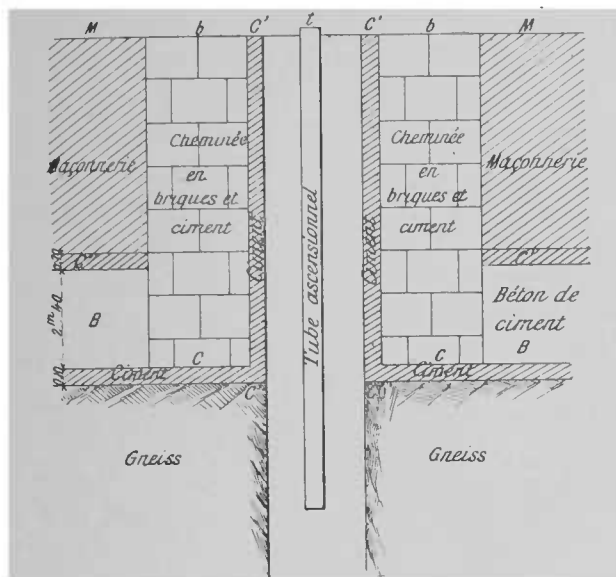


Fig. 82. — Coupe théorique du mode de captage employé à Vals (d'après M. Laurans).

t, tube ascensionnel en fer galvanisé de 0, 10 m.

CC, couche de ciment de 0, 10 m., au fond d'un avant-puits sur la roche.

bb, cheminée en briques et ciment.

C'C', colonne en ciment de 0,15 m. entre la cheminée et le tube ascensionnel.

BB, béton de ciment, surmontant la couche CC et épais de 2, 40 m.

C' C', couche de ciment de 0, 10 m.

MM, maçonnerie de chaux et sable.

La source *Buvette d'Alet* (fig. 83), dont nous empruntons également la description à M. Laurans, a été captée par un tube incliné TT, qui part du fond d'un réservoir R, creusé dans les alluvions de l'Aude jusqu'à la roche solide et plonge dans une fissure de la roche.

On a enfoncé ce tube le plus profondément possible ; on a placé, à l'intérieur, un tube annulaire *aa* ; on a rempli l'espace intermédiaire de ciment et, enfin, on a enveloppé la tête d'un radier en ciment *cc*. Puis, on s'est défendu, contre les eaux superficielles, par une seconde enceinte en ciment S, enveloppant le premier réservoir R.

CAS DE DIVERSES SOURCES CARBONATÉES CALCAIRES : KARLSBAD, CÉLESTINS DE VICHY, ETC. — Sources incrustantes, obstruant elles-mêmes leur émergence. — Recoupe superficielle des travertins déposés, ou élargissement des fissures incrustées.

Nous avons vu, précédemment¹ combien c'était la loi normale et souvent prompte des sources incrustantes de construire elles-mêmes, sur leurs griffons, des cheminées piézométriques, ou de déposer des bancs de travertins, ou encore, plus simplement, d'incruster leurs conduites souterraines et nous avons dit comment, pour ces sortes de sources, il en résultait un déplacement

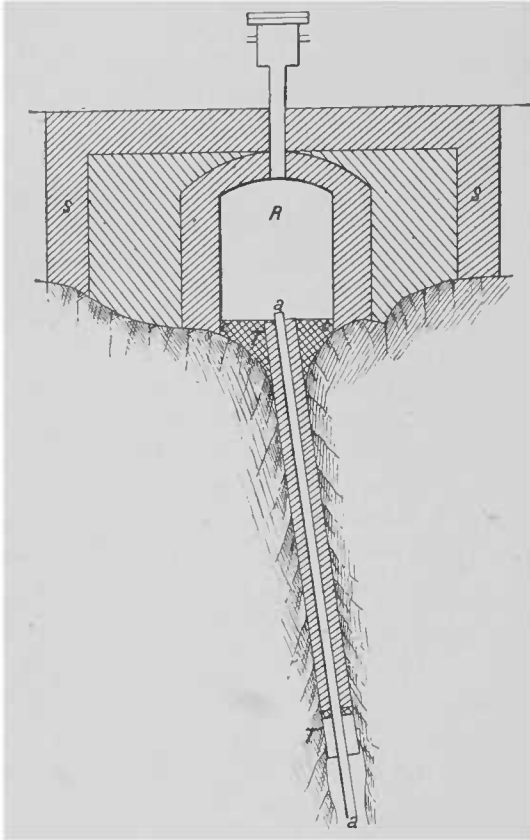


Fig. 83. — Coupe théorique d'un mode de captage employé à Alet (d'après M. Laurans).

progressif des griffons, parfois même leur disparition complète.

Le remède à un état de choses, dont on connaît aussi exactement la raison, s'indique de lui-même : il suffit, au-dessus de l'ancien griffon obstrué, de faire un trou de sonde, qui aille rouvrir une libre issue à la nappe thermique, emprisonnée en profondeur et reconstitue, approximativement, le régime hydrothermal primitif.

C'est ce que l'on a eu plusieurs fois l'occasion de faire pour les eaux de Karlsbad, dont nous avons décrit plus haut l'émergence² et, notamment, pour le Sprudel ; c'est ce qui, pour quelques-unes de ces eaux, s'est même produit accidentellement, par une tranchée, qui est venue

recouper à l'improviste, les venues chaudes³.

On peut faire rentrer, dans ce cas, celui du fameux filon de travertin des Célestins à Vichy⁴ qui représente, évidemment, le remplissage d'une ancienne fracture thermique, d'abord incrusté au milieu des marnes, puis mis à nu par la désagrégation superficielle

¹ Pages 76 et 140.

² Pages 291 à 300.

Pages 298.

Voir, plus haut, sur Vichy, p. 261 à 268 et, sur le filon des Célestins, p. 266.

de ces marnes et qui, d'après son importance, a dû correspondre, anciennement, à l'un des principaux points d'émergence naturels de Vichy.

Divers travaux de perforation, faits dans ces dernières années, ont considérablement accru le débit des sources, dont les émergences s'étaient peu à peu appauvries le long de cet ancien filon et sur lesquelles le voisinage de la nappe froide de la rivière Allier finissait par exercer une influence fâcheuse.

CAS DE PFÆFERS (GRISONS) ¹ — *Captage de griffons adventifs, sous le lit d'un torrent très encaissé, dans un terrain fissuré*

A Pfæfers, les procédés de captage, quoique assez simples en somme, sont pourtant fondés sur l'application de principes divers, notamment sur le percement d'une galerie de mine et sur la réalisation d'une charge constante au moyen d'une nappe d'eau. Nous en renvoyons donc la description à un chapitre ultérieur ² ; mais nous voulons seulement ici les mentionner, comme un exemple de captage fait sous le lit même d'un torrent.

La fissure thermale de Pfæfers recoupe, en effet, transversalement la gorge, profondément encaissée, du torrent la Tamina et quelques griffons naturels se trouvent sous ce torrent en *c*, *d*, *e* (fig. 97 et 98, p. 521).

Pour les recueillir, on a dû mettre le torrent à sec et déblayer les galets de son fond ; puis, on a capté les griffons, comme on l'eût fait sur le sol, en les concentrant dans de petites cuvettes, entourées d'une enceinte de béton et (ce qui constitue le détail particulier de ce captage) on a surmonté chacune des venues chaudes *c*, *d*, *e*, d'un tuyau *cc'*, *dd'*, *ee'*, enfermé dans un massif de maçonnerie, de manière à les rendre indépendantes du torrent, qu'on a laissé ensuite reprendre son cours naturel, par-dessus un radier en béton, protégé par des enrochages.

Un pareil procédé n'a pu évidemment s'employer à Pfæfers que parce que le lit du torrent est très resserré et l'alluvion très peu épaisse. Si la rivière avait été très large, ou la profondeur des alluvions considérable, on eût été obligé de recourir, plus exclusivement, aux pressions hydrostatiques réciproques.

¹ Voir p. 69, 74, 115, 191, 195, 197, 337.

² Voir plus loin p. 501, fig. 97 et 98, et p. 521. — L.-D. LAUNAY. *Les Eaux minérales de Pfæfers-Ragatz* (Ann. d. M. fév. 1894).

CAPTAGE DE GELEZNOVODSK (CAUCASE) (Sources froides)¹. — *Captage d'une source sortant du flanc d'un coteau, par réservoir directement appliqué sur le griffon.*

A Geleznovodsk (Caucase) (fig. 84), des sources thermales sortent des diaclases d'un massif de porphyre pétrosiliceux tertiaire, la Geleznaïa-Gora (montagne de fer), enveloppé de couches éocènes. Elles forment, au sud-est et à l'ouest, deux groupes, qui, depuis

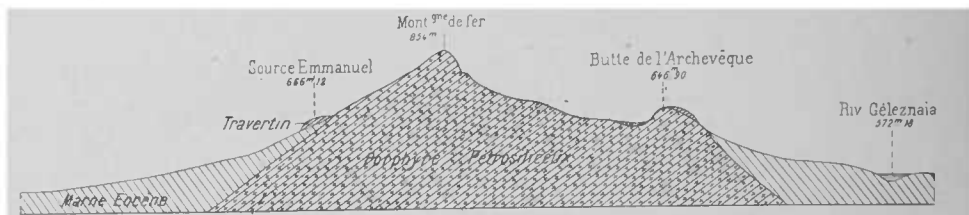


Fig. 84. — Geleznovodsk. Coupe géologique N. 40° O. de la source Emmanuel à la riv. Geleznaïa, passant par la Montagne de fer (d'après M. Dru).

des temps très anciens, ont déposé d'épaisses couches de travertins (parfois superposées à d'anciennes alluvions des pentes).

Ces sources chaudes donnent lieu à des épanchements latéraux souterrains, localisés à la base du travertin même, qu'ils ont déposé autrefois et qu'ils traversent encore en jaillissant, dès qu'on leur ouvre une issue par un sondage.

Ce travertin joue, par rapport aux eaux, le rôle d'une couche réfrigérante et, principalement aux points où il est le plus épais, on obtient des eaux minérales froides, qui servent, par mélange avec les eaux chaudes de même composition, à les refroidir sans les dénaturer et qui, en outre, jouissent de certaines propriétés spéciales.

Après avoir reconnu, au moyen de sondages de 10 à 15 m. de profondeur (fig. 85) le point le plus favorable pour capter ces eaux froides, M. Dru a proposé (fig. 86) d'entamer la pente du coteau par une excavation profonde et reposant sur les marnes dures, sur lesquelles on élèverait un réservoir rectangulaire, recevant directement les eaux par une série de conduits *aa*, *bb*, *cc*, *dd*, formant appel et drainage pour le terrain encaissant.

Ce réservoir est divisé en deux compartiments, séparés par une cloison étanche; l'espace, compris entre la cloison et le mur d'escarpe du talus, contre lequel le réservoir est appuyé, forme la

¹ Voir, plus haut, p. 52, 141, 377 et, plus loin, p. 483, 504, 559.

galerie de réception des eaux minérales, ou le collecteur, dont l'écoulement dans le réservoir proprement dit a lieu par des robi-

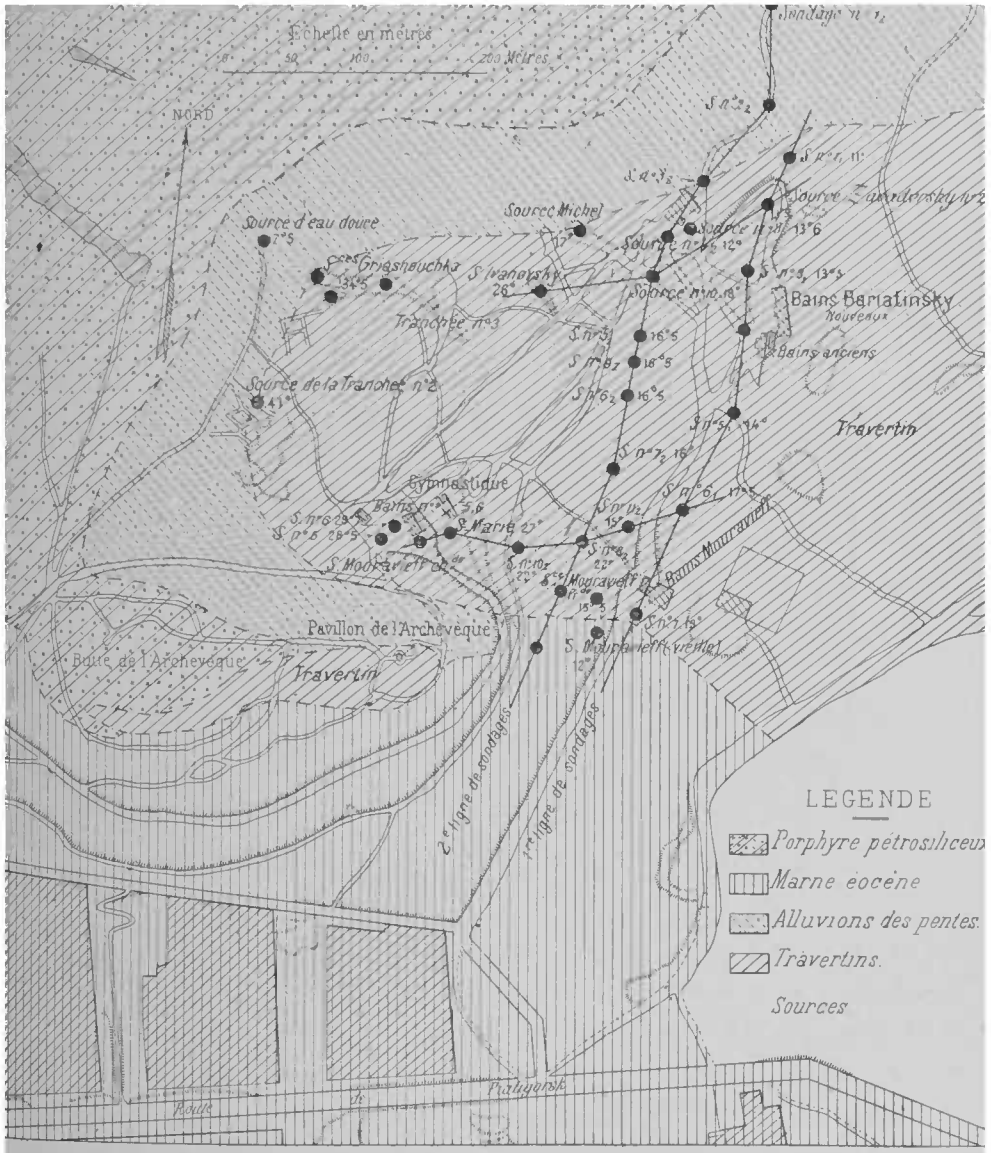


Fig. 85. — Geleznovodsk. Plan général du sous-groupe de l'Est, d'après M. Dru, avec les sondages exécutés par ce dernier en 1882.

nets vannes, qu'on peut régler à volonté. Cette galerie, faisant fonction de décanteur, possède une vidange, afin de permettre d'évacuer les parties meubles de terrain, que les eaux entraînent et d'empêcher leur introduction dans le réservoir principal.

La construction comporte une chambre d'accès, où sont groupés l'indicateur du niveau de l'eau, les conduites de vidange et de distribution. Quant aux eaux du trop-plein, elles sont réunies et conduites dans un égout.

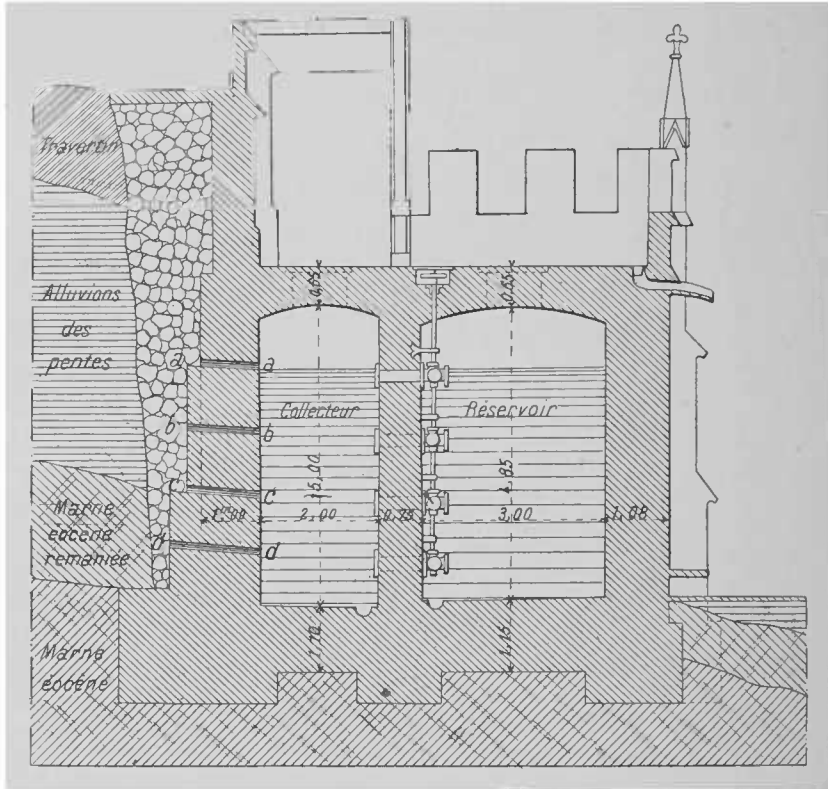


Fig. 86. — Geleznovodsk. Sous-groupe de l'Est. Captage des eaux minérales froides. Coupe d'un réservoir (d'après M. Dru).

CAPTAGE D'AULUS (ARIÈGE) ¹ — *Source en terrain très meuble. — Captage par tranchée et puits sur les griffons, avec garnissage étanche.*

Les sources d'Aulus émergent d'un terrain meuble, épais d'au moins une dizaine de mètres. Pour les capter ², M. Peslin (1872) a commencé par creuser une grande tranchée, de manière à mettre en évidence cinq groupes de griffons principaux, sur lesquels on s'enfonça alors par de petits puits. Toutes les parois des excavations furent ensuite revêtues d'un garnissage étanche, les puits cimentés,

¹ Voir p. 102 et 321 ; bibl., p. 321.

² Voir LAURANS. *Congrès de Clermont*, 1897.

le sol de la tranchée couvert de béton, ses parois garnies de murs en maçonnerie hydraulique, derrière lesquels on coula des bétons et l'on recouvrit l'ensemble d'une voûte.

C'est, en somme, le procédé de captage en roche solide, appliqué, dans un terrain meuble, avec quelques légères modifications.

CAS DE LA RÉGION DE VITTEL ET CONTREXÉVILLE (VOSGES)¹ — *Captage par sondages peu profonds, enveloppés d'un puits d'isolement.*

Dans la région de Vittel et Contrexéville, les eaux thermales sortent des fissures du muschelkalk, recouvert par une nappe d'argile, au-dessus de laquelle coulent les eaux froides.

On obtient aisément une source thermique par un puits ou un sondage, atteignant le muschelkalk, à travers l'argile ; mais il reste à se garantir contre les eaux froides : ce que l'on fait souvent par un puits d'isolement, avec colonne ascensionnelle, au milieu d'une semelle de béton.

La figure 87 représente le puits de la source Lecler, où l'on a, d'abord, établi un cuvelage métallique étanche, avec boîte à mousse ; puis, coulé, entre ce cuvelage et le puits, du béton de ciment.

Au fond du puits, est un radier de ciment, traversé par une colonne en poterie, qui sert à l'ascension de l'eau minérale.

Ailleurs, aux *Fumades* (Gard), on a, dans un semblable puits d'isolement, placé un captage tubulaire, analogue à ceux que nous décrivons pour les sondages.

A *Pougues* (Nièvre), les sondages, que nous avons déjà étudiés², vont rechercher, de même, une venue hydrothermale, qui, partant d'une fracture profonde, s'épanche dans les fissures multiples d'un banc de calcaire horizontal ; mais les précautions, nécessitées par le danger d'infiltrations froides, ont été là d'un type plus complexe, sur lequel nous n'avons pas à revenir³

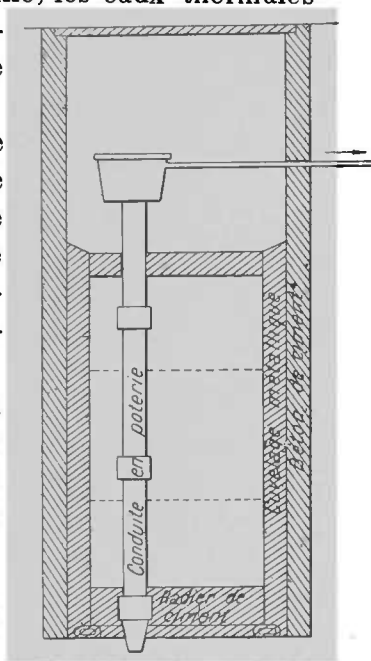


Fig. 87. — Coupe de la source Lecler, à Vittel (d'après M. Laurans).

LAURANS. *Congrès de Clermont*, 1897. — Voir plus haut, p. 90 et 276.

² Voir plus haut, p. 36, 52, 144, 180, 184, 269, et fig. 38 et 39 ; bibl., p. 269.

³ Voir, p. 184.

CAPTAGES D'EUZET (GARD) ET DE SAINT-GERVAIS (HAUTE-SAVOIE)¹
 — Sources dans des roches tendres, recouvertes d'alluvions. Captages par enveloppes successives.

Quand une source thermale est dans un terrain perméable aux infiltrations superficielles, il peut y avoir avantage à appliquer, comme nous le verrons plus loin, les pressions hydrostatiques réciproques : mais cette méthode est peu connue, assez discutée et l'on préfère souvent construire des enveloppes successives, totales ou partielles.

Nous trouvons, dans un article de M. Laurans sur le captage des eaux

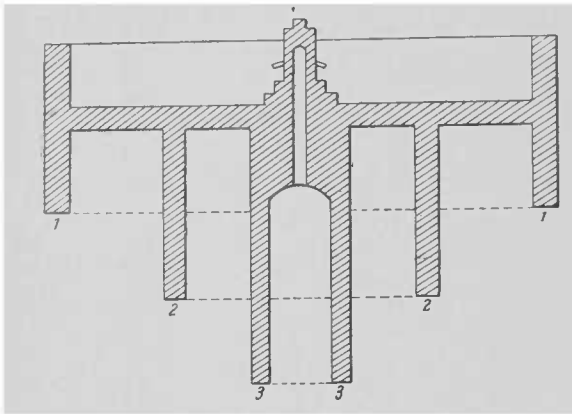


Fig. 88. — Coupe du captage de la source Lavalette, à Euzet (Gard), (d'après M. Laurans).

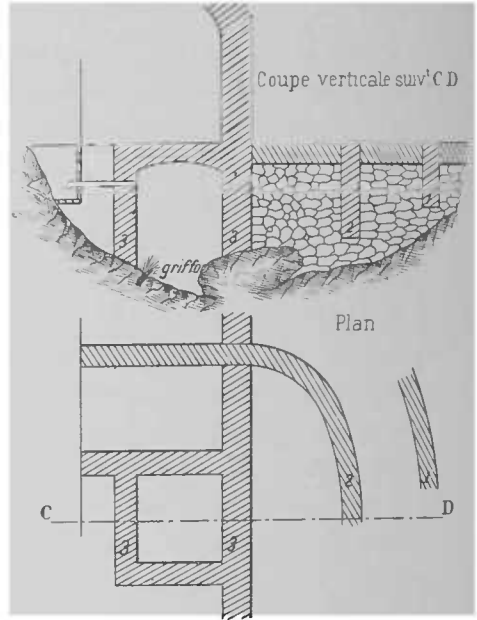


Fig. 89. — Plan et coupe du captage des sources de Saint-Gervais (d'après M. Laurans).

minérales auquel nous avons déjà renvoyé plusieurs fois, deux exemples de ce genre :

A *Euzet* (Gard), source Lavalette (fig. 88), les enveloppes successives sont de plus en plus profondes, à mesure qu'elles se rapprochent du griffon ; cette disposition permet de les établir, de la circonférence vers le centre, dans l'ordre 1, 2, 3, en s'approfondissant peu à peu et sans avoir à lutter contre des venues d'eau latérales trop considérables.

A *Saint-Gervais* (Haute-Savoie), source Coutard (fig. 89), on a fait également trois enceintes 1, 2, 3, incomplètes, le captage étant à la limite de la roche et de l'alluvion.

LURANS. *Congrès de Clermont*, 1897. Voir, plus haut : pour Euzet, p. 205 et 273 ; pour Saint-Gervais, p. 102, 169, 329, 334.

CAPTAGE DE LA SOURCE GRIAZNOUCHKA, A GELEZNOVODSK (CAUCASE) ¹
 — *Captage par tranchée à ciel ouvert, dans un terrain marneux peu consistant, avec construction assise sur le griffon.*

Nous avons étudié, plus haut, à Bourbon-l'Archambault ² un captage consistant en une simple excavation dans le gneiss, avec machine d'épuisement placée au-dessus. A Nérès et à Evaux, nous avons retrouvé quelque chose d'analogue. C'est là, en effet, une solution que l'on a nombre de fois adoptée et nous en citerons

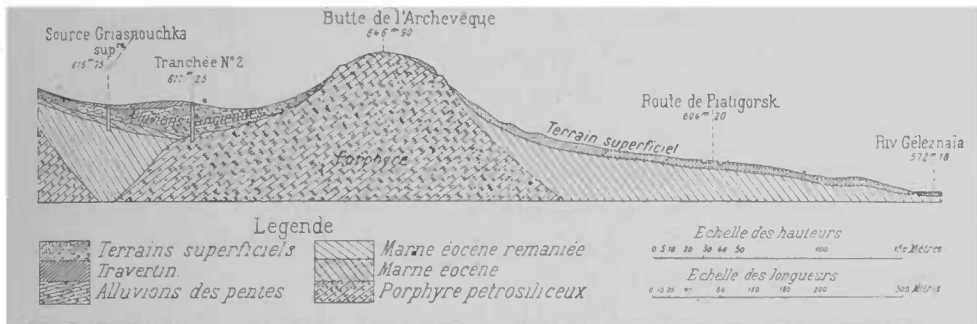


Fig. 90. — Geleznovodsk. Coupe géologique N. 17° E. de la source Griaznouchka à la riv. Geleznaïa (d'après M. Dru).

encore un exemple un peu différent, où l'on a dû prendre des précautions spéciales pour asseoir l'enceinte du captage, celui de la source Griaznouchka à Geleznovodsk (Caucase), déjà signalé précédemment ³ au paragraphe concernant l'exécution des maçonneries (fig. 69 et 70).

La source thermique en question sort d'une fissure du porphyre, recouverte en cet endroit par des marnes éocènes, avec dépôts de travertin, etc. (fig. 90), à travers lesquels elle suintait en s'éparpillant et l'on se proposait d'aller capter la source sur la roche en place ; mais il y avait à tenir compte d'un fait assez particulier, c'est qu'une partie des eaux thermales constitue, comme nous l'avons dit plus haut ⁴, en s'épanchant à la base des travertins, une nappe minéralisée froide, très utile à la réfrigération, et dont nous avons déjà étudié le captage.

Dès lors, la solution la plus naturelle, qui aurait consisté à faire une galerie de mine, se heurtait à une objection de principe, la

Voir sur Geleznovodsk, p. 52, 441, 377, 450, 478, 504, 559.

² Page 467.

³ Page 449.

⁴ Page 478.

crainte de produire l'abaissement et même la suppression des sources froides.

D'autre part, l'exécution d'une semblable galerie aurait, au milieu de marnes fissurées et en présence de courants d'eau chaude, présenté de notables difficultés. M. Dru se résolut donc à faire une tranchée à ciel ouvert, dont on réglerait le niveau à volonté et par tâtonnements, de manière à préserver les sources froides et qu'on pourrait transformer ultérieurement en galerie d'écoulement bétonnée, en la recouvrant par les déblais.

Une fois arrivé au griffon, on put tracer, autour de lui, une enceinte de protection, englobant toute la surface apparente de l'émergence des sources et on la creusa au centre, pour y faire converger les eaux. Puis, on établit, tout autour, ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de l'expliquer à un autre propos, un cadre de pilotis et de palplanches, pour former l'assiette et le périmètre du captage; en raison de la faible résistance des marnes encaissantes, les pilotis et les palplanches, battus plus ou moins profondément, ont été reliés par des traverses moisées et boulonnées. Un tel battage doit, d'ailleurs, se faire à petits coups, avec charge ou pression, si cela est possible, pour la traversée des parties tendres; car le refoulement des marnes pourrait amener un étranglement des fissures, qui conduisent les eaux, et arrêter leur écoulement.

Le cadre une fois placé, on fait, en pareil cas, un béton noyant la tête des pieux et l'on édifie un mur fortement relié aux angles. La construction, pour éviter de trop peser sur les fondations, doit être aussi légère que possible.

§ 2. — *Captages par puits. — Exemples de Vichy (Allier).*

Le cas, où l'on capte une source thermo-minérale par un puits ou par un sondage, ne se distinguè pas précisément de ceux que nous avons examinés au paragraphe précédent, puisque à Schinznach, à Maizières, à Bourbon-l'Archambault, à Vittel, ce sont, en somme, de véritables puits, qui nous ont servi à concentrer les eaux et, à Châtelguyon, à Vals, à Alet, c'étaient des sondages. D'autre part, quand on atteint la fracture thermique par un puits, il est rare qu'on ne complète pas le captage par une courte galerie d'allongement, dont l'utilité est évidente : ce qui nous ramène alors

au cas de travaux de mine plus complexes par puits ou galeries, examinés au paragraphe 3.

En outre, d'une façon générale, nous avons trouvé préférable de remettre l'étude de toutes les applications du sondage à un chapitre spécial¹ en sorte que nous ne les mentionnerons actuellement que pour mémoire.

Cependant, l'emploi des perforations verticales d'une dimension vraiment notable, puits ou sondages, pour la recherche des sources thermo-minérales avait ici sa place logiquement marquée et nous devons, tout au moins, indiquer dans quelles circonstances on est amené à les employer.

C'est, le plus habituellement, quand une fracture hydrothermale, probablement unique en profondeur, rencontre, au voisinage de la surface, des terrains fissurés et perméables, au milieu desquels elle se disperse, soit en une série de filets divergents, soit même en une véritable nappe continue, de telle façon qu'un captage peu profond, une simple excavation dans la roche, ne réussiraient certainement à en drainer qu'une faible partie. Il faut alors descendre davantage et faire, comme nous allons le voir en prenant pour exemple le cas de Vichy, de véritables puits ou sondages, en les garantissant, au besoin, à la périphérie, par des enceintes de béton.

Ces puits se trouvent souvent, pour bien des raisons, ne pas rencontrer les fractures thermales, soit parce qu'on s'est trompé sur la place de l'orifice, soit même qu'intentionnellement on ait voulu, faute de moyens d'épuisement et d'aérage suffisants, éviter la grande gêne, qui résulte d'un travail de puisatiers au-dessus d'un griffon, déversant incessamment de l'eau chaude et de l'acide carbonique en abondance. Il en résulte que les puits de Vichy sont, très fréquemment, complétés par des travers-bancs, galeries de drainage, etc., qui rentrent déjà dans l'objet du paragraphe suivant. Néanmoins, pour ne pas rompre l'unité du sujet, nous les décrirons ici.

Quant aux sondages, que l'on multiplie parfois jusqu'à l'exagération au-dessus de certaines nappes hydrothermales pour arriver à les drainer tout entières, nous répétons que l'étude spéciale en sera faite au chapitre III.

CAPTAGE DES SOURCES DES CÉLESTINS, DE L'HOPITAL, DE LA GRANDE-GRILLE, DU PUIITS CARRÉ, DU PUIITS LUCAS, ETC., A VICHY. — *Sources*

¹ Chapitre III, p. 533.

naturelles incrustantes, recoupant les marnes oligocènes et les alluvions qui les recouvrent. — Captages dans les marnes, ou dans les travertins, déposés par les sources elles-mêmes, au moyen d'enceintes de béton, puits, galeries, etc.

Les sources de Vichy¹ sont, nous l'avons vu, de deux catégories distinctes : sources naturelles filoniennes, arrivant au jour sous pression à une température de 35 à 45° et épanchements latéraux de ces sources ascendantes, formant, dans toutes les strates poreuses rencontrées à Vichy, à Cusset, à Saint-Yorre, etc..., des nappes thermales artésiennes, plus ou moins mélangées d'eau douce, plus ou moins chaudes (de 14 à 30°), que l'on va chercher par des sondages.

C'est des premières seulement, les plus anciennement connues et les plus importantes par leur thermalité, que nous voulons nous occuper ici.

Le terrain tertiaire, au milieu duquel une série de fractures ramènent au jour des eaux minéralisées, dont l'origine doit peut-être être cherchée à l'est dans les tufs porphyritiques du culm, présente, de bas en haut, à Vichy : des arkoses stampiennes, dont les niveaux les plus sableux se prêtent à la formation des nappes artésiennes et, au-dessus, des marnes aquitaniennes à *cypris faba*, directement recouvertes par des alluvions. Les griffons naturels, situés au milieu de ces marnes fissiles et des sables ou galets d'alluvions, sont, forcément, très mal fixés, très disséminés : ce qui explique, à la fois, le grand nombre des sources et les relations très intimes, qui, en réalité, les rattachent toutes les unes aux autres.

Cependant, les eaux, étant chargées de carbonate de chaux avec acide carbonique en excès, sont fortement incrustantes et les dépôts de travertin, qu'elles ont, de temps immémorial, accumulés sur les parois des fissures, où elles ont circulé, en ont fixé quelques-unes : c'est ainsi que la source de la Grande-Grille sort d'une colonne creuse d'aragonite, à zones concentriques et à texture radiée², ayant environ 0,53 m. de diamètre extérieur et placée verticalement dans les alluvions, par un orifice de 23 mm. sur 11 de section à la surface et de 35 sur 25 à 3 m. de profondeur ; celle de l'Hôpital sort du travertin, reposant sur les marnes tertiaires ; les

Voir plus haut, p. 261 à 268.

Cf. VOISIN. *Mémoire sur Vichy* (Ann. d. M., nov. 1879, p. 29).

sources des Célestins, d'un véritable filon de travertin à feuillets concrétionnés verticaux, que nous avons signalé plus haut¹; de même, encore, autour du Puits Carré², on voit, dans les marnes, des feuillets d'aragonite, marquant d'anciennes cheminées thermales³.

Ces incrustations, en fixant l'émergence des sources, commencent par en faciliter le captage; mais on peut prévoir que, continuées un peu plus longtemps, elles finissent par obstruer le griffon, qui alors se déplace, à moins qu'on n'ait soin de l'entretenir artificiellement, ou de le rouvrir à la barre à mine, comme nous l'avons indiqué précédemment.

Quand les sources sortent directement des marnes, leur captage devient très difficile et il est alors essentiel, si on veut les conserver, de ne pas relever le niveau d'émergence (ce qui aurait pour effet immanquable de les rejeter plus loin), mais, au contraire, de produire une dépression, en pompant au niveau le plus bas possible. On peut également drainer le sol, tout autour du fond des puits, par des galeries, qui recourent toujours quelques filets adventifs.

En fait, quand on place, sur l'une de ces sources, une pompe d'épuisement suffisamment forte, on y attire aussitôt toutes les sources du voisinage: ce qui prouve leur solidarité et la possibilité, au moins théorique, d'augmenter, très fortement, le débit de l'une ou l'autre d'entre elles.

Commençons par quelques exemples de captage sur le travertin; nous passerons ensuite aux captages plus difficiles dans les marnes.

Sources des Célestins⁴. — Les sources naturelles des Célestins suintaient d'un véritable dyke de travertin. On a, à diverses époques, obtenu des sources artificielles en creusant des citernes dans ce rocher et surtout à son pied. En 1852, une citerne de 8,85 m. de long sur 1 m. de large, taillée à la pointerolle, créa la source des anciens Célestins, qui est épuisée au moyen d'une pompe; en 1854, en mettant à nu un bas-fond à 30 m. plus au nord, on obtint une autre source, que l'on aveugla en 1857, pour créer, près de là, la

Pages 266 et 476.

VOISIN. *Loc. cit.*, p. 24.

Cf. Châtelguyon, où les sources ont traversé des marnes du même âge; voir, plus haut, p. 261.

⁴ VOISIN. *Loc. cit.*, p. 46.

source de la Vasque, dans une grotte entaillée dans le travertin ; enfin, en 1870, M. de Gouvenain obtint la source des anciens Célestins n° 2, en creusant, dans le travertin, un puits K de 4 m. de profondeur (fig. 91), au pied duquel on fit une simple amorce

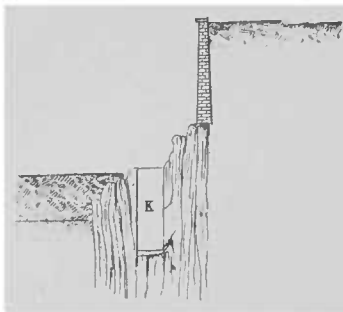


Fig. 91. — Coupe transversale de la source des Célestins (d'après M. Voisin).

de galerie et, la même année, on découvrit les nouveaux Célestins n° 2.

La plus grande difficulté, qui se soit présentée pour ces sources et qui n'a peut-être pas été complètement résolue, a été de les protéger contre les infiltrations des eaux froides et impures de la rivière, l'Allier qui se trouve, à peu de distance, presque au même niveau et est séparée seulement des sources par des terrains perméables ; on a cherché à y réussir au moyen de barrages en béton, établis dans de larges tranchées. Des travaux récents, portant sur le filon de travertin lui-même, ont amené une amélioration très notable.

Source de l'Hôpital. — Les eaux jaillissent directement du travertin, où l'on s'est contenté de creuser un puits de 2 m. de profondeur, surmonté d'une vasque circulaire.

Source de la Grande-Grille. — La source sort, comme nous l'avons vu, d'une colonne creuse d'aragonite, au milieu des alluvions ; afin d'augmenter son débit, après avoir dégagé cette colonne jusqu'à 3,80 m. de profondeur, on la recoupa à 3,40 m. en dessous du sol ; puis on établit, sur la cheminée naturelle, une colonne ascensionnelle en cuivre rouge étamé, au moyen d'une cloche de captage munie d'un robinet de fond, dont l'axe fut fixé à 2,85 m. au-dessous du sol.

Source du Puits Carré² — Cette source, qui sort directement des marnes et des alluvions, est la plus importante de Vichy par son débit (115 m³ par 24 heures) et sa température (45°). Aussi a-t-on fait, depuis l'époque gallo-romaine, des efforts considérables

VOISIN. *Loc. cit.*, p. 29.

VOISIN. *Loc. cit.*, p. 23.

pour la fixer et l'empêcher de s'échapper, soit au sud-est, soit au nord-ouest, par de profonds ravinements souterrains, remplis de sables et de vases, que présentent, dans ces deux directions, les marnes.

La chambre de captage, ou lanterne, a été simplement creusée dans les marnes et les alluvions et surmontée d'une cheminée maçonnée, ayant 0,86 m. de section ; mais on a établi, tout autour, des ceintures en glaise, supportant une maçonnerie et, pour couper les ravinements, on a bâti des barrages de béton de 5 à 6 m. de large sur 7 m. de profondeur.

A diverses reprises, on a observé le danger qu'il y avait, pour cette source, à relever son niveau d'émergence : il en résultait immédiatement des pertes latérales. Par contre, il est à remarquer, pour cette source, comme pour la plupart des sources incrustantes, qu'une fois captées artificiellement, elles ont une tendance favorable à consolider elles-mêmes, dans une certaine mesure, leur captage par leurs dépôts incrustants.

Source du Puits Lucas. — La source du Puits Lucas (et la source Prunelle, qui n'en est qu'une dérivation) suintent également dans les marnes tertiaires.

On a capté la source Lucas, au moyen d'un puits de 9,50 m. de profondeur, à partir du fond duquel une galerie a été dirigée vers le griffon, atteint d'autre part, plus directement, par un sondage, destiné à ventiler les travaux (ancien puits des Acacias). Nous avons déjà eu l'occasion de décrire ces travaux, que nous ne faisons que rappeler ici, en traitant de l'épuisement et de la ventilation ¹.

§ 3. — *Captages par galeries de mines, travers-bancs ou sondages horizontaux. Exécution des galeries (boisages provisoires, sondages en avant, muraillement).* — *Exemples de Pfæfers, de Piatigorsk, de Cauterets, de Plombières, d'Uriage, de Lamalou, de Geleznovodsk, de Saint-Jean du Gard, de Pouzzoles, etc.*

Les exemples de captage, que nous allons décrire dans ce paragraphe, se distinguent de ceux que nous avons étudiés jusqu'ici par une complication plus grande et nécessitent de véritables tra-

¹ Voir p. 443 et fig. 66 et 67.

vaux de mines ! Nous allons voir, maintenant, exploiter et drainer une venue d'eau thermale, absolument comme on a l'habitude de dépiler une veine métallifère, en gagnant le filon, soit par une simple galerie d'allongement ou de direction, c'est-à-dire par une galerie suivant la longueur du filon, s'il affleure à flanc de coteau, soit par un travers-bancs ou un puits dans les cas plus complexes, où il faut aller le chercher dans la profondeur d'une montagne ou d'une vallée, et traçant, le long des veinules qui le constituent, un système de galeries en direction.

De telles méthodes peuvent être employées pour augmenter notablement le débit d'une source, tantôt en établissant un drainage complet de tous les filets d'eau dispersés, tantôt en abaissant de plusieurs mètres le plan d'émergence naturel. Elles sont particulièrement indiquées pour des eaux très éparpillées, formant une série de filets de faible volume, surtout quand la vogue de la station thermale et l'afflux des baigneurs nécessitent l'utilisation des moindres gouttes d'eau minérale.

Il peut être intéressant de signaler, dès l'antiquité la plus reculée, des exemples de galeries de mines, destinées à aller chercher de l'eau douce. Tel est le cas de ce fameux aqueduc de Siloé, à Jérusalem, où l'on a trouvé une des plus anciennes inscriptions hébraïques, probablement contemporaine d'Ezéchias, racontant le percement de cette galerie de 533 m. par deux équipes de mineurs, cheminant au-devant l'une de l'autre. Tel est également le but de divers travaux phéniciens ou grecs en Asie Mineure : notamment, à Samos, une galerie de 1 200 m. de long, située sous les ruines de l'Acropole, qu'on a pu désobstruer de ses concrétions calcaires pour y ramener les eaux au bout de vingt-quatre siècles. (RECLUS, t. IX, p. 629.) — A Mycènes, il existait, de même, un aqueduc souterrain, amenant les eaux de la fontaine Pénéia, que Schliemann a découvert. (PERRON, *Hist. de l'Art*, p. 310.)

Enfin, auprès de Tyr, à l'île d'Arad, les Phéniciens avaient fait un très curieux captage de source sous-marine, qui constitue une sorte d'application des pressions hydrostatiques réciproques, comparable au captage d'Englihen décrit plus loin. En voici la description, d'après Strabon (XVI, II, 13) :

En temps de guerre, dit-il, on va chercher l'eau dans le détroit même, un peu en avant de la ville, en un point où a été reconnue la présence d'une source d'eau abondante. A cet effet, on se sert d'un récipient ayant la forme d'une gueule de four renversée, que, du haut de la barque envoyée pour faire de l'eau, on descend dans la mer juste au-dessus de la source ; ce récipient est en plomb ; très large d'ouverture, il va se rétrécissant toujours jusqu'au fond, lequel est percé d'un trou assez étroit. A ce fond est adapté et solidement fixé un tuyau en cuir, une outre, pour mieux dire, destinée à recevoir l'eau, qui jaillit de la source et que lui transmet le récipient. La première eau recueillie ainsi n'est encore que de l'eau de mer ; mais on attend que l'eau pure, l'eau potable de la source, arrive à son tour et l'on en remplit des vases, préparés à cet effet en nombre suffisant, que la barque transporte ensuite à la ville en traversant le détroit.

Auprès de là, à Ras el Ain, les Phéniciens avaient également établi, sur des sources jaillissantes venant des calcaires crétacés du Liban, des sortes de tours octogonales de 6 m. de haut, formant des tubes piézométriques et permettant de recueillir l'eau dans des réservoirs élevés, d'où elle redescendait ensuite sous pression.

Nous n'avons pas besoin de rappeler combien est essentiel, dans des travaux de ce genre, l'établissement théorique homogène et rationnel du niveau de captage, sur le rôle duquel nous avons déjà insisté précédemment¹

Deux cas principaux peuvent se présenter :

Le premier, et le plus ordinaire, est celui où, possédant l'affleurement naturel d'une source thermale à l'intersection d'une fracture géologique et d'une dépression topographique, on désire simplement l'enrichir, et éviter les divagations qu'elle peut présenter dans les terrains d'éboulis, recouvrant le flanc du coteau.

On s'enfonce alors en galerie d'allongement, le long de cette fracture, ou le long des suintements, qui semblent la continuer dans les éboulis et, si les venues d'eau chaudes sont multiples, on relie les diverses galeries en direction par un ou plusieurs travers-bancs perpendiculaires, creusés dans la roche en place, de manière à être sûr de recueillir les filets hydrothermaux intermédiaires, qui pourraient se présenter²

Dans certains terrains très fissurés ou très perméables, particulièrement propices à la dissémination des eaux, on est même conduit, parfois, à établir de véritables réseaux de galeries en damier, comme il en existe des exemples pour les prises d'eau douce, destinées à alimenter des villes.

Le second cas est celui où le filon thermal est encaissé dans une montagne, plus ou moins parallèlement au thalweg d'une vallée, vers laquelle on veut détourner son émergence en allant le recouper par un travers-bancs, ou par un sondage horizontal.

Ainsi que nous venons de le voir, ce cas peut se greffer comme corollaire sur le précédent; il pourra également avoir son individualité.

Nous allons commencer par des renseignements généraux sur l'exécution de pareils travaux et nous terminerons par la description de quelques cas détaillés.

L'exécution d'une galerie de captage est, à bien des égards, identique à celle d'une galerie de mine quelconque; nous insistons surtout sur les points qui l'en distinguent, renvoyant, pour le

¹ Voir p. 433.

² En principe, les travaux d'allongement suivant la direction du filon doivent précéder ceux d'entrée en roche, auxquels ils servent, le plus souvent, de reconnaissance.

reste, aux traités d'exploitation des mines¹, que nous ne pourrions que reproduire.

Les différences tiennent, d'abord, aux difficultés spéciales qui résultent de l'abondance des eaux chaudes et, à l'occasion, de celle des gaz dans les travaux : d'où la nécessité d'organiser, avec grand soin, l'épuisement et la ventilation, comme nous l'avons indiqué précédemment²

Si l'on s'agit d'une galerie partant du flanc d'un coteau, on laissera toujours une pente vers l'extérieur, de manière à permettre l'écoulement naturel des eaux ; dans ce cas, la galerie, une fois terminée, sera, d'ailleurs, tout naturellement, employée comme aqueduc. Quant à la ventilation dans un semblable travail en cul-de-sac, elle exigera, en général, un ventilateur, placé à l'entrée et envoyant, par une conduite, de l'air frais jusqu'au front de taille.

Si l'on est en profondeur, l'épuisement et la ventilation ne pourront se faire que par des engins mécaniques et, souvent, on sera conduit, pour établir une circulation de l'air, à mettre, de distance en distance, la galerie horizontale en communication, par des forages, avec la surface ; l'acide carbonique, qui est le gaz qu'on a le plus de chance de rencontrer, restera, néanmoins, au fond par sa densité, tant qu'on ne le déplacera pas artificiellement.

L'abondance inévitable des eaux aura également pour conséquence, si l'on traverse des terrains marneux et schisteux, de les délayer et de rendre un boisage étanche et méthodique particulièrement nécessaire ; parfois même, d'exiger un boisage par poussage simple, ou en bouclier. Même si la roche paraît solide, on devra toujours se tenir en garde contre un brusque coup d'eau et il sera prudent de se faire précéder par des sondages horizontaux dans l'axe de la galerie.

La chaleur résultant de la présence des eaux thermales sera toujours une gêne, qui deviendra parfois considérable et forcera à remplacer fréquemment les travailleurs. Nous citerons, à ce propos, l'exemple de certaines galeries de la mine d'argent du Comstock, en Névada, où le but n'était nullement la recherche des eaux thermales, mais où, néanmoins, de semblables eaux affluaient : on n'a pu continuer les travaux qu'en faisant arriver une pluie d'eau

VOIR HATON DE LA GOUPILLÈRE. *Traité d'exploitation des mines*, t. II, p. 241, sur le boisage ; 275, sur le muraillement ; 296, sur le percement des galeries.

Pages 440 à 446.

froide aux fronts de taille et en fournissant aux mineurs une provision toujours renouvelée de glace¹.

D'autre part, la nature essentiellement fugitive de ce minerai spécial, l'eau thermale, qu'on poursuit ici, exigera de grandes précautions : c'est ainsi qu'on évitera les coups de dynamite, de nature à ébranler trop le terrain ; qu'on avancera en étudiant à chaque pas les écoulements d'eau rencontrés, leur température, leur composition², etc.

Les galeries de captage se distinguent enfin des galeries de mines à un autre point de vue : ce ne sont pas, en effet, des ouvrages provisoires, mais des travaux, que l'on cherche à rendre définitifs, et où l'on sera appelé, soit à circuler, soit, tout au moins, s'ils doivent rester noyés en profondeur, à rentrer un jour. On les exécutera donc à grande section (1.50 m. de largeur et 2 m. de hauteur) ; parfois même en les préparant, comme on l'a fait à Luchon, de manière à pouvoir les utiliser en étuves. Et, quand elles seront complètement percées, on remplacera leur boisage provisoire par un muraillement soigné, avec des dispositions spéciales pour le captage des eaux.

Nous allons insister spécialement sur trois des points que nous venons de mentionner : boisages provisoires ; sondages horizontaux ; exécution du muraillement et des captages proprement dits.

1° Boisages. — Toute galerie de mines, à moins d'être pratiquée dans la roche compacte, exige un boisage plus ou moins complet.

Le boisage se compose essentiellement de cadres verticaux, composés eux-mêmes de deux montants appliqués aux parois latérales (ou piédroits), d'un chapeau assujéti sur ces montants par un assemblage très simple et, parfois, d'une semelle sur la sole de la galerie³. Exceptionnellement, on renforce les cadres en entretoisant les montants, près du faite, au moyen de tendards. Ces cadres sont plus ou moins espacés les uns des autres et peuvent être réunis par des palplanches, passées entre les cadres et les parois de la galerie, soit au plafond, soit, plus rarement, sur les flancs. Quand le terrain est éboulé, on se couvre au moyen de palplanches, intro-

¹ *Giles minéraux et métallifères*, II, 796.

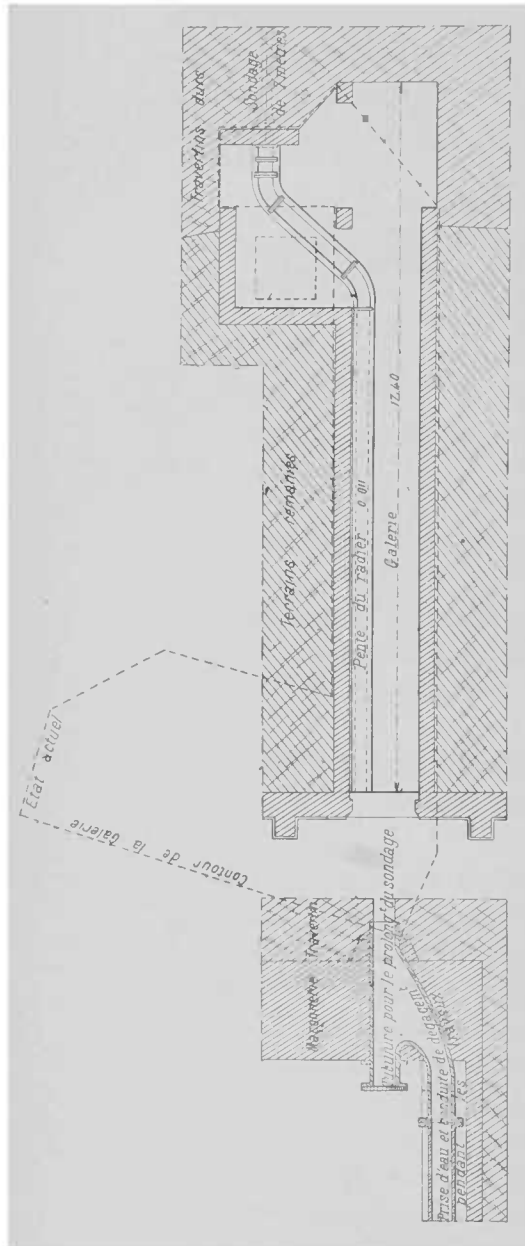
² DRU. *Mémoire sur le Caucase*, p. 79.

³ Un cadre coûte, en moyenne, de 3 à 5 francs de bois, plus 1 franc à 1 fr. 50 de pose. — Un boisage, avec garnissage complet, est estimé à 10 francs le mètre courant.

duites entre les chapeaux des cadres et le plafond : c'est le poussage ; s'il est tout à fait inconsistant, on s'enveloppe d'un coffrage complet (parfois même à la semelle), et l'on pousse, devant soi, au front de

taille, un mur en planches, que l'on appelle un bouclier.

Un danger à prévoir, si l'on travaille au milieu de marnes délayées par les eaux, c'est la formation de cloches au-dessus du garnissage ; car, si on laissait un semblable vide, il pourrait, un jour ou l'autre, s'y faire un effondrement, qui, tombant de haut sur le boisage, risquerait de le rompre. On doit donc remplir aussitôt ces vides : ou bien, simplement et à titre provisoire, avec des fascines, ou bien, lorsque le travail doit durer, avec un véritable remblayage méthodique, relié au muraillement.



Plan et coupe.

Fig. 92. — Projet de réfection de la galerie Sabaniouff, à Piatigorsk (d'après M. Dru).

2° Sondages en avant. — Une galerie de mine, qui, au lieu de se diriger vers un minéral solide et immobile, marche à la rencontre de l'eau thermale, doit se faire, très fréquemment, précéder de travaux de reconnaissance, pour ne pas être subitement envahie par une trombe d'eau bouillante. D'où l'emploi de sondages horizontaux, partant du front de taille de la galerie.

Ce sera même là souvent le meilleur moyen de recouper la fracture thermique elle-même, en produisant, dans le trou de sonde, la source cherchée, qui se trouvera ainsi toute captée, au lieu de déboucher dans le filon même à large section.

Si l'on se reporte à la figure 65 (p. 141), le filon thermal étant AB, on arrêtera la galerie de mine un peu avant d'y arriver, en D et on n'établira la communication au delà que par un coup de sonde.

Comme un pareil sondage dégagera nécessairement de l'eau chaude et des gaz, il est nécessaire, pour pouvoir travailler, d'employer un dispositif spécial.

La figure 92 montre celui qui a été adopté dans diverses galeries de Piatigorsk (Caucase) par M. Dru. On y voit le détail de la tubulure de prise en bronze étamé. Cet appareil est scellé dans une maçonnerie, garnissant le front de taille ; l'ouverture inférieure sert à évacuer l'eau minérale pendant l'élargissement, la continuation ou le tubage du trou de sonde ; le forage une fois terminé, on ferme l'orifice supérieur et, sur celui du bas, on fixe le branchement de la conduite.

La figure 93 représente une sonde horizontale pour de courts travaux ; cette sonde est fixée, en partie, sur un chevalet, qui porte des cliquets pour la rotation et un contrepoids aidant la percussion ; l'outil est rallongé par des tiges ordinaires, adaptées à la partie ronde fixée sur le chevalet. C'est à la tiraude que l'on agit pour retirer l'outil et obtenir la percussion.

Quand le travail devient plus important, il faut adopter une perforatrice d'un type quelconque.

3° Exécution du muraillement et du captage proprement dit. — Pour capter le griffon d'une source, située dans une galerie souterraine, on l'entoure de béton, de manière, à la fois, à le localiser et à le préserver contre les infiltrations d'eau froide ; on réunit ainsi tous les filets d'eau — parfois nombreux, quand la roche est fissurée, meuble ou schisteuse, — dans une sorte de cuvette, d'où part le tuyau chargé d'amener à l'établissement les eaux collectées.

Ces cuvettes, — sauf dans le cas spécial, que nous allons voir, de galeries entièrement noyées sous l'eau thermale, — sont fermées et, pour qu'on puisse les nettoyer, munies d'un regard hermétique, fermé par une cuvette autoclave.

A cet effet, l'ouverture à clore est munie d'une couronne circulaire en terre cuite ou en fonte, avec une rainure pleine d'eau, sur laquelle on applique une cloche de même substance que la couronne : on évite ainsi tout accès d'air au griffon.

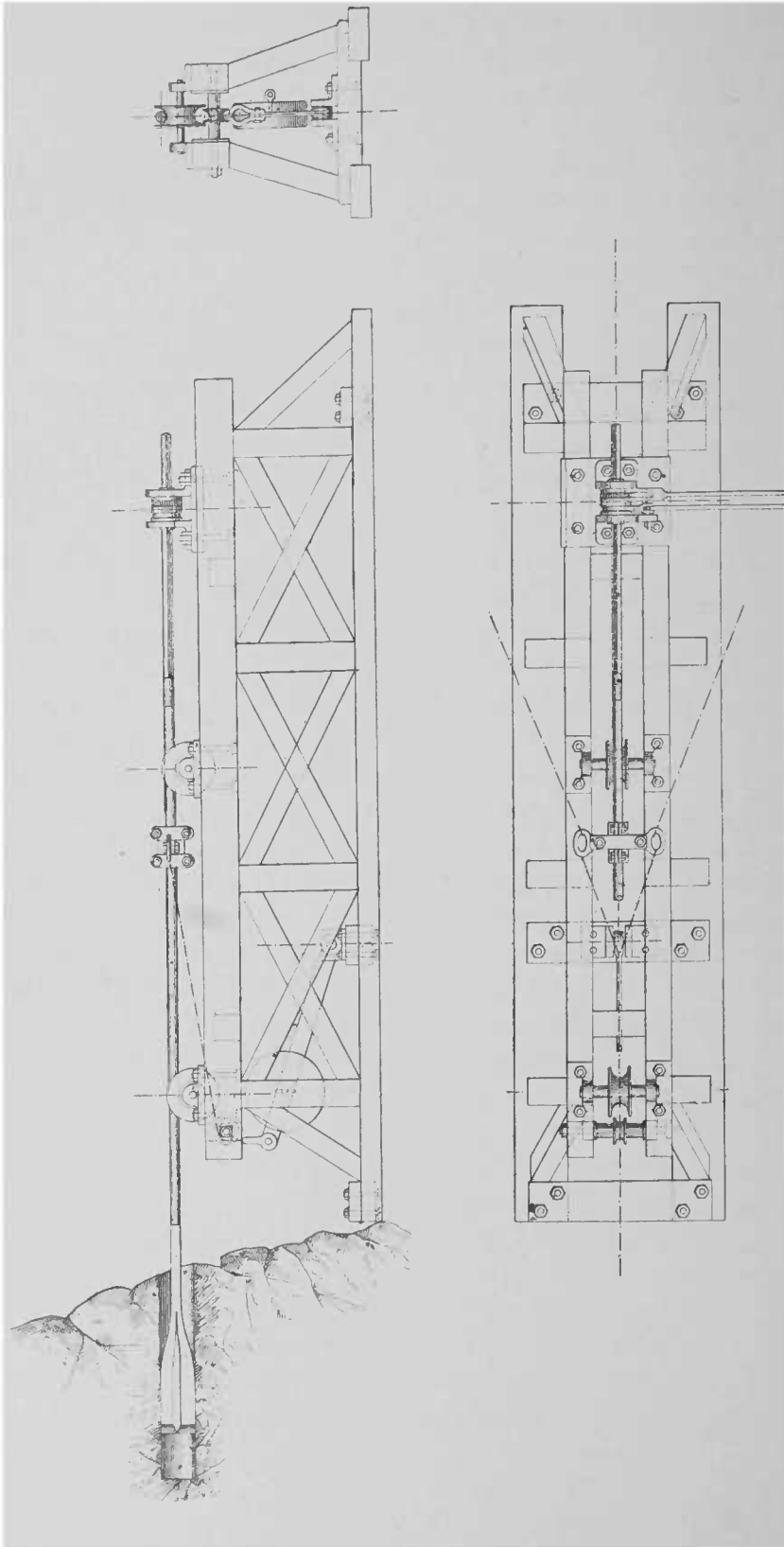


Fig. 93.— Installation d'une sonde horizontale à bras (d'après M. Arrault).

Quand la galerie doit être pleine d'eau thermale, comme nous l'avons vu, par exemple, au Puits Lucas de Vichy, un semblable dispositif n'a plus de raison d'être, puisque le griffon se trouve alors, tout naturellement, protégé contre le contact de l'air.

Si nous passons maintenant au muraillement, on devra l'établir avec plus ou moins de soin, suivant que la galerie doit fonctionner à niveau plein, au-dessous du plan de captage, comme dans le cas, rappelé à l'instant, du Puits Lucas, ou, au contraire, doit rester à sec et contenir seulement des conduites, ou des rigoles d'eau thermale, comme à Bagnères-de-Luchon.

Cependant, la différence est plutôt dans les enduits, dont on pourra économiser une partie dans le second cas, que dans les maçonneries mêmes, qui devront toujours être soignées¹.

1° Supposons, d'abord, le cas d'une galerie à niveau plein, déjà traité antérieurement² et dont nous avons peu de chose à dire.

Il est essentiel alors de murailles la galerie sur toute sa section et de la recouvrir d'un enduit de ciment continu, tant pour éviter les éboulements de terrains, désagrégés par l'eau, qui viendraient obstruer les griffons des sources, que pour arrêter les infiltrations froides des terrains avoisinants, nécessairement attirées par les pompes, au moyen desquelles on puisera souvent l'eau de ces sources.

On adoptera volontiers une section elliptique ou ovoïde, qui convient bien pour la résistance à la poussée des terrains avoisinants.

Aux points où l'on aura reconnu des griffons thermaux, on se contentera de ménager une ouverture dans le radier de béton et, pour éviter une obstruction par des matières quelconques, on pourra recouvrir la source ainsi localisée d'une cloche portée en l'air, qui, d'ailleurs, n'aura aucune influence sur la pression hydrostatique.

On attendra la prise complète des enduits, en maintenant l'épuisement par les pompes et on laissera ensuite l'eau thermale remonter peu à peu dans les galeries, qu'elle remplira entièrement.

2° La galerie est au-dessus du plan de captage et, par conséquent, à sec. Dans ce cas encore, on aura intérêt à établir un muraille-

¹ Rappelons, pour mémoire, qu'un muraillement complet comprend les piédroits, la voûte et le radier. Nous avons donné, p. 451, les prix approximatifs de travaux de maçonnerie, dans le cas de la ville de Paris, qui doit être considéré comme correspondant à un maximum.

² Voir p. 442 et 450.

ment complet et un revêtement, sur le sol, pour éviter les infiltrations froides, en ménageant seulement des ouvertures sur les griffons ; mais on pourra se dispenser d'un enduit sur les voûtes et les pieds-droits.

Ces galeries peuvent avoir des dimensions variables ; à Bagnères-de-Luchon, où l'on voulait pouvoir les utiliser, en raison de leur température élevée, comme étuves, on leur a donné 1,60 m. sur 2,20 m. dans œuvre.

Les figures 94 et 95 indiquent les dispositions adoptées dans ce cas spécial de Bagnères-de-Luchon.

Les galeries de cette station thermale se trouvent, pour des

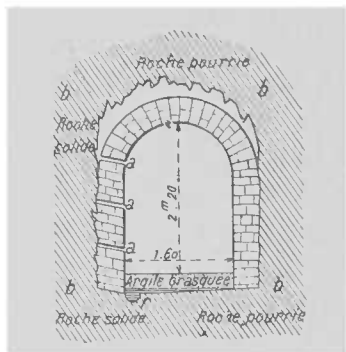


Fig. 94. — Coupe transversale de la galerie d'allongement dans les schistes pourris (d'après M. François).

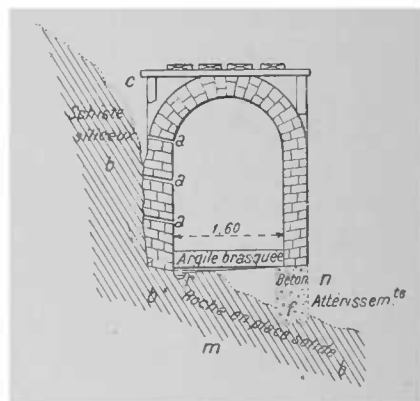


Fig. 95. — Coupe de la galerie d'allongement, appuyée à la roche en place solide (d'après M. François).

raisons géologiques sur lesquelles nous aurons à revenir, établies, en général, sur des plans de moindre résistance : tantôt, sur la limite de la roche solide et de la roche pourrie (fig. 94) et alors tout entières dans la roche en place ; tantôt, au contact des éboulis et de la roche en place (fig. 95).

Cette seconde disposition, évidemment moins favorable pour le captage, n'a été employée que là où les eaux sulfureuses étaient peu abondantes et, pour éviter que les filets sulfureux n'eussent une tendance à s'échapper suivant un circuit tel que *mn*, en aval de la galerie, on a eu soin alors d'établir en *f* un barrage en béton, approfondi dans la roche et servant de fondation au mur de la galerie.

Quant à la galerie elle-même, elle a été solidement maçonnée et voûtée à boisage perdu et en maçonnerie hydraulique, de manière à protéger les conduites contre les éboulements possibles de

schistes, de plus en plus décomposés par la circulation des eaux, acidifiées au contact d'éléments pyriteux et à éviter que les suintements de celles-ci vinsent se mêler aux sources chaudes ; mais, pour ne pas refouler ces suintements dans les griffons hydrothermaux, on leur a ménagé, de place en place, des carneaux *a a a*, destinés à les attirer en des points appropriés.

Dans tous les cas, on voit, sur les figures 94 et 95, comment l'on a disposé, sur le côté de la galerie, tourné vers l'intérieur de la montagne, une rigole *r*, vers laquelle on a incliné le sol, de manière à y recueillir et à y faire couler les eaux sulfureuses.

Il y a, dans l'exécution de ces rigoles, des précautions plus ou moins grandes à prendre, suivant que l'eau à transporter est plus ou moins altérable.

D'une façon générale, on évite de laisser des rigoles à ciel ouvert, qui recevraient des souillures et des poussières ; mais on peut adopter, soit une conduite proprement dite en maçonnerie, en bois, en terre cuite, en porcelaine ¹ soit une rigole dallée, qu'on a parfois le soin, comme dans la coupe de Bagnères-de-Luchon donnée plus haut, de recouvrir d'argile brasquée, pour éviter le contact de l'eau, qui altérerait le sulfure de sodium. Si la conduite doit être laissée à nu, on a avantage à employer des tuyaux de porcelaine, qui coûtent, il est vrai, plus cher, mais préservent mieux contre la déperdition de chaleur.

En toute hypothèse, on s'arrange, autant que possible, pour que l'eau, en coulant, remplisse complètement la capacité des tuyaux, de manière à éviter le contact de l'air.

Ces précautions peuvent naturellement être réduites, quand l'eau n'est pas altérable.

Il reste à amener l'eau sulfureuse à ses réservoirs, sans la laisser s'altérer au contact de l'air et en la débarrassant des matières étrangères entraînées, ou du sulfure de fer précipité. Le dispositif adopté dans les travers-bancs est représenté par la figure 96, dont nous empruntons la description à M. François ² :

On y voit, en *pq*, une caisse quadrangulaire en marbre, hermétiquement couverte et présentant deux compartiments séparés par une paroi en marbre, sur le bord supérieur de laquelle l'eau coule sous une très faible épaisseur. Cette eau entre, d'ailleurs, dans la caisse en s'épandant en nappe sur le bord

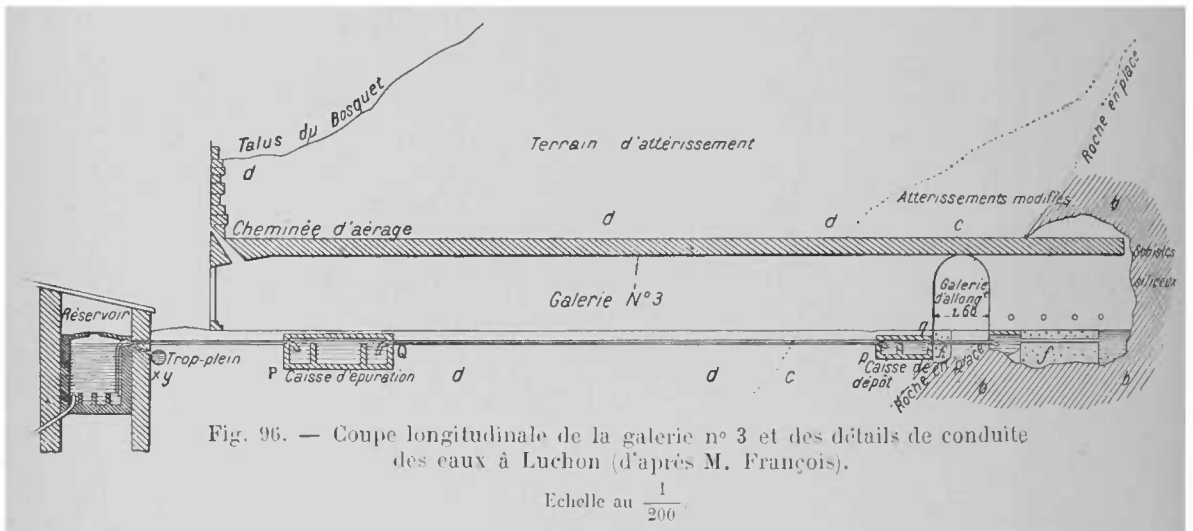
¹ Voir plus loin, p. 578, sur le choix des conduites.

(Ann. d. M., 1842), *Mémoire sur Luchon*, p. 20.

de la paroi d'amont, de telle sorte que, dans le premier compartiment, le liquide n'est en mouvement que sur une faible épaisseur à la surface: ce qui permet le dépôt des corps entraînés. Puis, dans le second compartiment, un conduit coudé, faisant siphon, reçoit les eaux, sans entrainement d'air à la surface. Les conduits sont tous en porcelaine vernissée, qui est sensiblement inaltérable par les eaux sulfurées sodiques, telles que celles de Luchon.

Afin de s'assurer de la limpidité des sources, leurs conduits sont recouverts par une autre caisse en marbre PQ, à trois compartiments, dite caisse d'épuration. Le premier d'entre eux fait filtre par ascension au travers d'un cailloutis granitique (le sulfure de fer étant fortement fixé par la surface rugueuse des galets de granite); le second et le troisième font caisse de dépôt comme ci-dessus.

Afin d'éviter toute altération ultérieure, l'eau dégorge dans le réservoir, où



elle doit être recueillie, dans une cuvette en marbre, dont les bords supérieurs sont à 0,35 m. du fond. Elle ne peut, d'ailleurs, se rendre à la soupape de service qu'en franchissant des languettes de calme en marbre, également placées, ainsi que la soupape, à 0,35 m. du fond. Ces languettes facilitent le dépôt des corps entraînés (sable et sulfure de fer) et s'opposent à tout entrainement ultérieur et à toute agitation du dépôt. D'un autre côté, les voûtes des réservoirs sont hermétiques; elles n'ont que 0,08 m. de flèche. En outre, le trop-plein général *xy* reçoit les eaux surabondantes, au moyen d'un tuyau en porcelaine, descendant au fond du réservoir: vrai siphon, qui prend les eaux en excès dans la cuvette d'admission à 0,30 m. du fond.

Précisons maintenant, par quelques exemples de captage, les dispositions adoptées dans les principaux cas. Le plus intéressant peut-être serait celui de Bagnères-de-Luchon; mais, comme il est, avant tout, fondé sur l'emploi des pressions hydrostatiques réciproques, nous en renvoyons la description complète au chapitre suivant.

CAS DE PFÆFERS (SUISSE). — *Fissure thermique, transversale à un ravin très encaissé, avec dissémination suivant les plans de joints de schistes. — Galerie de mine dirigée à peu près suivant la fissure. Captage accessoire de venues chaudes sous le torrent.*

A la source de Pfæfers, dont nous avons déjà eu à étudier une partie du captage¹, le ravin d'érosion du torrent, la Tamina, qui

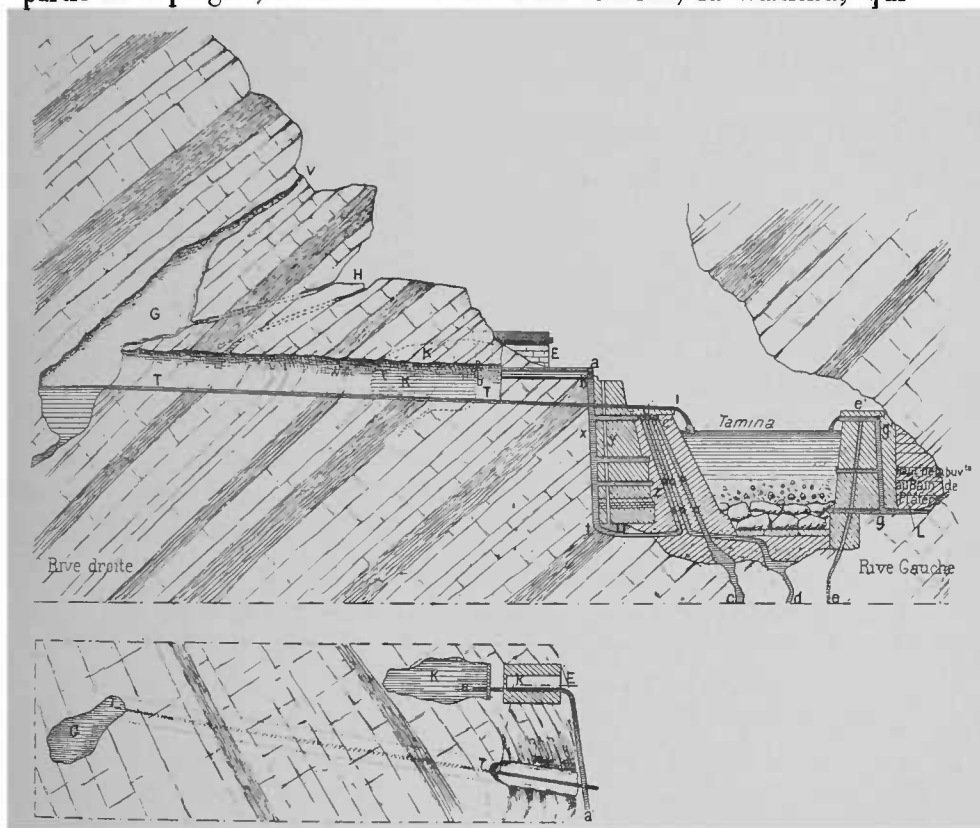


Fig. 97 et 98. — Coupe verticale et plan du captage des sources thermales de Pfæfers-Ragatz (Grisons).

a près de 200 m. de haut sur 8 ou 10 de large, est formé de schistes nummulitiques, recoupés par une fissure tapissée de calcaire ferrugineux, le long de laquelle se produit l'émergence des sources. L'intersection de cette fissure avec le ravin ayant la forme d'un U posé debout, dont le fond serait occupé par l'eau du torrent, qui produit une charge hydrostatique, le point d'émergence naturel doit être sur la berge peu au-dessus du niveau de l'eau (vers E, fig. 97 et 98). Les choses se sont trou-

¹ Voir plus haut, p. 477 et, plus loin, p. 521, 583.

vées un peu compliquées par l'existence, dans cette berge, de joints dus à la schistosité et surtout d'une véritable grotte G, creusée autrefois par le travail d'érosion du torrent et constituant une sorte de réservoir interne pour les eaux thermales. Le remplissage progressif de ce réservoir amenait, avant les travaux de captage, en H et même en V, l'apparition de sources intermittentes. D'autre part, quand le niveau de l'eau du torrent n'était pas assez élevé, il suintait, au fond, en *d* ou sur l'autre rive, en L, des sources chaudes, dont on ne constatait la présence que par un accroissement notable de la température du torrent en aval de ce point.

C'est pourquoi, en 1860, on fit, au niveau le plus bas que permissent d'atteindre les crues de la Tamina, un travers-banc T, qui, après avoir traversé plusieurs petites venues chaudes, déboucha dans la grotte G de 3,30 m. de diamètre, en donnant une abondante venue thermale. Quand cette grotte eut été asséchée jusqu'au niveau du sol de la galerie, celle-ci constitua, d'une façon permanente, la principale source de la station. La figure en représente une autre voisine, le Kessel, K captée seulement dans une sorte de petite grotte.

Pour utiliser les suintements du fond du torrent, on commença, en profitant des basses eaux de l'hiver, par détourner celui-ci dans un chenal en bois et par débarrasser son lit, mis à sec, des galets qui l'encombraient. Puis on capta les suintements dans un massif de maçonnerie, formant radier au torrent; l'eau fut recueillie dans deux conduites verticales *cc'*, *dd'* sur la rive droite, deux également *ee'*, *gg'* sur la rive gauche, chacune de ces conduites aboutissant à la conduite générale de captage *i*. Enfin, le travail fini, on recouvrit le radier d'un lit de gros blocs et de sable et, pour le protéger contre l'action destructive du torrent, en régularisant le niveau de celui-ci, on construisit un barrage dans la Tamina à quelques mètres à l'amont. On obtint ainsi, sans l'avoir cherché, ce résultat d'avoir, sur les griffons du torrent, une pression hydrostatique constante, qui contribua à refouler l'eau chaude vers les griffons de la berge.

CAS DE CAUTERETS (SOURCES CÉSAR ET DU ROCHER) ET DE PLOMBIÈRES (SOURCES SAVONNEUSES). — *Source dans un coteau, dont la roche est masquée par des éboulis. — On traverse les éboulis perpendiculairement au flanc du coteau, qu'on suit alors en allongement dans la roche en place, de manière à reconnaître et à recouper les filons thermaux*¹

¹ C'est également la méthode qui a été employée en grand à Bagnères-de-Luchon (voir plus loin, p. 524).

A **Cauterets**¹, la source César suintait dans cette sorte d'éboulis cimentés par les eaux thermales, qu'on nomme là le *tap*. En 1839, François gagna, par galerie, le schiste, recouvert par ce tap et recoupa, sur 5 ou 6 m. de long, dans ces schistes, une fente, où l'eau thermale est aujourd'hui captée. La même année, M. Abadie, en pratiquant une galerie dans le tap au contact des schistes, traversa un dyke de roche éruptive très dure, qui jouait là ce rôle de drain, si fréquent pour les filons de toute nature; car, aussitôt après l'avoir recoupé, on eut une venue thermale abondante, la source du Rocher².

De même, à **Luchon**, dans le captage complexe que nous décrivons plus loin, François a débuté par des travers-bancs, gagnant la roche schisteuse à travers des éboulis, appelés là atterrissements. Après quoi, une galerie d'allongement, au contact des schistes et des atterrissements, a recoupé des venues thermales, le long de filons de granulite, qui, eux aussi, formaient des drains, comme la roche éruptive de Cauterets.

A **Plombières**³, pour capter les sources tièdes ou savonneuses, on a fait une galerie en travers-bancs dans le flanc du coteau, perpendiculairement au thalweg et, à 31,73 m. de l'entrée, on a trouvé un filon thermal, donnant par minute 8,24 lit. à 15°,6.

Puis on a percé, parallèlement au thalweg, à partir du fond de cette première galerie, une autre galerie de 38 m., qui a recoupé quatre sources, correspondant à pareil nombre de filons et donnant, par minute, 27,7 lit. à 28°,69.

Ces travaux en galerie ont été arrêtés pour ménager d'autres sources, telles que la source Simon, qu'on aurait recoupées à un niveau inférieur à leur émergence naturelle et, par suite, dans des conditions moins commodes.

CAS D'URIAGE. — *Captage par galerie et puits.*

A **Uriage** (Isère), d'après M. Laurans⁴, la source émerge d'alluvions anciennes, recouvrant des schistes calcaires du lias.

Pour la capter, on fit, d'abord, en 1823, une galerie de drainage

¹ Voir plus haut, p. 60, 110, 118, 134, 167, 169, 192, 209, 316; bibl., p. 316.

² 1892. BEAUGEY. *Mém. sur Cauterets* (Ann. d. M., p. 15).

³ 1862. JUTIER. *Mém. sur Plombières*, p. 59. — Voir, plus haut, p. 64, 81, 113, 144, 147, 193, 198, 284; bibl., p. 284.

⁴ (*Congrès d'hydrologie de Clermont-Ferrand*, 1897, p. 177.) Voir plus haut, p. 91, 102, 168, 328; bibl., p. 329.

dans les alluvions, parallèlement au thalweg de la vallée ; puis, en 1843, une seconde galerie, toujours dans les alluvions, terminée par un sondage vertical de 28 m., et l'on n'arriva enfin à un captage sérieux qu'en faisant, à 36 m. en contre-bas de la seconde galerie, une troisième galerie, cette fois dans le lias, et en y creusant un puits de 6,15 m. de profondeur.

*CAPTAGE DE LAMALOU*¹. — *Captage par travers-bancs, allant recouper une source, qui suit un filon ancien.*

A Lamalou-l'Ancien, François, dont on retrouve l'œuvre savante dans tant de sources thermales françaises, a fait un travail tout à fait typique de captage par travers-bancs.

Nous avons vu comment cette source thermale est en relation directe avec un filon de barytine². François s'est dirigé transversalement au filon à travers la montagne, a trouvé l'eau thermale en le recoupant et a achevé de capter la source par un bout de galerie en direction.

A Lamalou-le-Haut, il se présenta, dans le captage, un accident, dont il peut être bon de signaler le remède :

Ces sources sont ferrugineuses et tiennent le fer à l'état de protoxyde, en présence d'un grand excès d'acide carbonique, qui est considéré comme jouant un rôle important dans le traitement balnéaire.

Pour augmenter, à la fois, le débit et l'abondance du gaz carbonique, François avait eu l'idée de faire un sondage dans la source. Celle-ci lui échappa par une crevasse et tarit momentanément.

François remplit alors, non sans peine, le sondage de béton, parvint à obstruer la crevasse ; puis, reprenant son forage à travers la masse de béton maintenant consolidée, arriva, comme il le désirait, à augmenter notablement le débit.

*CAS DE GELEZNOVODSK (CAUCASE)*³. — *Source sortant des diaclases du porphyre pétrosiliceux, recouvert par des marnes éocènes, des éboulis et un dépôt de travertin. — Travers-bancs dans les terrains éboulés, dirigé vers le porphyre, avec puits de ventilation à l'extrémité.*

¹ Voir p. 64, 143, 274, 313 ; bibl., p. 274.

² Voir p. 274.

³ 1884. DRU. *Mémoire sur le Caucase*, p. 62 et pl. 34. (Voir plus haut p. 449 et 483.)

Nous avons déjà eu à étudier divers procédés de captage, em-

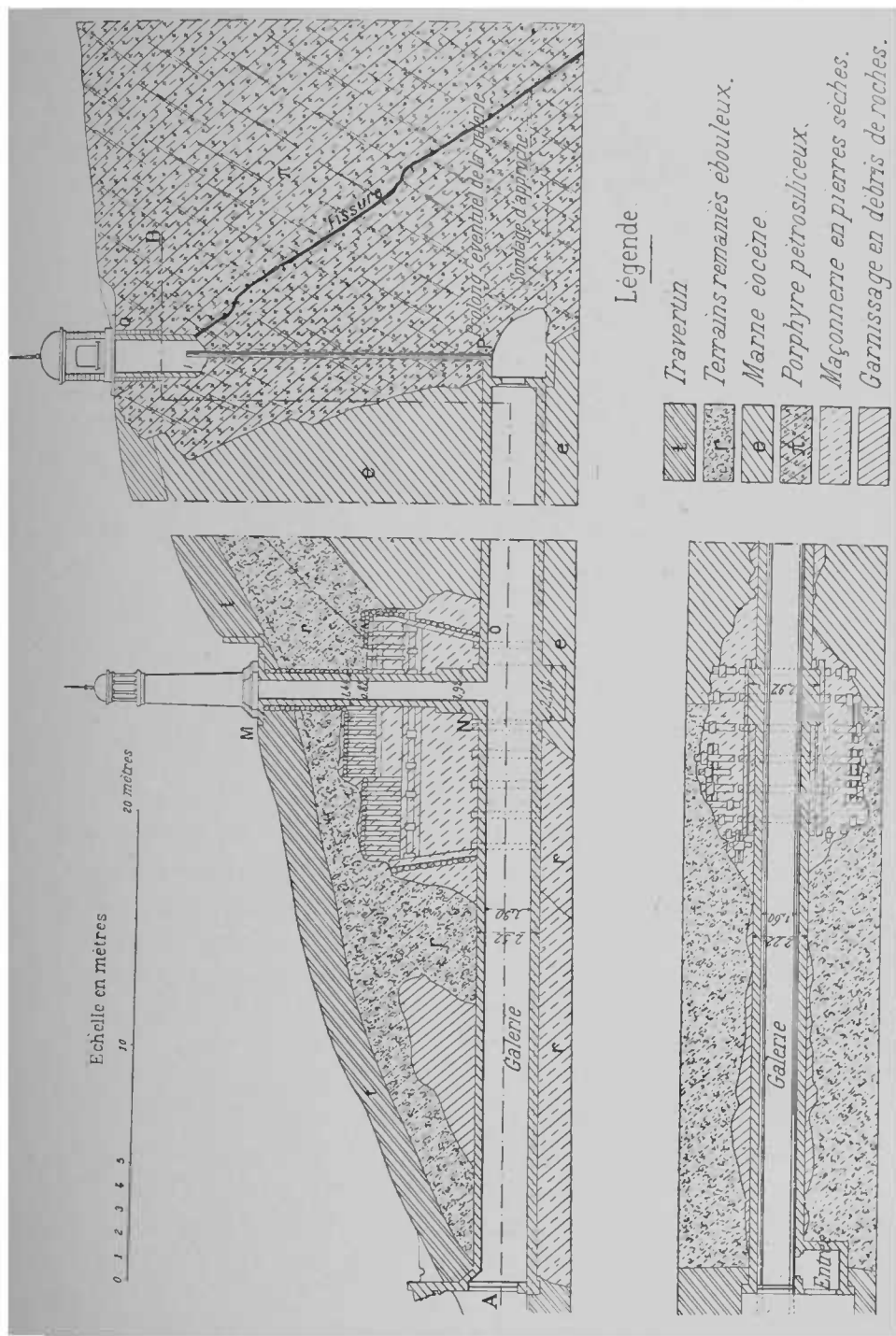


Fig. 99 et 100. — Geleznovodsk. Sous-groupe de l'Ouest. Projet de réfection de la galerie n° 2 par M. Dru.

Coupe longitudinale et plan suivant AB.

ployés pour les sources de Geleznovodsk. Dans la galerie n° 2 du

sous-groupe de l'Ouest, on se heurtait à des difficultés spéciales, par suite de la présence des marnes facilement affouillables. Les figures 99 et 100 montrent les dispositions spéciales, qu'il a fallu prendre pour se protéger contre les conséquences de l'éboulement des marnes. En MN, le glissement des alluvions et des marnes remaniées a déterminé une cloche d'éboulement, qu'on a dû blinder et a conduit, par suite, à établir, en ce point, un premier puits d'aérage.

Pour arriver au jour, on a maintenu le terrain par des cadres superposés, derrière lesquels on a glissé des traverses jointives; puis on a comblé les vides avec des fragments de roches. Dans une première période de travaux, la galerie a été arrêtée en O.

En 1882, M. Dru a conseillé de pousser cette galerie jusqu'au porphyre, en la ventilant à l'extrémité au moyen d'un puits PQ, ou d'un sondage vertical tubé à grande section et de se faire précéder par un sondage d'approche suivant l'axe de la galerie. Il aurait été ensuite assez naturel de suivre en direction le contact de la marne et du porphyre, pour recouper d'autres fissures thermales; l'eau chaude étant déjà très suffisamment abondante, on a laissé de côté ce travail coûteux.

CAS DE SAINT-JEAN DU GARD¹. — *Travers-bancs perpendiculaires à des filons de quartz, suivis par des eaux douces ou thermales.*

Nous avons eu l'occasion d'insister sur le rôle, si fréquemment joué par les épontes des filons de quartz, comme plan de drainage pour les eaux superficielles ou profondes. Toutes les fois qu'une semblable origine a été reconnue pour des eaux et que l'on a la possibilité de partir en travers-bancs d'une vallée voisine, pour aller recouper le filon thermal au-dessous de son émergence naturelle, ce mode de captage se trouve tout indiqué. On sait, en effet, que, plus bas est le niveau de captage d'une source filonienne, plus fort est son débit.

Tel est, d'après M. Dumas, le procédé employé couramment à Saint-Jean du Gard et à Lasalle, dans les Cévennes, pour aller recueillir des eaux douces, qui suivent là de semblables filons de quartz, ou, plus rarement, de granulite, désignés sous le nom de carals. Ces galeries, pratiquées dans un granite assez friable pour

¹ 1877. EMI LIEN DUMAS. *Statist. géol. du Gard*, t. II, p. 58. (Cf. DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, I, 277.) Voir, plus haut, p. 273.

être facile à abattre et néanmoins assez solide pour ne pas exiger de boisements, sont peu coûteuses. La plus longue, qu'on ait exécutée, avait 150 m. Exceptionnellement, en un point de la région nommé Vitrac, une source thermique remonte, le long du même filon de quartz, qui, tout à côté, favorise la descente des eaux froides et pourrait évidemment être captée de même¹.

On peut rapprocher de cet exemple ce qui se passe pour tant de filons métallifères, le long desquels des travers-bancs viennent

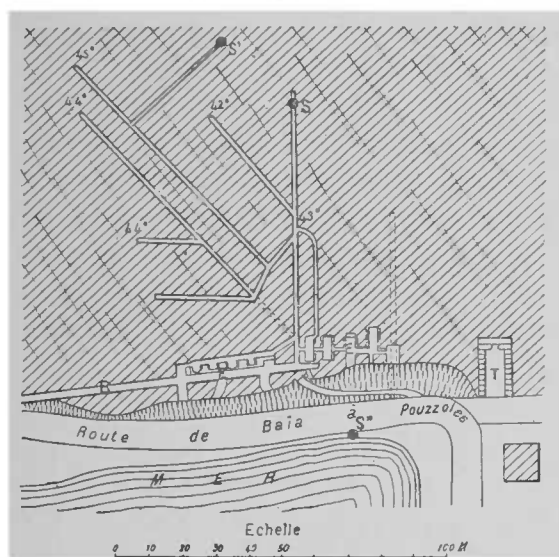


Fig. 101. — Carte des sources de Pouzzoles d'après M. Jervis (in Daubrée).

recouper, sans les chercher, en profondeur, des venues d'eau thermique : ainsi à Freiberg, au Comstock, à la Sierra Almagrera.

CAS DE POUZZOLES (PRÈS NAPLES)². — *Réseau de galeries de drainage.*

Pouzzoles, située à 10 km. de Naples, près de la solfatare du Monte Nuovo, du lac Averno et du cratère d'Agnano, est célèbre pour ses eaux thermales, déjà connues des Romains, qui, aux étuves de Néron, atteignent 86°.

La figure 101 représente, d'après M. Jervis, le réseau compliqué

¹ Sur le prolongement du filon de quartz, qui donne naissance à la source d'Evaux, on trouve, dans des conditions semblables, quelques grosses sources froides, ayant suivi le même plan de drainage.

² Voir DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, II, 196.

des galeries, qui vont drainer les sources S, S' etc., dans le massif de tuf trachylique, pour les amener aux étuves.

Dans le même ordre d'idées, nous citerons le cas de la ville de Verviers en Belgique, dont l'alimentation d'eau se fait par un véritable réseau de galeries de mine¹.

Revue de Liège, 2^e série, XIV, 550. — Sur les systèmes de galeries captantes pour l'alimentation des villes, voir : BECHMANN, *Distributions d'eau*, p. 157 ; D'AUBUISSON, *les Fontaines publiques de la ville de Toulouse* ; DUMONT, *les Eaux de Lyon et de Paris*. Ces galeries captantes ont souvent d'assez graves inconvénients.

CHAPITRE II

MÉTHODES DE CAPTAGE, OU L'ON MET EN JEU LES DIFFÉRENCES DE PRESSION SUR LE GRIFFON ET AUTOUR DU GRIFFON

Les divers procédés de captage, que nous avons décrits jusqu'ici, auraient pu, en somme, à quelques détails près, s'appliquer également au défilage des gîtes métallifères. Ceux, au contraire, dont il nous reste à parler dans ce chapitre, sont d'une nature tout à fait spéciale et fondés sur les lois de l'équilibre des liquides.

On est amené à les adopter, surtout lorsque l'emploi des premiers n'est plus possible ; mais, de toutes façons, il est bon d'en avoir les principes présents à l'esprit ; car il n'est guère de captage, où, ne fût-ce que pour se préserver des eaux froides, on n'ait l'occasion de les utiliser incidemment.

Les cas, où les systèmes de captage, décrits au chapitre précédent, ne s'appliquent plus, sont, comme nous l'avons dit déjà, tous ceux, où il est impossible d'atteindre la roche en place, dans laquelle est encaissée la fissure thermique, de localiser et d'isoler celle-ci : par exemple, lorsque les sources naturelles se trouvent au milieu de graviers et d'alluvions, sur la berge d'une rivière, dans les sables ou galets d'une plage, dans les vases d'un lac, dans les éboulis épais, amoncelés au pied d'une montagne, etc.

Alors, il faut imposer à l'eau la nécessité de sourdre au point déterminé, où on veut la capter, en lui imposant une surcharge sur tous les autres points, où elle pourrait être tentée de chercher une issue. Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, dans cette méthode nouvelle, on ne marche plus au-devant de l'eau thermique : on l'appelle à soi par la création d'une colonne de moindre résistance.

En réalité, quand on va au fond des choses, c'est bien ce que nous avons toujours fait dans les procédés étudiés jusqu'ici : un simple puits, une galerie de drainage sont, eux aussi, des colonnes

de moindre résistance ; mais pour préciser les conditions nouvelles du problème qui se pose à nous, dans les cas antérieurs, nous avons toujours déterminé la production de cette colonne en *diminuant* la pression sur un point choisi ; désormais, nous allons procéder inversement et *augmenter*, au contraire, la pression sur toute la périphérie de ce point. C'est par une *surcharge* que nous déterminerons le mouvement des eaux thermales vers le griffon adopté.

Ramené à ces termes simples, le problème de créer une surcharge autour du griffon comporte deux solutions principales : l'une, qui a été usitée de tous temps et que les Romains ont parfois appliquée avec beaucoup d'ampleur, consistant à adopter une *surcharge solide*, sous la forme d'une nappe continue de béton ; l'autre, qui a été inventée, vers 1840, par François et dont l'usage, bien plus délicat, est également moins connu¹. revenant à prendre une *surcharge liquide*, c'est-à-dire à refouler l'eau thermale par le poids d'une nappe d'eau douce.

La méthode de François, désignée par son auteur sous le nom de *méthode des pressions hydrostatiques réciproques*, repose sur le principe des vases communicants, dans le cas où l'on met en contact deux liquides différents et sur ce fait d'observation que, lorsque ces deux liquides sont, l'un de l'eau thermale, l'autre de l'eau froide, il ne se produit pas, de l'un à l'autre, communication et mélange, ainsi qu'on aurait pu le craindre, mais que la colonne d'eau froide exerce bien sa pression sur la colonne chaude, comme pourrait le faire une nappe de béton.

Les choses étant ainsi, la charge liquide a, sur la charge solide, un double avantage : d'une part, elle épouse bien plus exactement toutes les formes et remplit tout les interstices du terrain ; de l'autre, elle est bien plus aisément modifiable et réglable à volonté : on peut en déterminer la hauteur par tâtonnements successifs et,

¹ La forme, parfois abstruse et même un peu bizarre des rares mémoires, où cet auteur a décrit les procédés, qu'il inventait par une sorte de divination et d'instinct, voisin du génie, ont beaucoup empêché, jusqu'ici, la vulgarisation de son nom et de ses idées.

Voir, outre les articles de lui cités plus loin sur Ussat, Bagnères-de-Luchon, Lavey, etc : 1860. FRANÇOIS. Nombreux articles au *Dictionnaire des eaux minérales de DURAND FARDEL* et LE BRET (pression hydrostatique, captage, etc.). — 1860. FRANÇOIS. *Les Eaux minérales dans leurs rapports avec la science de l'ingénieur* (in-8°, 79 p. Paris, Bonaventure et Dacussot). — 1860. J. FRANÇOIS. *Note pour servir à l'histoire des travaux d'aménagements des eaux minérales françaises* (Ann. d. M., 6^e sér., t. IV, p. 479). — 1868. FRANÇOIS. *Travaux de captage des eaux minérales, établissements thermaux*. Exposition universelle de 1867 à Paris (in-8°, 13 p.).

plus tard, en cas de besoin, on reste libre d'augmenter ou de diminuer cette hauteur.

Il faut ajouter que, dans la plupart des cas, où l'on a adopté cette charge liquide, elle s'imposait; car c'était un obstacle même au captage, qu'il s'agissait de transformer en moyen de captage. On était sur le bord d'une rivière comme à Ussat, ou à Pfäfers, d'un lac comme à Enghien, ou simplement en face d'infiltrations froides, dont il s'agissait d'empêcher le mélange avec l'eau chaude, comme à Bagnères-de-Luchon. La grande ingéniosité du procédé a été d'arriver, par le simple choix d'un plan d'eau convenable, à trouver, dans le mal même, qui pouvait se transformer en désastre, son propre remède et son progrès.

L'idée mère de la méthode est, d'ailleurs, fondée sur un certain nombre de constatations naturelles, dont nous donnerons un exemple détaillé à propos d'Ussat, en même temps que sur des expériences dont nous parlerons à ce moment.

Expliquons rapidement ici de quoi il s'agit.

Toutes les fois qu'une source thermale est en communication indirecte avec une nappe d'eau froide, si le niveau de cette nappe vient à varier, le régime de la source se modifie en conséquence et des mesures suivies de température et de débit montrent que les conditions les plus favorables pour la source sont obtenues, lorsque le niveau de la nappe d'eau voisine est à une certaine hauteur déterminée, reconnue dans chaque cas empiriquement. Tout l'artifice du captage consiste alors simplement à maintenir ce niveau favorable d'une façon continue.

Par exemple, à Balaruc (Hérault), où les sources sortent de marnes miocènes, sans griffon net, au voisinage de l'étang de Thau, l'influence du sens des vents, qui modifie la hauteur de l'étang, est manifeste¹. Ailleurs, c'est l'influence d'un torrent: comme à Châteauneuf (Puy-de-Dôme), source, dont la température et le débit subissent directement l'effet des changements de niveau de la Sioule².

De même, d'après François, à Brig-Baden (en Valais), les eaux,

Il y a quelques années, on a eu l'occasion de le constater légalement, à l'occasion d'un sondage fait par la commune en dehors du périmètre de l'établissement, qui date des Romains. Sur une réclamation du concessionnaire, il fut reconnu que, s'il en résultait une variation dans le régime de la source thermale, elle était moins sensible que celle produite périodiquement par les mouvements de l'étang de Thau.

¹ 1863. D^r ALLARD et BOUCOMONT. *Eaux thermo-minérales d'Auvergne*, chez Delahaye, p. 69.

qui, pendant les saisons d'automne et d'hiver, n'ont que 34 et 35°, s'élèvent jusqu'à 45 et 50°, en augmentant de débit, quand la fonte des glaciers de la Jungfrau, sur les pâturages qui les surmontent, y exerce une charge, refoulant l'eau thermale vers leurs griffons.

Pour des sources d'eau douce, situées au bord de la mer, on trouve également souvent un rapport analogue avec le mouvement des marées : ainsi à Fulham, près de l'embouchure de la Tamise ; à la Noyelle-sur-Mer (Somme), etc., où il existe des fontaines jaillissantes ¹ ; pour la nappe aquifère, située dans les dunes des environs d'Ostende, etc.

C'est, en outre, un fait remarquable et bien conforme à ce que nous supposons plus haut, que l'existence de tant de sources d'eau douce sur le rivage même de la mer, au point de moindre pression entre les terrains voisins, qui exercent leur charge d'un côté et la mer, qui impose la sienne de l'autre. Cela montre bien comment la colonne d'eau froide repousse, dans les circuits souterrains, la pression de l'eau salée, sans se mélanger avec elle. Le fait est encore plus manifeste dans certaines îles coralliennes, recouvertes de sable, dont parle Dana ². En y forant des puits au-dessous du niveau de la mer, on obtient des sources d'eau douce, alimentées par l'infiltration des pluies, qui réussit à contre-balancer les infiltrations marines.

Enfin, dans la mer même, on voit monter, en certains points, sans mélange avec l'eau salée, des sources, soit froides, soit thermales.

Nous en avons cité des exemples à Santorin, à Samos ; il en est d'autres dans les îles Ioniennes, en Malaisie, etc.

Partout, on a la preuve directe de la facilité avec laquelle se séparent deux eaux, différentes par la densité ou simplement par la température.

Tout cela va être bientôt éclairci par quelques exemples.

§ 1. — *Cas, où la pression autour du griffon est réalisée par une couche de béton. — Captages antiques de Plombières et de Bourbonne. — Captage de Barèges.*

CAPTAGE DES SOURCES DE PLOMBIÈRES ³. — *Sources au milieu d'alluvions dans une vallée encaissée. — On établit, en aval, à travers*

DAUBRÉE. *Eaux souter.*, I, 53 à 55 et 158.

Ibid., I, 57. On a observé un fait analogue pour des îles granitiques en Norvège.

³ Voir plus haut, p. 64, 81, 115, 141, 147, 193, 198, 284.

la vallée, un barrage en béton, descendant jusqu'à la roche en place et, par un revêtement de béton sur les alluvions, on force les eaux vers des cheminées de moindre résistance.

Nous avons vu¹ que les sources de Plombières arrivaient à la surface, le long de filons de quartz et fluorine, dans le granite porphyroïde, mais que, sauf les sources tièdes, dont le niveau d'émergence est le plus élevé et situé au-dessus des alluvions, dans la roche en place (en sorte qu'on a pu les suivre en galeries), presque toutes les autres sources les plus chaudes émergeaient dans les alluvions.

Ces alluvions sont trop épaisses pour qu'on ait pu, en général, descendre faire le captage sur la roche en place, surtout avec les difficultés spéciales de travail, que présentait l'afflux constant, en tous sens, d'eaux très chaudes à 70°. Il a fallu, dès lors, recourir à un artifice : au lieu d'aller chercher l'eau, l'attirer en un ou plusieurs points déterminés, par une pression, opposée partout ailleurs, pression qui, dans ce cas, a été celle d'un revêtement de béton.

La méthode a été appliquée là par les Romains et l'a été avec une telle perfection que, lorsque de 1856 à 1861, M. Jutier fut chargé de restaurer le captage détérioré par le temps, il put s'attacher, avant tout, à rechercher la direction et l'idée mère des travaux romains pour les utiliser, n'ayant, dans certains cas, qu'à tourner un robinet, fermé depuis des siècles, pour faire revivre une source tarie. C'est donc le captage romain, tel que les travaux de M. Jutier l'ont fait connaître, que nous allons décrire².

Les Romains avaient commencé par détourner le torrent, dont les eaux se mêlaient aux eaux chaudes, et par l'emprisonner dans un lit artificiel, formé d'un canal de 0,75 m. de large, suspendu au rocher de la rive gauche et terminé en aval par un déversoir.

Puis ils se trouvèrent en présence d'une étroite bande de sables et de galets, où suintaient, de divers côtés, des sources chaudes.

Afin d'empêcher ces eaux thermales de s'écouler en aval, on coupa transversalement la vallée, à la hauteur de la source des Capucins, par un barrage de béton de près de 3 m. d'épaisseur, qui descendait jusqu'à la roche et, sur toute la surface des alluvions, autour des sources, on établit un radier de béton de plusieurs mètres d'épaisseur, formant, avec le barrage et la roche

¹ Page 284.

² Voir JUTIER. *Mémoire de 1862*, p. 41, etc.

granitique du fond, une sorte de cuve étanche, où les eaux, emprisonnées avec les alluvions, ne trouvèrent plus d'issues que par un certain nombre de cheminées, dont la principale alimente une immense piscine de 41 m. de long sur 9 m. de large, tenant 400 à 500 m. cubes d'eau.

Restait à se protéger contre l'introduction des eaux pluviales et à déverser dans l'Eaugrogne la décharge des bains.

Le premier point fut obtenu en plaçant des rigoles de pierre de taille autour de chaque édifice et au bas des coteaux, pour recueillir ces eaux froides.

Le second point présentait une petite difficulté; en effet, tout le lit artificiel de l'Eaugrogne était beaucoup plus élevé que les bains, qui ne pouvaient, par suite, s'y déverser qu'en aval, là où l'Eaugrogne reprenait son lit naturel; à cet effet, on établit un canal de 2 m. de haut sur 0,80 m. de large, traversant tout le radier et le barrage de béton.

Enfin, on capta directement, sur le granite, quelques sources, telles que celles des Capucins, des Danies et du Crucifix, en les entourant d'une enceinte de béton, contre laquelle s'appuyaient des radiers successifs de pierre de taille et de béton, de façon à comprimer chaque source vers un orifice unique, qui, à la source des Capucins, était placé au fond d'une piscine et fermé par un robinet de bronze à plusieurs emboitements.

Les produits de plusieurs sources très chaudes, situées dans le haut de la ville et aménagées de même, furent également amenés aux étuves par un énorme tuyau de plomb, avec robinet de bronze de 0,11 m. de diamètre, que, lorsqu'on le découvrit en 1857, il suffit de tourner avec une clef pour donner de nouveau issue à l'eau chaude de la source Stanislas, ayant un débit de 21 litres par minutes, avec une température de 73°9¹.

Le captage romain, déjà très parfait par lui-même, se trouva encore, dans la suite des temps, consolidé par la circulation des eaux thermales, qui, au contact du béton, amenèrent la formation et la cristallisation d'une série de minéraux, dont l'étude détaillée a été faite, dans un mémoire célèbre, par Daubrée².

Quand les premières fouilles de 1857 le firent découvrir, il était recouvert par 1,50 m. à 2 m. de remblais, sur lesquels s'était bâti la

JUTIER. *Loc. cit.*, p. 47.

Cf. JUTIER, 1862, p. 55 à 58.

ville moderne. Pour le compléter, on était forcé d'opérer avec une grande précaution : d'une part, en raison de la position des galeries de recherches sous des maisons à plusieurs étages ; de l'autre, à cause du danger, en touchant imprudemment au béton romain, de perdre le fruit du travail antique.

C'est pourquoi on partit, en galerie, d'un point situé à l'aval, en traversant le barrage de béton et se tenant le plus bas possible pour explorer, le long du thalweg, la gouttière formée par les alluvions au-dessous du radier de béton et, si l'on en trouvait le moyen, atteindre les griffons dans la roche en place. Cette galerie avait l'avantage de pouvoir être convertie en aqueduc au fur et à mesure de son avancement. On dut, cependant, reconnaître assez vite qu'on ne pouvait atteindre la roche en place, à cause de l'abondance et de la chaleur des eaux, qui maintenaient une température de près de 37° dans la galerie et l'on se borna, après s'être rendu compte des points d'émergence de l'eau chaude dans le gravier, à les fixer, au moyen d'enceintes, d'« enchambremens » de béton.

La galerie, dite aqueduc du thalweg, a 1,60 m. de largeur sur 2 m. de hauteur à la clef : elle est en pierre de taille et fondée sur radier en béton de chaux hydraulique de Metz.

Quand on eut capté toutes les sources, on décida, pour les aménager¹, de les réunir en un seul mélange dans un réservoir souterrain, d'où une machine à vapeur remonte l'eau jusqu'aux bassins réfrigérants²

CAPTAGE ROMAIN DE BOURBONNE (HAUTE-MARNE)³. — *Tubes dans un béton.*

A Bourbonne, les Romains avaient capté, au moyen : soit d'un puits en maçonnerie, dit puisard romain ; soit d'un simple tube de plomb eucasté dans une immense couche de béton, soutenue par des pilotis au-dessus de la nappe hydrothermale. Des travaux de réfection, exécutés en 1875, ont mis à découvert tout un système de galeries et de drainages antiques et des tuyaux de plomb avec joints de cuivre, sur lesquels Daubrée a fait de curieuses observations minéralogiques.

Les sources actuelles ont été obtenues par une série de sondages datant de 1864, 1866, 1875, etc.

JUIER. *Loc. cit.*, p. 65.

Voir p. 598 leurs dispositions.

³ Voir p. 59, 102, 147, 153, 160, 193, 277 ; bibl., p. 277.

CAPTAGE DE BARÈGES ¹. — *Source en terrain meuble. — Emploi d'une couche de béton, formant pression autour des griffons.*

A Barèges, les sources émergent à travers des éboulis, recouvrant un calcaire de transition et se divisent en nombreux filets, qui les incrustent.

MM. Peslin (1860) et Genreau (1882) ont refait le captage, en étendant, sur l'alluvion, une couche de béton, dans laquelle on a ménagé, au droit des griffons, des ouvertures, surmontées de colonnes d'ascension en poterie.

§ 2. — *Cas où la pression autour du griffon est obtenue par une nappe d'eau. — Méthode des pressions hydrostatiques réciproques. — Captages d'Ussat, de Lamalou, la Motte, Pfæfers, Enghien, Bagnères-de-Luchon, etc.*

CAPTAGE DES SOURCES D'USSAT (ARIÈGE). — *Cas de sources thermales suintant irrégulièrement au milieu des alluvions du torrent de l'Ariège; impossibilité d'atteindre la roche en place. — Emploi de la pression hydrostatique réciproque.*

Le cas, très original, du captage d'Ussat, exécuté par François en 1838-1839, va être, pour nous, une occasion de préciser ce que nous entendons, avec ce savant ingénieur, par méthode des pressions hydrostatiques réciproques.

Ces sources ² sont situées à environ 22 km. au sud de Foix, sur la rive droite de l'Ariège.

Avant les travaux de François, cette station thermale présentait l'aspect le plus lamentable. Les sources, extrêmement irrégulières, sortaient au milieu des alluvions; les baignoires, sans fond, et formées de quatre pans d'ardoise, étaient creusées dans les alluvions mêmes et solidaires l'une de l'autre, c'est-à-dire qu'on ne pouvait les vider qu'en levant une vanne de fond située à l'aval, de manière à faire baisser le niveau général de la nappe d'eau, qui suintait au milieu des alluvions.

En outre, les sources, n'étant séparées du lit de l'Ariège que par

LAURANS. *Congrès de Clermont*, 1897. Voir plus haut, p. 110, 169, 316; bibl., p. 316.

Voir p. 402, 468, 321; bibl., p. 321.

une zone d'alluvions perméables, ayant 40 à 50 m. de large, subissaient, d'une manière incessante, l'influence du niveau relatif de la rivière.

Pendant les basses eaux, en été, les sources, plus hautes que l'Ariège presque à sec s'épandaient souterrainement vers la rivière, qui faisait drainage et le niveau de l'eau atteignait à peine 0,30 m. de haut dans les baignoires, dont la moitié restait, en outre, complètement à sec.

Au contraire, quand l'Ariège grossissait et dépassait le niveau des sources, la rivière s'épanchait inversement, à travers les alluvions, vers les sources thermales et l'on avait, dans toutes les baignoires, en dessous de la nappe thermique, une nappe froide de plus en plus haute : en sorte que les malades devaient, d'abord, prendre des bains, couchés sur des piles de briques et qu'à la fin les bains étaient mêmes remplacés par de l'eau froide.

Par une idée extrêmement ingénieuse, François s'est, au contraire, servi des eaux de l'Ariège, pour opérer le captage des sources d'Ussat, qui, comme nous allons le dire, aurait été impossible autrement.

En effet, ayant pratiqué des sondages en profondeur autour des sources, il reconnut que les griffons proprement dits, situés dans la berge de droite et dont nous avons indiqué plus haut la nature, étaient masqués par de gros éboulis calcaires, recouverts, à leur tour, par des successions de sables et de graviers très perméables, résultant d'alluvions modernes. C'est dans les graviers que l'eau arrivait au jour très disséminée et qu'il fallait essayer de la recueillir, sans pouvoir songer à atteindre la roche en place.

Mais, comme nous venons de le dire, la simple observation des variations du niveau et de température de l'eau dans les baignoires montrait à quel point les sources subissaient l'influence directe de l'Ariège et de la charge plus ou moins forte, que l'eau du torrent exerçait sur les terrains perméables situés autour d'elle. Nous en avons signalé les inconvénients : aux basses eaux, fuite des sources thermales vers la rivière; aux grosses eaux, envahissement des sources thermales par l'eau froide de la rivière; il s'agissait, inversement, d'en tirer un avantage, en maintenant, d'une façon constante, la charge correspondante à un état intermédiaire, celui où les eaux thermales atteignaient leur maximum de température et de débit.

François, par quelques expériences en petit, s'assura alors que

deux eaux de température différente, minéralisées par des sels différents et, par suite, de densité différente, pouvaient être maintenues au contact, dans deux vases communicants, sans qu'il se produisit de mélange, même si on ne les séparait que par des corps absolument perméables, du moment que leur hauteur respective était en raison directe de leur densité¹ : il y avait là ce qu'il appelait un équilibre de pressions réciproques.

Dès lors, il commença par établir, en travers-bancs dans la berge, cinq galeries de recherche à 15 centimètres au-dessus du niveau supérieur des eaux thermales. Des coups de sonde au sol des galeries indiquaient leur niveau et leur température, et permirent de se rendre compte exactement des variations de régime des sources thermales. On reconnut ainsi l'existence d'un courant d'eau thermale, se dirigeant, suivant la pente des alluvions, à travers de gros éboulis, cimentés par des concrétions de calcite.

Ces cinq galeries (fig. 102) furent mises en communication avec un aqueduc de distribution de 107 m., qui longe l'arrière de l'établissement et dessert toutes les baignoires, constituant ainsi un véritable réservoir souterrain de 540 m. de développement.

L'établissement lui-même fut reculé de 15 m. vers la montagne, de manière à être placé, non plus sur le sable perméable, mais sur un poudingue résistant et les 33 000 m³ de déblais, que nécessita ce déplacement, furent employés à faire, entre les bains et l'Ariège, une digue insubmersible de 900 m. de longueur, destinée à mettre les bains à l'abri de toute inondation.

La vidange de chacune des baignoires, composée d'un canal en poterie forte avec joints au ciment de Vassy, fut reliée à une vidange générale.

Il restait, et c'était la partie délicate du travail, à couper toute communication entre les eaux thermales et l'Ariège. A cet effet, on avait bien proposé d'établir une enceinte de barrage hermétique, descendant jusqu'à la roche en place; mais il eût fallu s'enfoncer à plus de 10 m. de profondeur, au milieu des sables vaseux, dans des conditions qui rendaient l'épuisement des fondations extrêmement coûteux et même à peu près impossible.

C'est alors que François eut la conception, tout à fait originale, d'établir ce barrage, non plus avec du béton, mais avec une charge d'eau, jouant le même rôle que l'Ariège dans ses crues et consti-

¹ Nous avons donné, plus haut, p. 311, de nombreux exemples naturels qui confirment ce résultat de l'expérimentation.

tuant une Ariège artificielle, telle que le rapport de sa hauteur fût

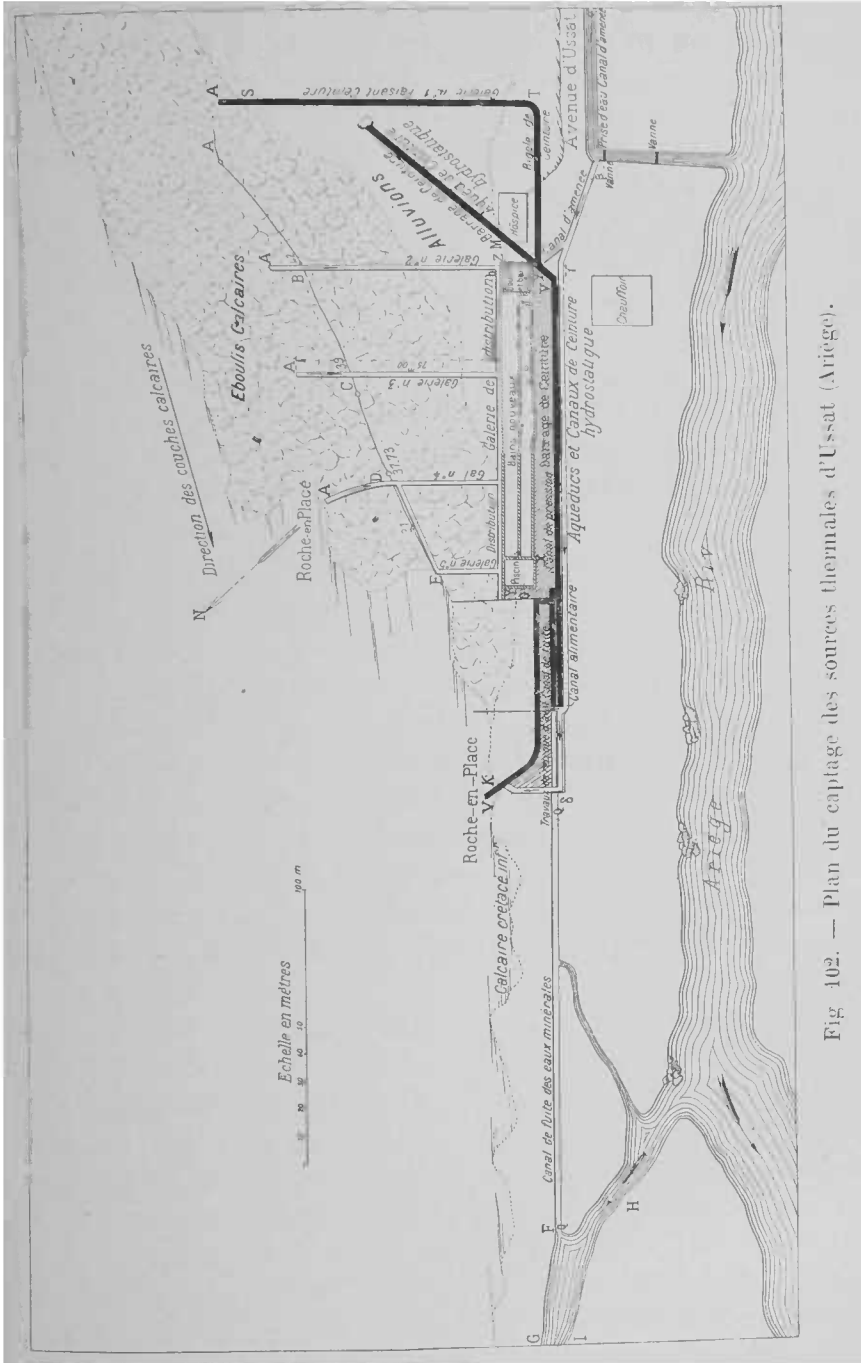


Fig 102. — Plan du captage des sources thermales d'Ussat (Ariège).

à celui des eaux thermales comme 98 est à 102, c'est-à-dire en raison directe des densités de ces mêmes eaux. .

Un barrage de ceinture en béton, de 190 m. de long, ayant été appuyé sur les sables d'alluvions, à 0,60 m. au-dessous du fond des baignoires, on amena, sur sa paroi regardant l'Ariège, au moyen d'un canal alimentaire $\alpha\beta\gamma\delta$, de l'eau froide prise dans l'Ariège à 2 km. en amont (fig. 102). Cette eau, répartie dans un aqueduc de ceinture hydrostatique STUV de 480 m. de développement, creusé dans les alluvions, fut maintenue au niveau convenable (déterminé par l'expérience), au moyen d'un jeu de vannes à l'aval et à l'amont.

Le résultat immédiat de ce travail fut de porter le délit de 290 m³ à 820 m³ par vingt-quatre heures, et d'assurer, dans chacune des galeries de captage, une température constante, qui, d'une galerie à l'autre, décroît, du sud au nord, entre 29°,5 et 25°.

Nous croyons, d'ailleurs, que, postérieurement, on a encore perfectionné ce résultat, en régularisant l'Ariège même, au moyen d'un barrage, à l'aval des thermes, au niveau voulu et inondant la plaine.

CAPTAGE DE LAMALOU-LE-HAUT.

Nous empruntons à François, lui-même la description du captage, fait par lui à Lamalou ¹.

« A Lamalou-le-Haut, les bains sont à cheval sur le thalweg d'un ruisseau, dont l'eau a été dérivée. Ils sont assis sur un massif de micaschiste, recoupé par des filons de quartz, desquels émergent les eaux (bicarbonatées ferrugineuses). Les griffons d'amont, destinés à alimenter les bains, ne pouvaient se relever ; ils se déplaçaient bientôt et paraissaient éparés à l'aval de l'établissement.

« Dans ces conjonctures (1845), un barrage fut établi à cet aval, en même temps que l'on ménageait des venelles latérales entre la construction thermale et les berges de l'ancien lit, de manière à former ceinture de pression à l'aval et sur les côtés. On refoula les griffons d'eau minérale et les dégagements d'acide carbonique et l'on put relever les sources d'amont...

« Il y a plus, un trou de sonde, de 29 m. de profondeur, ayant, en 1858, fourni une source thermale jaillissante, la suppression temporaire de la ceinture de pression provoqua l'intermittence ; son rétablissement fit reparaître l'écoulement constant. »

Dict. DURAND-FARDEL. Art. *Pression hydrostatique*, cf. p. 504.

A la **Motte-les-Bains** (Isère), Firmin avait proposé¹ de capter une source thermique, dont les griffons naturels sont en S (fig. 103) sur la berge droite du Drac, en creusant, sur l'emplacement de la grotte de la Dame, une cuvette ABC, menée jusqu'au niveau ordinaire du Drac; puis, forant au fond un trou de sonde P, par lequel serait affluée l'eau thermique et achevant de dégager la cuvette ADEF.

Il y aurait eu, dans ce captage qui n'a pas été exécuté, une intéressante application de la méthode des pressions hydrostatiques réciproques. C'est, en effet, la pression des eaux douces du Drac sur les filets thermaux divergents S' S'', etc., qui aurait refoulé l'eau thermique dans la cuvette.

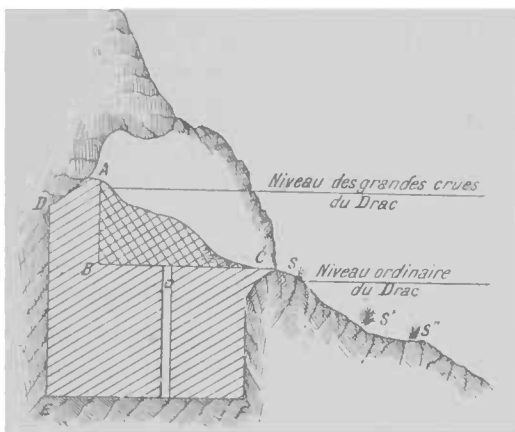


Fig. 103. — Coupe d'un projet de captage à la Motte (d'après M. Laurans).

CAS DES SOURCES DE PFÆFERS-RAGAZ (SUISSE)² — L'application, qui a été faite sciemment, à Ussat de la pression hydrostatique réciproque, s'est trouvée réalisée, au moins en partie, involontairement, dans le captage de Pfæfers, que nous avons décrit plus haut. Les sources sortent là, en effet, sur la berge d'un torrent, que l'on a maintenu à un niveau constant par un barrage, afin de le régulariser et d'éviter les dégradations, qu'il produisait autrefois dans son lit. On a dû ainsi créer une charge, qui n'a pu avoir qu'un effet utile sur les eaux thermales, jadis souvent disposées, aux eaux basses, à venir suinter dans ce torrent et refoulées par là dans les griffons de la berge.

CAPTAGE D'ENGHIEN³. (SOURCE DU LAC). — *Source jaillissant dans la vase, au fond d'un lac — Captage dans une cure, enfoncée dans*

¹ Nous empruntons ce renseignement et la figure qui accompagne notre description à M. Laurans (*Congrès d'hydrologie de Clermont, 1897*, p. 178). Voir plus haut, p. 168 et 328.

² Voir plus haut, p. 477 et 501, ce que nous avons déjà dit, à deux reprises, sur le captage de Pfæfers.

³ Voir : 1833. DE PUISAYE et LECOMTE. *Des eaux d'Enguien au point de vue chimique et médical* (chez Baillière). — 1880. SAUVAGE. *Note sur les sources minérales des*

le fond du lac et protégée contre ses infiltrations : l'eau du lac, tout autour, exerçant une pression hydrostatique utile pour concentrer les griffons dans la cuve.

Les eaux sulfureuses d'Enghien jaillissent, au sud du lac de même nom, au contact du calcaire lacustre de Saint-Ouen et d'une couche, d'épaisseur variable, de marnes à pholadomyes et de sables infragypseux, remaniés à l'époque quaternaire, qui contiennent beaucoup de sulfate de chaux, avec des amas de matières organiques d'origine végétale, irrégulièrement disséminées. On suppose que les eaux ont commencé par s'infiltrer, sous le calcaire de Saint-Ouen, à la base du bartonien, dans les sables de Beauchamp et qu'elles remontent de la profondeur, par leur pression hydrostatique, en se minéralisant au contact des marnes gypseuses, dans des conditions que l'on retrouve à Belleville, à Livry (Seine-et-Oise), à Thieux, Saint-Gratien, Compains, Cernay (Seine-et-Marne), etc.

Les premières sources, découvertes avant 1860, se trouvaient en dehors du lac et avaient été très sommairement captées; mais, en 1861-1862, la mise à sec du lac fit découvrir, le long de la berge occidentale, des griffons sulfureux abondants, qui, captés par François, constituèrent la source du Lac, sur laquelle nous reviendrons. Puis, en 1862, on trouva, par sondages, sur la berge orientale, les sources des Roses et Lévy, qui furent utilisées au moyen de siphons. Enfin, en 1877, on a refait le captage de la source du Lac, dont le débit et la sulfuration avaient constamment diminué depuis quinze ans.

Le procédé de captage consiste à recueillir les griffons dans une cuve de bois, enfoncée dans la vase et absolument isolée des eaux du lac. Pour drainer vers la cuve, non seulement les eaux sulfureuses jaillissant à sa base, mais encore celles qui pourraient avoir une tendance à se perdre dans le terrain tout autour, on fait converger, vers la base de la cuve, des tuyaux horizontaux, plongeant tout autour dans la vase et eux-mêmes séparés du lac, à leur partie supérieure, par une garniture étanche.

Il est évident que, l'appareil ayant été d'abord placé sur le fond du lac mis à sec, quand les eaux de celui-ci sont ramenées, elles exer-

départements de Seine-et-Oise, Seine-et-Marne et Loiret (Ann. d. M., 7^e t. XVIII, p. 102). — 1887. DUBRÉE. *Eaux souterraines*, II, 91. — 1890. DOLLFUS. *Carte géologique de Paris et ses environs au $\frac{1}{40.000}$* Voir plus haut, p. 235.

cent, tout autour de la cuve, une charge hydrostatique, qui tend à y faire converger les griffons sulfureux, à la condition que le niveau de l'eau minérale dans la cuve soit le même que celui du lac : résultat que l'on obtient en puisant dans la cuve par un siphon, dont le débit est réglé en conséquence. On conçoit que, si ce niveau minéral s'abaissait trop, il pourrait y avoir drainage d'eau douce vers la cuve; s'il montait trop, on aurait fuite d'eaux sulfureuses dans le lac. Ce sont les remarques habituelles, avec cette seule différence que, dans les applications ordinaires de la pression hydrostatique, c'est sur le niveau de l'eau douce environnante que l'on agit, tandis qu'ici, celui-ci étant fixé, c'est le niveau de l'eau minérale que l'on règle.

Voici maintenant quelques détails sur l'appareil représenté par la figure 104 :

La cuve, enfoncée dans le sol vaseux du lac, préalablement mis à sec, est en bois et percée, à son fond, comme sur son pourtour, à la base, d'une série de trous, destinés à l'introduction de l'eau minérale, tandis qu'elle est fermée à sa partie supérieure.

Elle est environnée, sur 1 m. de large, par 4 lits superposés de tuyaux de drainage, séparés par des lits de gros silex et reposant, à la base, sur des planches. A la partie supérieure, ce système, qu'on appelle un filtre, est séparé des eaux du lac par des feuilles de plomb, isolées des silex au moyen d'une couche de mousse de 0,10 m. à 0,15 m., pour éviter qu'elles ne soient percées et portant une couche de terre glaise de 1,50 m., débordant, tout autour, de 1 m. En haut de la cuve, un tuyau vertical, de 0,14 m. de diamètre, s'ouvre librement au-dessus des eaux du lac. Enfin,

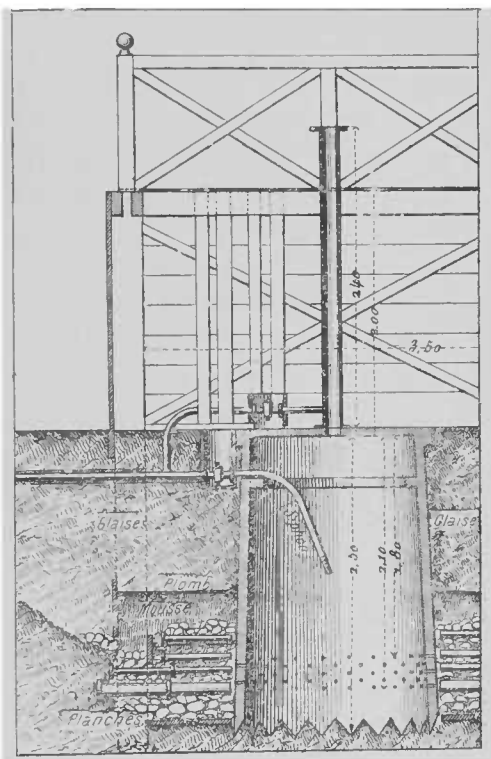


Fig. 104. — Coupe du captage de la source du Lac à Enghien (d'après M. Sauvage).

Echelle de $\frac{1}{66}$.

l'on voit, sur la figure, le siphon qui mène l'eau minérale à l'établissement.

CAPTAGE DE BAGNÈRES-DE-LUCHON (HAUTE-GARONNE)¹. — *Type : griffons dans la roche en place (contact de granulite et de schistes) recouverts par des éboulis. — On va atteindre la roche par des travers-banes et on suit sa surface extérieure par une galerie en direction, qui recoupe les griffons. Application accessoire de la pression hydrostatique : 1° pour le drainage des sources chaudes ; 2° pour leur protection contre des sources froides, qu'on emmagasine et dont la pression est utilisée dans le captage des eaux chaudes.*

Le captage, très remarquable et très complexe, des sources de Bagnères-de-Luchon, exécuté, de 1838 à 1842, puis de 1845 à 1862, par François, nous montrera l'application simultanée de plusieurs des méthodes que nous venons de décrire, et nous servira, par suite, en quelque sorte, de résumé et de synthèse : c'est pourquoi nous nous y arrêterons un peu longuement.

Les sources thermales de Luchon, dont l'importance et la vogue sont bien connues², présentent, en général, un débit assez faible, puisque aujourd'hui encore, avec 48 sources captées d'une façon tout particulièrement soignée; ce débit atteint à peine 244 litres par minute, alors que Aix en donne 2400, Bagnères-de-Bigorre 1535, Cauterets 960, Nérís (par une seule source) 700.

Ce n'est donc pas, et surtout ce n'était pas jadis, une de ces stations thermales, où l'eau chaude est tellement surabondante qu'on n'a besoin de prendre aucune précaution pour la recueillir et il a fallu, au contraire, des travaux très méticuleux, pour permettre de subvenir aux besoins. Ces travaux, dus à François (mort, le 13 septembre 1890, inspecteur général des mines), ont, en outre, le grand intérêt d'avoir été le premier exemple d'un captage vraiment rationnel à notre époque.

Les sources de Bagnères-de-Luchon sourdent, comme nous l'avons vu³, au pied de la montagne de Superbagnères, dans des conditions géologiquement assez simples et, d'ailleurs, fréquentes dans les Pyrénées, au contact de filons de granulite (avec pyrite, tourmaline, émeraude et grenat), recoupant des schistes métamor-

Voir plus haut, p. 60, 69, 410, 468, 492, 316; bibl., p. 316.

On évalue à 30 000 le nombre de personnes qui y viennent chaque année, dont 3 370 sont comptées comme malades à l'établissement.

phiques, micacés, siliceux et maclifères, alternant avec des calcschistes ou des grauwackes (silurien supérieur?).

Il est bien net que ces filons jouent, au milieu de schistes très fissurés, le rôle de murs étanches, de plans directeurs, le long desquels s'accumulent les eaux, que leur pression hydrostatique ramène des profondeurs du sol et, par suite, le but du captage doit être de recouper et de suivre ces contacts.

Mais les conditions du travail se trouvent absolument modifiées par des circonstances, qu'un géologue regarderait, sans doute, comme d'ordre très secondaire et qui, pour l'hydraulicien, jouent un rôle capital.

La première de ces circonstances, c'est l'existence, au-dessus de la roche en place, sur tout le flanc extérieur de la colline, d'éboulis, d'atterrissements, formés de débris de schistes, calcaires, grauwackes, granulites, etc., au milieu desquels, lorsqu'elle était abandonnée à elle-même avant le captage, l'eau thermale venait suinter irrégulièrement de tous les côtés.

Dans ce suintement, il se produisait un phénomène, qui n'est pas sans intérêt au point de vue des gîtes métallifères : l'eau thermale, rencontrant, dans les schistes, de la pyrite, entraînait en dissolution du sulfate de fer, avec du sulfure de sodium, du silicate de soude, etc., apportés de la profondeur ; et ces eaux, plus ou moins vitrioliques, s'allérant au contact de l'air, donnaient des dépôts de sulfure de fer et de silicate de soude, qui cimentaient assez rapidement les conduits, où l'eau avait circulé d'abord¹, de telle sorte que celle-ci, trouvant une résistance de ce côté, était amenée



Fig. 103. — Coupe verticale, à l'Enceinte, des atterrissements modifiés par le passage des eaux sulfureuses (Bagnères-de-Luchon) d'après François.

a, granulite. — b, schistes micacés. — c, atterrissements modifiés. — d, atterrissements.

Voir FRANÇOIS (*Ann. d. M.*, 1842, p. 12). Ces terrains, noircis par les eaux sulfureuses, contiennent un excès de silice, qui se précipite, sous l'action des acides, à l'état gélatineux et, combiné avec 8 ou 10 p. 100 de chaux, donne un ciment énergique.

à chercher une autre issue du côté de ce qu'on nomme l'enceinte, au sud et, peu à peu, transformait ainsi l'éboulis en un massif d'un noir bleuâtre, très compact, très imperméable, plus ou moins taché d'enduits rouges ferrugineux (zone *cc* de la figure 105). En même temps, le niveau d'émergence de la source s'abaissait progressivement avec le creusement de la vallée, comme cela a lieu pour nombre de sources thermales (fig. 105). C'est en se guidant sur la présence de ces enduits qu'on a pu retrouver certaines sources anciennes, qui s'étaient trouvées obstruées par les incrustations¹.

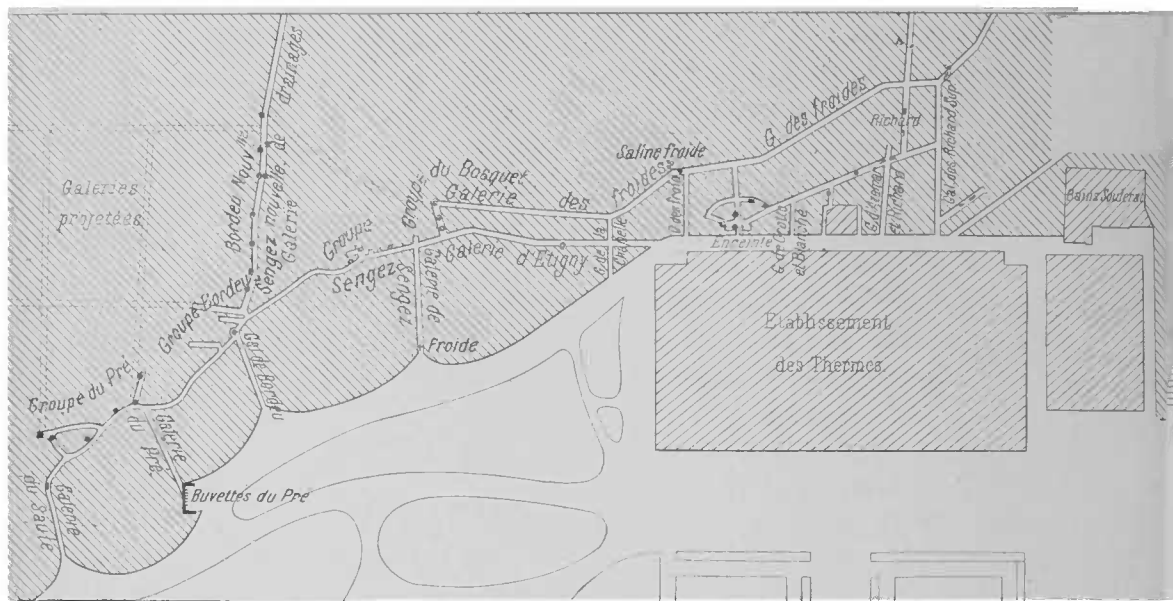


Fig. 105. — Plan général des galeries souterraines destinées au captage des sources thermales de Bagnères-de-Luchon.

En second lieu, il est arrivé, notamment dans la partie appelée l'Enceinte, que la roche en place, d'où suintait l'eau, était formée de schistes tellement broyés, fissurés, disloqués, qu'il était impossible d'y faire un captage direct : ce qui a forcé d'adopter des artifices indirects, fondés sur la méthode des pressions hydrostatiques réciproques.

L'historique des travaux a été le suivant :

En 1831, des recherches d'eau minérale par puits verticaux avaient été ouvertes, au voisinage des sources appartenant à la commune de Luchon, par des pro-

On s'est également servi de l'observation de certaines zones de plus haute température, manifestées sur le sol par la fonte des neiges.

priétaires d'un terrain contigu à celui des thermes de la ville. Une diminution notable en étant résultée dans le débit des principales sources, des travaux défensifs furent préparés par MM. Fontan et Boubée, arrêtés et exécutés en 1836 sous la direction de M. Azémar, alors maire de Luchon¹. Quatre galeries horizontales, ayant ensemble 53 m. de développement, furent poussées dans la mon-

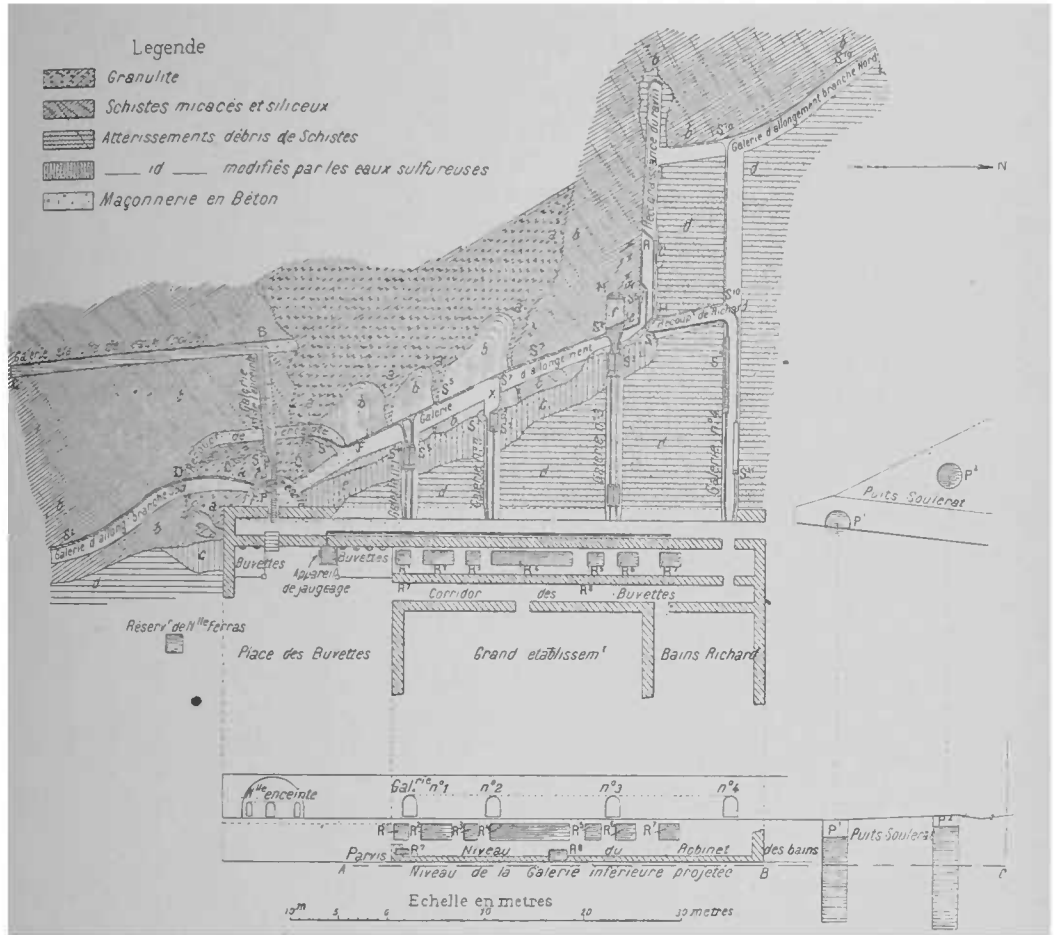


Fig. 107. — Plan des travaux de recherche et d'aménagement des eaux thermales de Bagnères-de-Luchon, exécutés de 1838 à 1841 par François. Cette figure représente, à une plus grande échelle, un détail de la figure 106.

a, granulite. — b, schistes micacés. — c, atterrissements modifiés par les eaux sulfureuses.
d, atterrissements.

tagne, à l'arrière des thermes, dans les atterrissements, qui y recouvrent la roche en place : atterrissements composés de terre argileuse et de débris de granulite et de schistes. Ces galeries, dont aucune ne fut prolongée jusqu'à la roche en place, rencontrèrent des eaux sulfureuses ; mais, ouvertes à des

¹ Voir le plan de ces travaux et des sources de Luchon avant le captage de François dans le mémoire de François (*Ann. d. M.*, 1842, pl. XVII, fig. 1).

niveaux différents, elles se contrarièrent, déplacèrent et bouillèrent les sources anciennes, sans ordre ni méthode.

Il en résulta, néanmoins, un accroissement d'eaux sulfureuses de 83 m³, par 24 heures (118 à 201), qui, dans l'espace de quelques mois, se réduisit à 63 m³. Cette réduction progressive porta la municipalité à s'adresser à un ingénieur et, en 1838, François fut chargé des travaux.

C'est à ce moment, de 1838 à 1842, qu'il fit, à l'arrière des thermes, du côté nord, le premier captage que nous décrirons : système des sources de l'enceinte, galerie étanche des froides, galerie d'allongement OM, le tout formant un ensemble de 372 m. de galeries à grande section (1,60 m. sur 2,10 m.) murillées et voûtées (fig. 106 et 107).

Avant ces premiers travaux, on avait, à Luchon, 7 sources sulfureuses de 32 à 59°, débitant ensemble 118 m³ par 24 heures. Les travaux de la période 1838 à 1842 portèrent le nombre des sources à 15, dont quelques-unes atteignant 66° et cubant ensemble 372 m³ par 24 heures.

Ce volume journalier acquis de 372 m³ détermina, en principe, la reconstruction des thermes et François fut chargé, en 1845, de nouveaux travaux, qui, poursuivis jusqu'en 1862, aux frais de l'établissement, portèrent alors le nombre des sources à 53, avec un rendement total de 659 m³.

La statistique de 1882 donne le tableau suivant pour les 18 sources exploitées :

	DEGRES	DÉBIT MOYEN par minute. (litres.)	USAGE	
			Interne.	Externe.
Ferras ancienne	39 5	1,2	+	+
— nouvelle	43	0,6	+●	+
Etigny	49	6,6	»	+
Enceinte	50	1,5	+	+
Bosquet	46 5	11	»	+
Bordeu	52	46	»	+
Richard inférieure	34 5	19	»	+
— supérieure et Azémar	49 5	30	»	+
Blanche	45	5,7	»	+
Tièdes	41	60	»	+
Reine	56	44,5	+	+
La grotte inférieure	53 5	5,4	»	+
— supérieure	54 5	5	+	+
Bayen	71 5	»	+	+
Romains	45 5	1,1	+	»
Les Prés n° 1.	58 5	3,3	+	»
— n° 2.				
— n° 3.				
		243,9 ou 351 m ³ par 24 h.		

Les sources, dues aux divers captages successifs de François, sont réparties au sol d'un réseau de plus d'un kilomètre de galeries souterraines, dont nous allons étudier la disposition avec quelques détails :

1° **Travaux du nord (1838-1842)** ¹ — Le principe général des travaux, aussi bien au nord qu'au sud, a été de pénétrer jusqu'à la roche en place, en se réglant sur les suintements et les dépôts remarquables dans les atterrissements ² pour arriver le plus près possible des griffons, puis de drainer toutes les eaux thermales, éparpillées dans les schistes, au moyen d'un véritable réseau de galeries transversales ou en allongement, comparable aux galeries d'exploitation d'une mine.

L'ensemble de ces galeries a été établi sur un même plan de niveau, à 3,90 m. au-dessus du parvis des bains ³. On s'est trouvé amené à choisir ce niveau : d'une part, par la nécessité de fournir de l'eau sous pression au service des douches; de l'autre, par le désir de capter les sources le plus bas possible, pour augmenter leur débit et leur pureté.

On a utilisé en outre, comme nous le verrons, la pression hydrostatique.

Les premiers travaux (de 1838 à 1842) comprennent deux parties assez distinctes, que nous examinerons tour à tour : *a.* captage de l'enceinte ; *b.* galerie d'allongement.

a. Captage de l'enceinte. — L'enceinte (fig. 106 et 107) était, avant les travaux, une tranchée à ciel ouvert, anciennement excavée à l'angle S.-O. de l'établissement, où s'écoulaient trois ou quatre sources non captées, au milieu de schistes pénétrés de granulite, très confus, altérés par les eaux et fendillés. La mise à nu et l'isolement des griffons proprement dits y étaient impraticables, tant le sol présentait de petits filets sulfureux, dirigés en tous sens et, de plus, il était nécessaire de se garantir de l'envahissement des eaux froides, très abondantes dans la partie profonde du massif schisteux ⁴. Ce furent ces difficultés spéciales, qui amenèrent François à employer la méthode des pressions hydrostatiques réciproques, dont nous avons déjà donné un exemple à Ussat.

Le premier point fut de capter et d'isoler les sources froides, ce qui se fit au moyen des deux galeries AB et BC : la première poussée, à partir de l'enceinte, suivant la direction de contact du granite et du schiste ; la seconde BC, perpendiculaire aux strates des schistes (à travers lesquels on avait reconnu que suintait l'eau froide). Cette galerie BC est dite la galerie étanche des sources froides. Son effet fut de drainer les infiltrations superficielles au milieu des schistes, qui, particulièrement dans la saison de la fonte des neiges et des pluies, venaient se mêler aux sources sulfureuses et les altérer. Toutes ces eaux froides furent recueillies dans une rigole creusée le long de cette galerie, comme on le voit sur les figures 94 et 95, page 498.

Mais, dans toute cette région de l'enceinte, la stratification des schistes et

Voir FRANÇOIS (*Ann. d. M.*, t. I, 4^e série, 1842, et *C. R.*, 20 déc. 1841).

² La fonte plus rapide des neiges, en certains points de la montagne, indiquait des points de plus haute température, correspondant plus directement aux griffons thermaux intérieurs.

³ M. François aurait désiré l'établir 2 m. plus bas, pour augmenter davantage le débit, en employant, au besoin, des pompes pour le service des douches; il en fut empêché par des résistances locales, tenant à la peur des habitants en voyant modifier le régime de leurs sources.

⁴ On pouvait constater que les sources de l'enceinte résultaient d'un mélange, en proportions variables, d'eau thermale, avec de l'eau froide infiltrée à l'amont.

l'allure des dykes de granulite au milieu d'eux étaient, comme nous l'avons dit, trop complexes pour qu'un simple drainage de ce genre pût suffire, sans artifice spécial, à capter séparément, d'une façon complète, les froides d'un côté, les sulfureuses de l'autre et à empêcher tout mélange entre elles. Le principe des pressions hydrostatiques réciproques, auquel eut recours François, consiste, comme nous l'avons déjà fait remarquer, à forcer les sources thermales à sortir de terre exactement au point désiré, en accumulant, sur toutes les autres issues qu'elles pourraient être tentées de suivre, une pression suffisante. Mais cette pression, on l'obtient ici non seulement par des revêtements en béton sur les vides un peu larges tels que les galeries, mais surtout par l'application d'une colonne d'eau froide sur les interstices trop nombreux et trop minces pour qu'on puisse y accéder directement. Il s'agit seulement de régler la hauteur de cette colonne d'eau froide, de manière que son poids suffise pour refouler les sulfureuses et ne soit pas assez grand pour qu'une partie de l'eau froide aille se mélanger avec elles. En appliquant ici les eaux froides au captage des eaux sulfureuses, on réalisait ce double résultat, non seulement de se débarrasser de la gêne des premières, — qu'en cas de surabondance on écoulait par la galerie, sans les laisser se mélanger avec les sulfureuses, — mais encore d'en tirer une utilité pour le captage de ces dernières.

Voici comment s'y prit François :

Il commença par entourer toute la zone d'émergence des griffons sulfureux de l'enceinte, c'est-à-dire le contact assez compliqué de la granulite et des schistes par le recoupement courbe DEF, maintenu à cheval sur la limite des deux roches. Complété par les galeries AD, AF, ce recoupement constituait deux *piliers de captage* O, O, vers lesquels il s'agissait de diriger les griffons sulfureux. Pour cela, on les y emprisonna, en quelque sorte, par un barrage souterrain continu, en plaçant, au sol de tous les percements voisins de l'enceinte, dans l'enceinte elle-même et dans la plus grande partie du chemin de ronde, un massif de béton hydraulique, descendant à 4 m. au-dessous du plan des travaux. Des regards, ayant été ménagés dans le béton, aux points où, antérieurement, se produisaient déjà des filets sulfureux, constituèrent aussitôt des points de moindre résistance, où l'eau, sous pression dans le sol et ne trouvant plus ailleurs d'issue, se précipita, formant la nouvelle Ferras S³ (38 784 litres par 24 heures à 29°) et la nouvelle Blanche S⁴ (32 400 litres).

Cependant, le barrage de béton laissait encore aux eaux sulfureuses une issue libre en dehors des piliers O, vers la galerie BC et une partie d'entre elles allait s'y mélanger aux froides, dont la température atteignait ainsi 18°. On transforma alors la rigole de cette galerie des froides et celle de la galerie de l'enceinte en une sorte de retenue d'eau à niveau constant, ce niveau étant tel que les sulfureuses fussent nécessairement refoulées par la charge vers S³ et S⁴. C'est-à-dire que l'on établit, sur la rigole de la froide, une vannette à seuil, destinée à en relever à volonté le niveau et l'on s'arrangea même de manière à pouvoir, en cas d'insuffisance des sources froides pendant l'été, introduire, dans cette rigole, une dérivation des eaux extérieures du Pré Ferras¹

Le niveau, déterminé par tâtonnements, qui donnait le maximum de débit et de température pour les nouvelle Ferras et nouvelle Blanche, fut de 0,22 m.

Cf. D^r LAMBRON. *Les Pyrénées*, p. 397, et C. R. 20 décembre 1841, p. 13.

au-dessus de l'émergence de celles-ci. On constitua ainsi une sorte de *digue hydraulique*, s'opposant en permanence à tout mouvement et à toute perte des eaux chaudes vers le sud-ouest¹.

b. *Galerie d'allongement*. — La figure 107 montre suffisamment comment quatre galeries en travers-bancs 1, 2, 3, 4 furent foncées jusqu'à la roche en place, le long de laquelle une galerie d'allongement FIII L eut pour but de constituer un drainage des divers suintements sulfureux, rencontrés au contact de la granulite et des schistes : cette galerie d'allongement fut maintenue, tantôt à la limite de la roche en place, tantôt entre la roche pourrie et la roche solide.

Nous avons dit, plus haut², quelles dispositions, communes à toutes les galeries de Luchon, et pouvant être adoptées pour d'autres sources du même genre, ont été appliquées là afin d'obtenir des eaux pures, bien filtrées et non altérées au contact de l'air; mais il convient de signaler, dès à présent, une seconde application, qui fut faite à la galerie 3 de la pression hydrostatique réciproque.

Les suintements sulfureux S_8 et S_9 de cette galerie se trouvaient dans des conditions spéciales; car, ainsi que le montre la figure 107, le bord du massif schisteux fait, en H, un coude brusque, à la rencontre d'un ancien ravin, aujourd'hui souterrain et recouvert d'atterrissements. L'existence de ce ravin souterrain, la forte inclinaison et l'état fendillé des strates amènent, de ce côté, l'introduction abondante des eaux superficielles, qui, au contact des pyrites, donnent, par des réactions décrites plus haut d'une façon générale, du sulfate et du sulfure de fer, de l'acide sulfurique et de l'alun. Il fallait, là comme à l'enceinte, protéger les sources chaudes contre tout mélange avec ces eaux froides vitrioliques et le procédé adopté fut à peu près semblable.

La galerie n° 3 fut prolongée dans la roche au delà de la galerie d'allongement de 4,20 m. (fig. 106 et 107), et, sur le sol de ce percement MN, on établit un barrage en béton de 0,70 m. de profondeur, de manière à retenir en N quelques filets ascensionnels, qui, ne pouvant plus s'échapper vers M, furent forcés de se diriger, au travers des schistes, vers la galerie d'allongement, où la rigole de recette fut approfondie à cet effet. Par ce mouvement inverse et rétrograde, ces filets sulfureux balayèrent et entraînèrent les infiltrations vitrioliques, qui, de leur côté, avaient auparavant une tendance à s'écouler vers M. Il en résulta, au point R, une source sulfureuse et vitriolique, qui fut, comme l'indique le plan, captée isolément et dirigée dans la galerie n° 4 pour être adaptée à des usages spéciaux.

2° **Travaux du sud**. — Les travaux du sud, exécutés de 1843 à 1862, en même temps que la reconstruction de l'établissement, eurent pour but de capturer une série de suintements thermaux et salins, qui, là comme au nord, sortaient d'atterrissements noirs, cimentés par du sulfure de fer, révélant l'exis-

François fit, en outre, creuser, au centre de l'enceinte, ce qu'il appelle un « puits de pression » en relation avec la source froide. Ce puits, dont il n'explique pas l'usage, devait être rempli d'eau froide jusqu'au même niveau que la rigole et avait, sans doute, pour effet de créer une charge hydrostatique autour de lui.

² Page 498.

tence d'importantes sources anciennes : on opéra par une série de galeries de drainage avec travers-bancs, tout à fait analogues à celles que nous venons de décrire, en agissant, pour l'exploitation des filons aquifères, absolument comme s'il se fût agi de filons métalliques.

L'ensemble de ces travaux souterrains du sud¹ comprend : une longue galerie d'allongement dans la roche en place, qu'on aborda par les six galeries de Lachapelle, du Bosquet, de Sengez, de Bordeu, du Pré et du Saule, ouvertes à travers les atterrissements ; puis, les travaux de pénétration en roche de ces groupes et, toujours dans la roche en place, une autre galerie, dite de drainage.

Les galeries d'allongement de Bordeu et du Pré ont permis, avec la galerie dite du drainage, de circonscrire et de drainer le massif de roches situé au sud. Il en est résulté, à la rencontre des contacts de la granulite de Bordeu-Pré avec les phyllades, tout le long de la galerie de drainage, une série de sources chaudes.

De même, la galerie d'allongement a donné, à la rencontre des anciens chemaux hydrothermaux, obstrués par le dépôt du sulfure de fer, plusieurs sources nouvelles, qui se sont trouvées de composition beaucoup plus stable que celles du nord.

En outre, la galerie des froides, dont nous avons vu le rôle dans le captage de l'enceinte, fut prolongée au sud pour y produire les mêmes effets, c'est-à-dire pour recueillir les eaux ferrugineuses froides dans une rigole collectrice, maintenue à un niveau constant et constituant, à l'intérieur de la montagne, une digue hydraulique², qui refoulait les sulfureuses vers les griffons principaux.

¹ Rapport manuscrit de François à l'Exposition universelle de Londres (27 mars 1862).

² On conçoit qu'au-dessous du niveau d'eau de cette rigole, les schistes fissurés, dans lesquels elle est creusée, sont imbibés et saturés d'eau froide en charge, qui oppose une résistance invincible à l'échappement des filets sulfureux de ce côté.

En même temps, quand les eaux froides sont surabondantes, à l'époque de la fonte des neiges, on leur donne, par cette galerie, un écoulement naturel, qui les empêche de se mettre elles-mêmes en charge trop forte et d'aller sortir par les issues des sulfureuses.

CHAPITRE III

RECHERCHE DES SOURCES THERMO-MINÉRALES PAR SONDAGES VERTICAUX

§ 1. — *Généralités. — Cas où l'on emploie les sondages. Application : 1° à la recherche profonde de sources thermales filoniennes, dont en possédait le griffon naturel à la surface ; 2° au captage de nappes artésiennes. — Exemples de sondages pour des sources filoniennes ou artésiennes (la Bourboule, Teplitz, etc.).*

Capter une source thermale par sondage, c'est faire, en somme, une sorte de compromis entre les deux grands principes de captage exposés jusqu'ici : l'un, consistant à aller atteindre la source par des travaux de mine ; l'autre à l'attirer par une dépression locale. C'est pourquoi, nous l'avons dit, nous avons isolé ce procédé pour lui consacrer un chapitre tout spécial.

Le sondage pourra, d'ailleurs, être très peu profond, comme à Châtelguyon, à Vittel, etc.¹ et se restreindre à un simple tube ascensionnel enfoncé dans le sol, ou même dans un massif de béton, ou dans un puits d'isolement ; ou, au contraire, il atteindra plusieurs centaines de mètres, comme à Teplitz. Dans le premier cas, il semblera se rattacher aux procédés ordinaires d'excavations superficielles, tandis que, dans le second, il présentera un caractère tout à fait particulier ; mais l'idée mère n'en restera pas moins la même et le travail consistera toujours à placer, au-dessus d'un griffon profond, un tube vertical de faible diamètre, par lequel l'eau trouvera, vers la surface, une issue rapide, sous une pression inférieure aux pressions environnantes.

L'emploi de la sonde pour les eaux minérales a été assez anciennement pratiqué en Allemagne, dans le Taunus ; en France, ses

¹ Voir plus haut, p. 472 et 481.

premières applications datent de 1840 et eurent lieu à Vichy, Cusset, etc. Dans ces dernières années, ce procédé de recherches s'est beaucoup vulgarisé, en même temps que s'est considérablement accru le débit des eaux gazeuses comme eaux de table, à la suite des études microbiennes.

C'est, en effet, dans les nappes hydrothermales interstratifiées et atteintes artificiellement par sondages, que l'on puise, en général, les grandes quantités d'eau minérale à basse température, destinées à être expédiées en bouteilles, tandis que les sources filoniennes, plus chaudes et parfois moins abondantes, dont nous venons d'examiner les modes de captage, servent, plus ordinairement, pour l'usage balnéaire¹

La sonde est adoptée dans les travaux d'eau minérale, soit pour les travaux de reconnaissance et de recherche, ainsi que nous en avons déjà vu des exemples, soit pour de véritables travaux de captage, lorsqu'il s'agit d'aller ouvrir une issue à une nappe souterraine jaillissante, ou à des filets d'eau disséminés dans des fissures, et de recueillir l'eau minérale à l'extrémité du trou de sonde, que l'on aura garni d'un tubage.

Nous n'avons pas besoin de rappeler, en outre, combien est fréquent l'emploi des sondages pour l'exploitation de ces deux richesses naturelles, qui se relie si intimement à notre sujet : le sel, extrait de terre sous forme de source salée naturelle ou artificielle, et le pétrole, presque toujours accompagné lui-même, comme nous l'avons vu, de plus ou moins d'eau salée.

Dans ces dernières applications, chacun sait que l'on est loin de rencontrer toujours des sources jaillissantes et qu'on est souvent obligé d'appliquer des pompes sur les sondages². Quand il s'agit d'eaux thermales, cet emploi de sondages munis de pompes, bien que parfois adopté, ne devra être, on le conçoit, admis que comme une ressource extrême, puisqu'il ne permet d'atteindre et, par suite, de drainer, malgré des dépenses et des efforts relativement considérables, eu égard à la faible valeur de la substance extraite,

¹ C'est par une loi analogue que les gisements métallifères sédimentaires fournissent, avec une régularité et une constance inconnues aux gîtes filoniens, la plupart des grandes productions de minerais.

² Nombre de sources, d'abord jaillissantes, voient, peu à peu, descendre leur niveau d'émergence : soit, par elles-mêmes, par une diminution de la force statique accidentelle due à l'accumulation des gaz avant le forage ; soit par l'action funeste des sondages voisins, ainsi que nous l'avons étudié théoriquement page 185 et qu'on l'a constaté à Vichy, Vals, Bourbonne, Pougues, etc.

qu'une portion restreinte de la nappe hydrothermale, celle où le trou de sonde vient tomber par hasard et qui peut même, parfaitement, se trouver correspondre à un ilot stérile au milieu de l'eau minérale.

Nous avons déjà, à l'occasion des captages de Chatelguyon, Vals, Pougues, etc., donné des types de sondages appliqués à des sources filoniennes, sortant de fissures¹ multiples. Nous en étudierons bientôt deux autres : la Bourboule et Teplitz ; mais nous aurons surtout à nous occuper, dans ce chapitre, des nappes interstratifiées ou artésiennes, auxquelles s'applique, en général, plus particulièrement, ce procédé de captage.

Deux cas principaux peuvent motiver l'emploi de sondages pour les sources thermales :

1^o Dans des circonstances relativement rares, il arrive qu'ayant le griffon d'une source thermale à la surface, on trouve avantageux, pour une raison quelconque, d'aller recouper en profondeur le réseau de veines aquifères, qui l'alimente.

C'est, par exemple, ce qui s'est passé, comme nous le dirons plus loin, à la Bourboule ; c'est aussi ce que François a fait à Royat et à Lamalou ; c'est enfin ce qui a eu lieu dans le captage très curieux de Teplitz, sur lequel nous allons revenir.

On est amené à recourir à ce système, soit pour augmenter le débit d'une source thermale en abaissant son plan de captage, ou facilitant son issue au jour, soit pour assurer sa conservation contre des dangers d'infiltrations ou de dislocations superficielles, en allant la chercher au-dessous de la zone influencée par les causes extérieures, qui pourraient produire ces dangers (cas de Teplitz).

2^o Dans le second cas, beaucoup plus fréquent et surtout susceptible d'applications beaucoup plus développées, on suppose l'existence, à une profondeur parfois à peu près exactement connue, d'une nappe liquide ou d'un système de filets thermaux, renfermés dans une couche perméable ou dans les fissures d'une strate sédimentaire, sous le couvercle d'une couche imperméable. Que cette nappe se compose d'eau douce, comme dans le cas des puits artésiens, destinés à alimenter des villes ou des usines ; qu'il s'agisse d'eau thermale comme à Saint-Yorre (près Vichy), à Vals, etc.,

¹ Nous renvoyons également au paragraphe concernant l'influence réciproque de sondages voisins (p. 183) et à celui sur les eaux de Pougues, p. 184 et 269.

ou de pétrole, comme en Pensylvanie, au Caucase, etc., ou même d'un gîte de sel, qu'on transformera artificiellement en dissolution salée par l'adduction, dans le sondage même, des eaux superficielles, le problème général du sondage est toujours le même dans ses grandes lignes et nous ne pouvons que renvoyer, pour l'ensemble du sujet, aux traités spéciaux, où il se trouve développé¹.

Cependant, suivant la nature de la substance que l'on recherche, il peut y avoir des précautions spéciales à prendre : par exemple, au sujet des nappes aquifères ou minéralisées que l'on rencontre, en général, avant d'arriver au niveau principal de captage; au sujet du tubage, de la régularisation de l'écoulement des eaux, des gaz, etc.

C'est sur ces questions surtout que nous aurons, par suite, à insister dans des paragraphes ultérieurs.

Les deux cas, que nous avons supposés, différent, en général, entre eux, par la composition chimique et la température des eaux dont il s'agit et il en résulte certaines modifications dans les détails du captage.

Cela se conçoit aisément : une nappe interstratifiée a bien des chances pour s'être refroidie dans les épanchements latéraux qui l'ont produite et, dès lors, pour qu'on juge utile de la capter comme source thermo-minérale, il faut qu'elle soit remarquable par sa composition chimique, le plus souvent par ses gaz, parfois par sa forte teneur en sels; une source filonienne, au contraire, peut très bien être simplement thermale et sa pauvreté en gaz facilite, à bien des égards, le captage.

Il n'est pas, croyons-nous, nécessaire de donner ici de nombreux exemples des cas où l'on utilise le second type de sondages, appliqués à la recherche de nappes artésiennes; car le fait est suffisamment connu de tous et nous aurons bientôt l'occasion d'insister assez longuement sur les captages de Vichy et du Caucase, qui sont une application de ce principe. Peut-être, au contraire, est-il bon, avant d'étudier en détail l'exécution d'un sondage, de montrer, par quelques faits précis, comment on peut être amené

¹ Il est à peine besoin de dire qu'on peut être conduit, pour bien des motifs, à rechercher une source thermale, dont l'existence est simplement présumée, au moyen d'un sondage. Ainsi des dégagements d'acide carbonique, des suintements bitumineux pourront faire supposer des eaux acidulées ou des pétroles. Une coupe géologique, montrant la présence, à une certaine profondeur, de niveaux salifères, conduira à poursuivre des eaux salées, qu'elles soient ou non jaillissantes, etc.

à rechercher, de cette façon, dans la profondeur du sol, des sources thermales filoniennes, dont on possédait déjà, à la surface, le griffon naturel, mais que l'on pense, en s'enfonçant, rencontrer dans des conditions plus avantageuses. Le cas simple de la Bourboule et celui, plus compliqué, de Teplitz nous suffiront.

CAS DE LA BOURBOULE (PUY-DE-DOME)¹ — *Veines hydrothermales dispersées dans une brèche trachytique et recoupées par des sondages.*

La disposition des sondages de la Bourboule est bien mise en évidence par la figure 6 (p. 58). L'eau thermale, arrivant de la profondeur par une faille très irrégulière, le long d'une paroi de granite, se disperse dans une brèche trachytique, au-dessous d'un banc de tuf plastique imperméable. On a foré une série de sondages, dont le plus profond à 161 m., pour aller rechercher l'eau thermale dans ce terrain fissuré, absolument comme on le fait dans le cas des nappes artésiennes, qui sera l'objet d'une description ultérieure. Ces forages ont eu pour effet de tarir les suintements naturels, qui se produisaient sur l'affleurement même de la faille.

CAPTAGE DE TEPLITZ ; SES DÉFENSES CONTRE LES TRAVAUX DE LA MINE D'OSSEG² — SONDAGE DE RUDIAY.

La proximité de l'importante source thermale de Teplitz en Bohême et d'une mine de lignite en exploitation a donné lieu, depuis vingt ans, à une série d'incidents, de disparitions de la source et de mesures de protection diverses, dont l'explication et l'historique ne seront peut-être pas sans intérêt général. Au voisinage, à Rudiay, on a fait également quelques travaux curieux.

Les sources de **Teplitz**, dont nous avons donné antérieurement la description géologique, sortent, comme nous l'avons dit, des diaclases d'un porphyre, sur le bord sud d'un bassin tertiaire, où se trouvent des exploitations de lignite (notamment, à 7 kilomètres au S.-E, celles d'Osseg)³.

Le soubassement du bassin est formé, à Teplitz, de porphyres, qui, sur le versant nord, à 4 kilomètres de distance, reparaissent au Thiergarten, où ils s'élèvent vite de plus de 300 mètres au dessus de Teplitz, jusqu'à la cote 600.

¹ Voir p. 58, 90, 102, 108, 168, 256 ; fig. 6, p. 58 ; bibl., p. 256.

² BRISSE. 1889. Journal de voyage manuscrit n° 867 à l'École des Mines, page 17.
— Voir, plus haut, p. 199, 291, 303.

³ Voir plus haut, p. 303 et fig. 50 et 51.

Sur le versant sud de Teplitz, des coulées de basalte et de phonolithe dépassent la cote 300.

Au fond du bassin, on trouve d'abord une faible épaisseur de crétacé, les couches cénomaniennes de Korycau, surmontées de sénonien à lignites; puis, aussitôt, par suite d'une lacune habituelle en Bohême, les couches à lignites de l'oligocène moyen.

Les eaux thermales, comme nous l'avons dit, soit qu'elles proviennent des basaltes du sud ou des porphyres du nord, paraissent suivre le plan de contact du porphyre et des terrains sédimentaires superposés.

Cela étant admis, il arriva, le 10 février 1879, que les travaux de la mine de lignite d'Osseg vinrent inopinément atteindre un piton de porphyre, dont on ne soupçonnait pas l'existence; aussitôt, une venue d'eau formidable se produisit dans les galeries de la mine, où elle fit 87 victimes; l'eau s'éleva, dans certains puits, de 59 mètres et, en même temps, les sources de Teplitz-Schönau cessèrent de jaillir, la galerie de mine ayant créé, sur le filon aquifère, un orifice de moindre pression que les griffons naturels¹.

Pour y remédier, on se mit au travail, à la fois, sur la mine et sur la source.

Dans la mine, à Osseg, on fonça un puits spécial, pour y installer des machines d'épuisement et arriver, en enlevant l'eau plus vite que le percement ne l'épanchait, à assécher le point critique, absolument comme on fait lorsqu'on veut travailler sur le griffon d'une source.

La galerie une fois abordable, on dériva les eaux dans une galerie auxiliaire; puis on exécuta les maçonneries dans la galerie principale et on prépara la mise en place d'un clapet de fermeture; on boucha ensuite la galerie auxiliaire et, finalement, on descendit le clapet. Trois autres barrages de sûreté furent exécutés dans les galeries voisines. L'ensemble de ces travaux dura deux ans.

Pendant ce temps, à Teplitz, on s'occupait, d'autre part, d'aller rechercher, en profondeur, les sources perdues, au moyen d'un puits placé sur le filon aquifère, le puits des bains de la ville, c'est-à-dire qu'à la fois on leur créait une résistance du côté de la mine et un dégagement, une colonne de moindre pression dans le puits.

Deux coupes verticales ci-jointes (fig. 108 et 109) montrent, d'après M. Brisse, la disposition du puits et des galeries latérales (AB, CD, EF, GH), qu'on fit alors à divers niveaux pour aller couper le filon aquifère. Le travail fut arrêté

CL. DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, II, 148. M. l'ingénieur Klönne a signalé, dans cette masse d'eau de près de 800 000 mètres cubes, qui avait rempli les galeries d'Osseg, des mouvements curieux de flux et de reflux, où M. Giulio Grablowitz a cru observer une certaine coïncidence avec les mouvements luni-solaires. (LAGRANGE, *Annales de chimie et physique*, 1882, t. XXV, p. 533); d'après GRABLOWITZ. *Sul fenomeno di marea osservato nelle miniere carbonifere di Dux in Boemia* (Bolletino della Soc. adriatica di Scienze naturali in Trieste, vol. VI, fasc. I, 1880) et KLÖNNE. *Die periodischen Schwankungen des Wasserspiegels in den inunDIRTEN Kohlenschachten von Dux* (Ac. des Sc. de Vienne, 22 janvier 1880). Les observations, faites au maréographe, ont duré du 19 juillet au 11 septembre 1879. Pour l'auteur, le phénomène est dû à une attraction sur l'écorce solide de la terre, arrivant à la déformer périodiquement. Il signale, comme rapprochement, la source de Monfalcone, près Trieste, notoirement sujette à la marée. Les conclusions nous paraissent singulièrement discutables; car, à Monfalcone, en particulier, il s'agit d'une simple question de pression hydrostatique.

à une profondeur de 62 m., le volume d'eau fourni par la source ayant atteint le chiffre de 1 m³ par minute.

Après quoi, on laissa les eaux remonter dans le puits; elles atteignirent bientôt un niveau situé à 3 m. au-dessous du sol et s'y maintinrent jusqu'en 1887. Il suffisait alors d'élever l'eau de 4 à 5 m. au moyen de pompes. Mais, à cette époque, un nouveau coup d'eau dans un chantier de la mine d'Osseg, au puits Victoria, amena, encore une fois, une baisse de 200 m. dans le puits de captage de la source thermique, en même temps que la mine se trouvait noyée.

Pour y remédier, on eut alors l'idée de percer, jusqu'à la chambre de travail, centre de l'inondation, six trous de sonde, par lesquels on coula des masses de béton, qui, fort heureusement, finirent par aveugler le trou d'arrivée; on put ensuite dénoyer la mine et effectuer les barrages nécessaires. Mais, tant pour éviter le retour de pareilles catastrophes que pour diminuer les frais de pompage de l'eau à Teplitz, on ne s'en tint pas là, et les mines intéressées s'entendirent avec les trois principaux établissements de Teplitz, Stadtbad¹, Kaiserbad, Schönaubad, pour faire, à frais communs², les travaux nécessaires, afin de capter complètement les sources à un niveau inférieur aux mines et de rendre ainsi mines et sources tout à fait indépendantes.

La méthode adoptée, et c'est là que nous voulions en venir, consista à aller rechercher le filon aquifère par un sondage de 500 m. au-dessous de la cuvette tertiaire. Quelle que soit l'origine première de l'eau, l'expérience a suffisamment prouvé qu'elle abonde, dans le porphyre très fissuré, au contact des couches tertiaires.

¹ Cet établissement appartient à la ville.

² Les mines contribuèrent pour une somme de 136 500 francs; les frais du sondage,

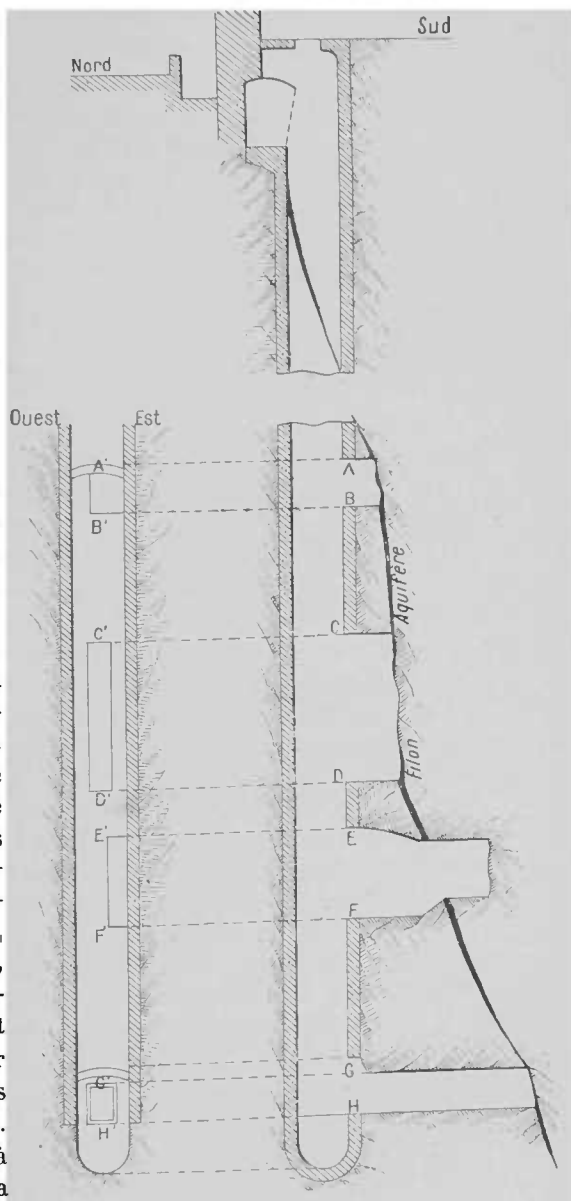


Fig. 108 et 109. — Coupes verticales du puits des Bains de la ville à Teplitz (d'après M. Brisse).

Il était donc logique de penser qu'en allant chercher l'eau thermale à cette profondeur, on la rencontrerait dans son gisement primitif et sans avoir à craindre désormais les dislocations produites par la mine. Nous ignorons quel a été le résultat pratique de cette tentative récente.

La même région de Bohême nous fournit un autre exemple original de sondages, ayant pour but d'attirer des eaux profondes, non plus il est vrai, dans ce cas, pour les utiliser, mais, au contraire, pour en débarrasser une mine¹.

Il s'agit de la mine de lignite de **Rudiay**, à 4 km. de Bilin, qui exploite une couche d'une douzaine de mètres sur un prolongement latéral du bassin de Teplitz-Osseg-Dux. La coupe y est la suivante :

Diluvium	16 m.
Argile.	50 —
Sable aquifère (Schwimmsand)	30 —
Argile.	2 —
Schiste carbonneux.	2 —
Lignite	12 —
Argile	

Comme on le voit, le lignite est surmonté, à faible distance, par une couche aquifère. le *schwimmsand*, qui, étant intercalée entre deux couches d'argile imperméable, arrive en profondeur à renfermer de l'eau à plus de 10 atmosphères de pression. Ce niveau d'eau constitue un danger sérieux pour la mine.

Or, la couche, dirigée N.-S., avec pendage N. de 10°, est coupée à l'ouest par une grande faille, qui la rejette de 40 m. en profondeur et limite en pratique les exploitations. On profite de cette disposition pour faire, le long de cette faille, et à partir d'une galerie située au toit du lignite dans les schistes carbonneux, une série de sondages, espacés de 120 à 150 m. Ces sondages, dirigés de bas en haut, avec une faible inclinaison, partent des schistes carbonneux pour arriver au *schwimmsand*, qu'ils atteignent à une distance d'environ 20 m. L'eau s'écoule avec force dans la galerie murillée à cet effet et barrée, à 200 m. de son extrémité, par un barrage en briques de 1,50 m. d'épaisseur, muni de 3 tuyaux d'écoulement et d'une ouverture rectangulaire. se fermant par un voussoir pour le passage des hommes. Au bout de quelque temps, on peut rouvrir le barrage et l'eau, qui continue à s'écouler par la galerie, est ramenée à la surface au moyen de pompes.

§ 2. — Exécution d'un captage par trou de sonde.

Particularités concernant les sondages pour eaux thermales.

Sur le forage même du trou de sonde, nous n'avons rien de spécial à dire ici et nous ne pouvons que renvoyer, à ce propos, aux

¹ y compris l'installation du chevalement, de la machine, etc., ont été traités à forfait, moyennant 196 francs par mètre d'avancement. L'avancement maximum, en travaillant jour et nuit, a été de 1 mètre par jour.

BRISSE. *Loc. cit.*, p. 50.

traités généraux de sondage¹. Les installations et outils, chevalements, tiges, trépan, cuillers, etc., sont naturellement les mêmes, qu'il s'agisse de rechercher une eau thermale, une couche de charbon ou un minerai quelconque. Le but est pareil dans tous les cas : perforer, le plus vite et le plus économiquement possible, à travers des terrains divers, un trou cylindrique de très faible diamètre et de grande longueur.

La seule remarque générale à faire est que les sondages destinés à la recherche des eaux thermales sont souvent peu profonds : (30 à 50 m., par exemple, dans le bassin de Saint-Yorre, près Vichy, ou à Bourbonne) et l'on peut alors se servir de chevalements légers à charpentes en fer creux, analogues à ceux que MM. Arrault et Dru ont employés pour les sondages d'exploration.

Cependant, sans même parler des sondages pour pétrole et pour sel, ni de ceux, rappelés plus loin², qui ont rencontré des sources thermales en cherchant une autre substance, il n'est pas rare de descendre à une centaine de mètres (source d'Hauterive à Vichy) ou à 161 m. (la Bourboule) et nous avons cité le cas du sondage de Teplitz, que l'on devait pousser à 500 m.

Parmi les particularités relatives aux sondages d'eaux thermales, dont nous allons parler rapidement, quelques-unes sont tirées de l'expérience des pétroliers : ainsi les précautions à prendre, avant d'arriver à la nappe thermale, pour ne pas laisser perdre la pression des gaz et l'emploi possible de dynamite en profondeur pour enrichir une source pauvre. Nous insisterons ensuite, dans un paragraphe relatif au tubage, sur les mesures spéciales, que peut nécessiter la traversée de nappes d'eau douce, afin d'éviter leur mélange avec l'eau thermale, et sur la façon de forcer celle-ci à remonter tout entière dans le tube ascensionnel.

1° Quand on croit approcher d'une nappe d'eau gazeuse, il peut être bon d'avancer lentement, avec des systèmes de tubages munis de robinets, dont on trouvera de bons exemples dans les sondages de pétrole pensylvaniens. Dans ce cas, en effet, comme dans le nôtre, le problème est le même : il s'agit, quand on arrivera au liquide gazeux (eau émulsionnée d'acide carbonique, ou pétrole

1830. HÉRICARD DE THURY. *Sur le percement des puits forés, à l'effet d'obtenir des eaux jaillissantes*. — 1861. DÉGOSÉE et LAURENT. *Guide du sondeur*. — 1889. PAULIN ARRAULT. *Outils et procédés de sondage* (35 pl.). — *Traité d'exploitation des mines*. — *Ouvrages divers sur le pétrole*, etc.

² Page 561.

avec gaz combustibles), de ne pas laisser perdre, subitement, dans la première effervescence, la pression de ces gaz, qui a pour effet de donner des sources jaillissantes et d'éviter, par suite, autant que possible, un pompage.

Le problème présente cependant moins d'intérêt pour les eaux thermales que pour le pétrole, en raison de la moindre valeur de la substance, de la dépense beaucoup plus minime engagée dans les sondages bien moins profonds et de la rareté relative des cas où l'on exploite des sources thermales en les pompant.

Nous verrons, d'ailleurs, que, de toutes façons, il y a certaines mesures à prendre pour le tubage, quand on approche de l'eau à capter.

2° En second lieu, on peut également emprunter à l'expérience des pétroliers un artifice ingénieux, bien que d'un maniement délicat, qui a parfois donné de bons résultats pour enrichir une source appauvrie : c'est l'emploi de cartouches de dynamite, tirées au fond d'un trou de sonde, pour y ouvrir un vide, où le liquide se précipite : peut-être, en partie, par l'effet de la dépression, succédant à une surpression momentanée¹

Ce système a été appliqué pour la première fois, en 1866, en Pensylvanie, par le colonel Roberts, pour un puits à pétrole et nous en citerons bientôt un exemple pour une source thermale à Sauerbrunn² Généralement, dans les sondages pensylvaniens, on le pratique en descendant, dans le trou de sonde, une boîte de fer-blanc de 3 m. de long, remplie de nitroglycérine³, que l'on fait détonner en laissant tomber une masse au-dessus.

On l'a employé, dans certains cas, pour fissurer un terrain, où l'on voulait drainer des eaux douces, difficiles à atteindre sans ce moyen.

§ 3. — *Tubage des trous de sonde. — Choix de la substance du tube ; protection contre les eaux douces ; captage des eaux thermales ; précautions pour les gaz.*

Le tubage des trous de sonde est la partie du travail de sondage, où les captages d'eau thermale se distinguent le plus des forages quelconques. Ce tubage, utile en tous cas pour préserver les parois

¹ Nous en avons déjà dit un mot, page 189.

² Voir p. 546. — RIGAUD en a préconisé l'emploi à Bourbonne (*Ann. d. M., loc. cit.*, p. 449). — Cf. P. CHALON, 1897. *Sur la recherche des eaux souterraines* (C. R. Soc. Ing. Civ., t. II, 1897), résumé par E. AUSCHER, dans la *Gazette des Eaux*, du 13 janvier 1898.

³ 90 litres de nitroglycérine correspondent à 2 160 kg. de dynamite.

contre l'éboulement, devient particulièrement nécessaire, quand il s'agit de recueillir de l'eau, qui a toujours une tendance à désagréger les terrains, au milieu desquels elle circule ; il est, en outre, indispensable ici, pour empêcher le mélange, avec l'eau thermale, des nappes d'eau froide superficielles.

Comme les tubages d'eau thermale seront soumis à des actions corrosives, il conviendra d'en choisir, avec soin, la substance et, comme l'eau y amène des dépôts, il sera bon de pouvoir les curer¹.

D'autre part, ce tubage aura cela de spécial qu'il ne devra pas être seulement une protection, mais aussi un outil de captage, c'est-à-dire qu'il devra être disposé de manière à recueillir toutes les nappes thermales, parfois rencontrées à divers niveaux, et à les isoler des eaux douces.

Enfin, quand il s'agit d'une eau gazeuse, il y aura à prendre certaines précautions pour les gaz, dont nous donnerons des exemples à Saint-Yorre (Vichy), Châtelguyon, etc.

1° Le choix de la substance du tube dépend un peu des cas.

On a quelquefois employé de simples tubages en bois de chêne, ou d'orme, protégés par une enveloppe en ciment, dont nous décrirons, plus loin, une application à Bourbonne; ces tubages ont le défaut d'être épais et de s'altérer vite, surtout dans les parties soumises à des alternatives de sécheresse et d'humidité; mais ils sont économiques et nous verrons que les tubes de fer se percent également très promptement². La figure 110 montre un moyen de les emmancher.

Plus généralement, on adopte la fonte ou le fer, malgré leur corrosion rapide, en raison des facilités de leur emploi. Souvent, on enveloppe le tube en fer d'un coulis de ciment, qui ne donne guère que l'illusion momentanée d'une enveloppe protectrice³.

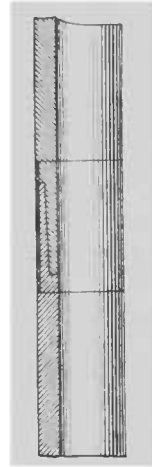


Fig. 110. — Emmanchement de tubes en bois (d'après M. Arault).

¹ Voir, plus loin, à Bourbonne, p. 559.

² Dans le dernier sondage de Teplitz, on avait projeté d'employer un tubage provisoire en tôle, qu'on remplacerait, au dernier moment, par un tubage en bois.

À Pougues, on a pu constater qu'un tubage en fer, enveloppé de ciment, était percé au bout de sept ans; le ciment était sans consistance et il n'en subsistait guère que le sable. C'est, bien souvent, le métal des tubages, qui enrichit en fer les eaux carbonatées.

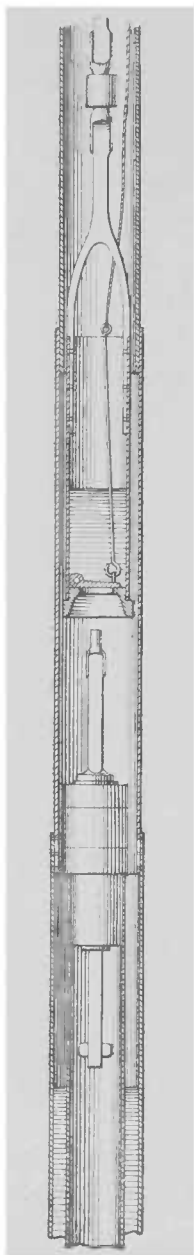


Fig. 111. — Disposition pour cimentage entre deux tubes (d'après M. Arrault).

Le clapet de la cuiller est relevé avec une corde tenue au jour. On voit au-dessous, le tampon placé pour obturer un tubage intérieur.

On arrive à un résultat un peu meilleur en ayant, tout au moins dans la partie supérieure, deux tubes concentriques, le plus grand dit de retenue, le plus petit dit ascensionnel et en coulant du ciment dans tout l'espace annulaire compris entre ces deux tubes, par exemple au moyen de la disposition indiquée (fig. 111). C'est le système de tubage ordinairement usité à Saint-Yorre.

Enfin quand les eaux sont très corrosives, soit très fortement chlorurées, soit très chargées d'acide carbonique, on est parfois forcé, malgré la dépense, d'adopter des tubes de cuivre¹.

La figure 112 montre un tubage en grès, isolé d'un tube ordinaire en tôle par du brai et destiné, par son constructeur, à la circulation d'eaux acides, destinées à être absorbées dans le sol. La même disposition pourrait servir exceptionnellement pour des eaux thermales cor-

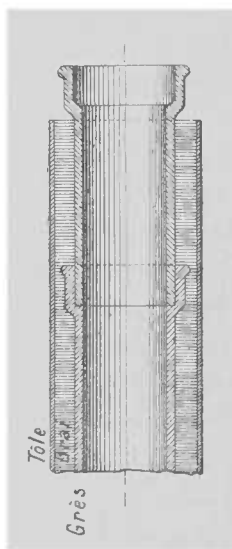


Fig. 112. — Tube composé en grès et tôle avec isolant pour eaux acides (d'après M. Arrault).

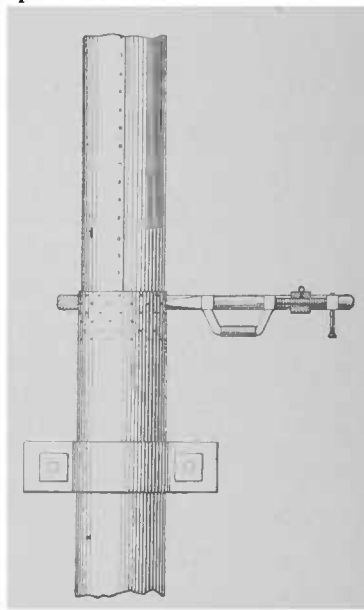


Fig. 113. — Emmanchement de tubes à goujons taraudés (d'après M. Arrault).

rosives, venant d'une faible profondeur. Nous donnons (fig. 113 et 114) des modèles de tubage plus ordinaires.

Nous en donnerons un exemple à Bourbonne, p. 556.

La figure 113 représente un tube à joints coniques, léger et peu coûteux, très facile à goujonner sur place : c'est le type ordinaire, quand on emploie deux tubes concentriques, avec du ciment dans l'intervalle ; le cimentage se fait alors, comme le montre la figure 111.

Quand cette dernière opération est terminée (ce dont on s'assure en sondant le tampon du tube intérieur, dont la surface se couvre de ciment), on le remonte par un simple taraudage, ou vissage à la tige.

La figure 114 représente un modèle de tube en fonte filetée.

2° Défense contre les eaux douces. — D'une façon générale, un sondage, destiné à fournir une source minérale, doit, on le conçoit, être rigoureusement défendu contre les infiltrations froides : ce qui s'obtient par un tubage étanche du haut en bas.

La forme d'un pareil garnissage, dont nous donnerons plus loin des exemples¹, comporte, en principe, un premier avant-puits bétonné, du fond duquel partent une série de tubes, de diamètre décroissant à mesure qu'on s'enfonce (comme les parties successives d'une longueue), avec ciments et bétons intermédiaires.

En dehors de ce cas général, dont nous remettons la description à un paragraphe suivant, il arrive parfois qu'on se heurte à des difficultés spéciales, dont nous allons aussitôt donner l'idée et montrer les remèdes possibles, en racontant ce qui s'est passé aux thermes de *Sauerbrunn*, près Bilin, en Bohême septentrionale². Le remède, adopté là en fin de compte, après bien des tâtonnements, a consisté à obstruer la nappe aquifère par une coulée de béton, à travers laquelle on a repercé un trou de sonde.

A *Sauerbrunn*, une couche mince de calcaire repose sur un fondement de gneiss, et c'est de ce calcaire qu'émergeaient les anciennes sources ; mais, très peu plus bas, dans la vallée, le calcaire disparaît et le gneiss n'est plus recouvert que par quelques mètres de diluvium. Un sondage avait été entrepris pour rechercher directement le filon aquifère dans ce gneiss sous-jacent.

On commença à un diamètre de 460 mm. ; puis ayant rencontré, à 53 m. de

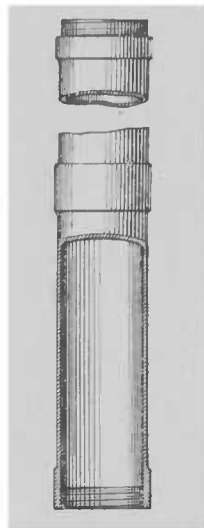


Fig. 114. — Tubes en fonte filetée (d'après M. Arrault).

¹ Voir p. 551 à 555.

² Nous extrayons ces renseignements d'un journal de voyage manuscrit de M. Brisse en 1889, déposé à l'école des Mines (p. 43) ; les thermes de *Sauerbrunn* appartiennent au prince de Lobkowitz. — Voir, plus haut, p. 346, note 1.

profondeur, une fente, qui donnait une très abondante venue d'eau douce, on résolut d'aveugler celle-ci et, pour cela, de pratiquer, sur cette fente, une chambre, qu'on remplirait d'argile.

La chambre fut, en effet, creusée sur 0,80 m. de haut et autant de large, au moyen d'un coup de dynamite, qu'on fit partir au niveau voulu ; il en résulta immédiatement, par application d'un principe, que nous avons signalé plus haut comme pratiqué couramment en Pensylvanie, une venue d'eau très abondante, qui, pendant cinq minutes, donna un jet de 12 m. de haut.

Après quoi, on remplit tout le fond du trou et la chambre d'argile damée, dans laquelle on projetait d'enfoncer un tube jusqu'à un niveau inférieur.

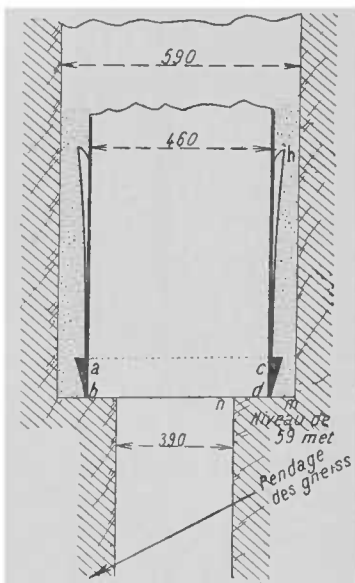


Fig. 115. — Tubage de Sauerbrunn (d'après M. Brisso).

Pour cette dernière opération, il fallut, d'abord, élargir légèrement le trou de sonde : ce qu'on fit au moyen d'un outil composé de deux lames articulées, placées à l'extrémité de la tige de sonde ; celle-ci, en descendant, forçait les lames à pénétrer dans la roche. Puis, on descendit le tube, muni, à sa partie inférieure (fig. 115), d'une enveloppe conique en acier *abcd* et, au-dessus, d'une forte tôle repliée *aech*, à laquelle devait adhérer l'argile. Mais, quand le tube eut été mis en place et l'argile intérieure extraite, la pression de la nappe d'eau emporta l'argile qui garnissait la chambre et l'eau pénétra, de nouveau, dans le sondage, par sa base.

On retira alors le tube et on élargit le sondage au diamètre de 590 mm. sur toute sa hauteur, jusqu'au niveau de 59 m. Cette fois, l'épuisement parvint à assécher l'intérieur du tube et l'on put commencer, au-dessous, le forage d'un nouveau trou de 390 mm. Mais on avait à peine foncé de 1 m. que, par suite du pendage des feuillets de gneiss, dirigé de la veine aquifère vers le trou (voir la figure 115), les eaux, suivant les interstices des feuillets, envahirent de nouveau le trou, en emportant une partie du rebord *mn* et vinrent jaillir violemment jusqu'à la surface. On recommença quatre fois l'opération, en diminuant, chaque fois, le diamètre du nouveau trou, jusqu'à 340 mm., mais sans plus de succès. Il devenait donc nécessaire de recourir à un procédé plus énergique, et l'on se résolut enfin à remplir tout le fond du trou d'une masse de béton, que l'on traverserait ensuite, en dépit des difficultés d'un pareil travail, par un nouveau trou de sonde, ainsi que nous l'avons vu pratiqué par François à Lamalou ¹.

Les tentatives précédentes ayant, malgré leur échec, permis d'approfondir le trou de 340 mm. jusqu'à 70 m. et de découvrir, à cette profondeur, une première source thermique, on commença, en premier lieu, par remplir 15 m. du trou (de 70 à 55) avec du sable fin lavé ; puis on coula, par dessus ce sable,

¹ Voir plus haut, p. 504.

du béton de ciment, jusqu'à ce qu'on eût dépassé le point d'arrivée de l'eau¹. On laissa prendre pendant trois semaines et l'on recommença alors l'enfoncement du tube, en enlevant petit à petit le béton intérieur et en ayant soin de faire couler constamment du béton dans la partie annulaire, jusqu'à ce que le tube vint reposer sur le gneiss. L'opération réussit cette dernière fois, et on put continuer le sondage, après avoir installé, dans le tube de 340 mm., un second tube provisoire, pour éviter de dégrader le premier pendant la manœuvre de la sonde. Le forage fut poussé jusqu'à 130 m. et amena la découverte de deux autres sources thermales.

Dans des cas moins compliqués l'on peut, à la rencontre d'une nappe jaillissante, avoir à utiliser, pour descendre les tubes, un *appareil désensableur*, analogue à celui qui a été employé, en 1880, par M. Arrault, dans le sondage artésien du château d'Eu, poussé jusqu'à 164 m. (fig. 116). Cet appareil consiste en un obturateur *o*, dans lequel passe un tube de petit diamètre *ab*; cet obturateur étant introduit dans le tubage, à la rencontre d'une nappe d'eau jaillissante, la vitesse ascensionnelle de celle-ci s'accroît au passage du tube étroit, de manière à entraîner les sables, et même les gros graviers, qui sont retenus, à l'orifice de ce tube, par une trémie-enveloppe à claire-voie. Avec une descente progressive de cet outil, on obtient un nettoyage rapide et on supprime des manœuvres dans des tubages, quelquefois délicats, comme les tubages en cuivre.

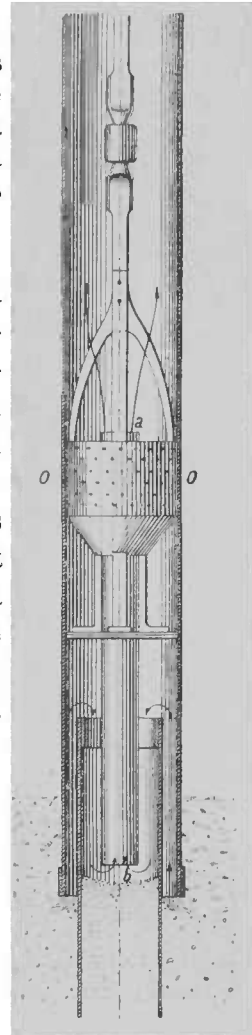


Fig. 116. — Désensableur pour puits artésiens jaillissants (d'après M. Arrault).

3° Dispositions pour recueillir l'eau thermale. — La principale venue thermale à capter se trouve, nécessairement, en général, au bas du sondage, puisqu'on arrête celui-ci quand on la rencontre. Son captage se réalise en perçant la base du tube d'un très grand nombre de trous, qui constituent ce qu'on appelle une *lanterne*.

Il va sans dire que l'on interrompt le revêtement de ciment

¹ C'est une opération qu'on a faite également à Hauterive (voir, plus loin, p. 555).

extérieur, au-dessus de cette lanterne : ce qui se fait, presque toujours, en bourrant, dans l'espace annulaire compris entre les deux tubes de retenue et d'ascension, *une perruque de chanvre* (fig. 117)



Fig. 117.

Perruque
de chanvre.

formant un garnissage étanche, et servant de base à une colonne de béton. Voici alors comment on procède :

Avant d'arriver à l'eau minérale, dont on connaît approximativement la profondeur par les sondages antérieurs, on descend une colonne en tôle rivée, que l'on isole extérieurement des parois du forage par une coulée de béton et l'on ne pousse le forage à diamètre moindre, jusqu'à l'eau minérale, que lorsque le béton a eu le temps de prendre.

On introduit, ensuite, dans le premier tube, la colonne ascensionnelle, lanternée par le bas et portant, à une certaine distance au-dessus de son pied, la perruque en chanvre, aux longs écheveaux debout, sur lesquels on jette, soit de petits graviers, soit de la limaille de fer, ou de la tournure de fonte. En soulevant légèrement ce tuyau, on rebrousse les filaments de la perruque, de manière à former un obturateur solide, sur lequel on coule du béton.

Toute l'eau thermale se trouve ainsi forcée de passer par le tuyau ascensionnel.

Souvent, et en particulier si l'on craint qu'il y ait des vides à la base du trou de sonde, on commence, avant de mettre la perruque, par couler, autour de la lanterne, du gravier, débarrassé de son sable trop fin, qui a l'avantage de combler ces vides, tout en formant un véritable filtre.

Le captage des niveaux adventifs d'eau thermale, que l'on a pu rencontrer dans la hauteur du trou de sonde, se fait également parfois, s'il en vaut la peine, en perçant le tube de trous, constituant une lanterne à la profondeur correspondante ; mais il entraîne, dans l'adaptation du revêtement de ciment, de véritables difficultés : la coulée du ciment doit, en effet, être interrompue un peu au-dessous, puis reprise sur une nouvelle perruque de chanvre, posée au-dessus.

Les sondeurs de pétrole, aux Etats-Unis, ont eu à étudier des problèmes de ce genre ; mais comme là, en général, on n'a besoin de faire durer le tubage qu'un temps restreint, correspondant à l'épuisement probable du puits, on les a souvent résolus, en adoptant un tube unique, à la fois de retenue et d'ascension.

Dans le sondage artésien du château d'Eu, on a capté séparément deux nappes d'eau douce, rencontrées à des niveaux différents : l'une dans un tube central, l'autre dans un espace annulaire autour du premier. Cette disposition avait là pour but de ne pas laisser des eaux de vitesse différente se contrarier; elle pourrait également servir pour des nappes thermales distinctes.

Il arrive, quelquefois, qu'on se heurte à de grandes difficultés pour capter une nappe d'eau, contenue dans des sables fluesscents, qui coulent avec l'eau, quand on pompe. On peut, dans ce cas, utiliser les *cuvclages filtrants*, employés, en 1888, à Rambouillet, par M. Lippmann.

Il s'agit d'un tube polygonal, dont la face extérieure est totalement faite de sortes d'alvéoles rectangulaires, dont le fond est percé de trous et dans lesquelles se logent des plaques poreuses et filtrantes¹. Ce cuvelage est fermé par un fond hermétique. Pour l'utiliser, on exécute un puits foré, que l'on garnit, d'abord, d'un tube en tôle pleine, dans lequel on descend le cuvelage filtrant. Après quoi, on extrait le tube en tôle et on laisse les sables aquifères arriver au contact des plaques filtrantes, à travers lesquelles ne peut passer qu'une eau claire et limpide.

4° Précautions pour les gaz. — Si l'on veut obtenir un écoulement normal des eaux gazeuses, il faut avoir un tube de diamètre régulier, allant plutôt en décroissant vers le bas et éviter, autant que possible, les cloches renversées, où l'acide carbonique irait s'accumuler.

Il est, d'autre part, nécessaire que le tube d'émission soit restreint, pour empêcher les bouillonnements violents d'une grande masse d'eau : ce qui conduit souvent à faire passer les eaux gazeuses, dans la partie supérieure de leur trajet, par un tube plus étroit, dit *tube siphonide* (dont nous trouverons de bons spécimens à Saint-Yorre)², parfois aussi à soumettre la colonne gazeuse à une certaine pression, au risque d'en diminuer le débit.

Dans ce cas, les conduites, allant de la source à la buvette, devront être étudiées spécialement, comme nous le verrons au Caucase et à Châtelguyon; on cherchera, en particulier, à ce que les eaux gazeuses arrivent, dans la buvette, de bas en haut et non

¹ Voir MAX DE NANSOUTY. *Cuvelage filtrant les eaux troubles ou impures* (Génie civil, t. XII, p. 391).

² Voir plus loin, p. 552, Captage de la source Saint-Charles.

de haut en bas, pour éviter les remous, qui altèrent toujours la composition du mélange d'eau et d'acide carbonique, constituant l'émulsion gazeuse.

Tous ces points vont, d'ailleurs, se trouver éclaircis par un certain nombre d'exemples.

§ 4. — *Exemples de sondages à Vichy, Saint-Yorre, Bourbonne, Geleznovodsk, Essentouky, Mondorf, Montrond, etc.*

SONDAGES A VICHY (HAUTERIVE, SAINT-YORRE, CUSSET, VESSE, etc.). — Nous avons vu ¹ qu'il existait, à Vichy, Saint-Yorre et Cusset, un certain nombre de nappes hydrothermales artésiennes, situées à peu près à tous les niveaux sableux, que présentent les arkoses tongriennes et présentant, comme la stratification même de ces arkoses, une certaine irrégularité; mais que, néanmoins, aujourd'hui, à la suite de très nombreux sondages, on est arrivé à reconnaître approximativement, surtout à Saint-Yorre et que l'on est à peu près sûr de rencontrer, à une dizaine de mètres près, avec un aléa relatif seulement à l'intensité du débit, à la régularité, à l'abondance de l'acide carbonique, etc.

Ces variations, qui peuvent avoir une certaine importance commerciale, sont facilement explicables par la nature, plus ou moins sableuse, ou, au contraire, plus ou moins argileuse de la nappe hydrothermale, au point rencontré; elles n'empêchent pas que les sondages puissent s'établir, dans des conditions très simples et prévues d'avance, sur un type à peu près uniforme, que nous allons décrire comme exemple de sondages à faible profondeur (25 à 50 m.). Nous citerons ensuite les dispositions prises pour le sondage, beaucoup plus profond, d'Hauterive.

Comme remarque générale, on peut noter que, conformément à une théorie développée précédemment ², la multiplicité de ces sondages juxtaposés nuit aux anciennes sources, en diminuant la pression qui les fait jaillir et qu'il en résulte un ralentissement notable dans leur débit ³.

¹ Pages 261 à 268.

² Page 185.

³ Le même fait a été constaté à Vals. Voir, plus haut, p. 273.

Sondages de Saint-Yorre¹. — Dans un espace restreint (fig. 118 et 119), l'eau minérale a été trouvée aux profondeurs suivantes :

Source Saint-Charles, n° 1.	28,71 m.
— Saint-Charles, n° 2.	45,30 —
— Saint-Louis, n° 1.	33,55 —
— Saint-Louis, n° 3.	34,08 —
Guerrier	23 —
Léon n° 4	44 —

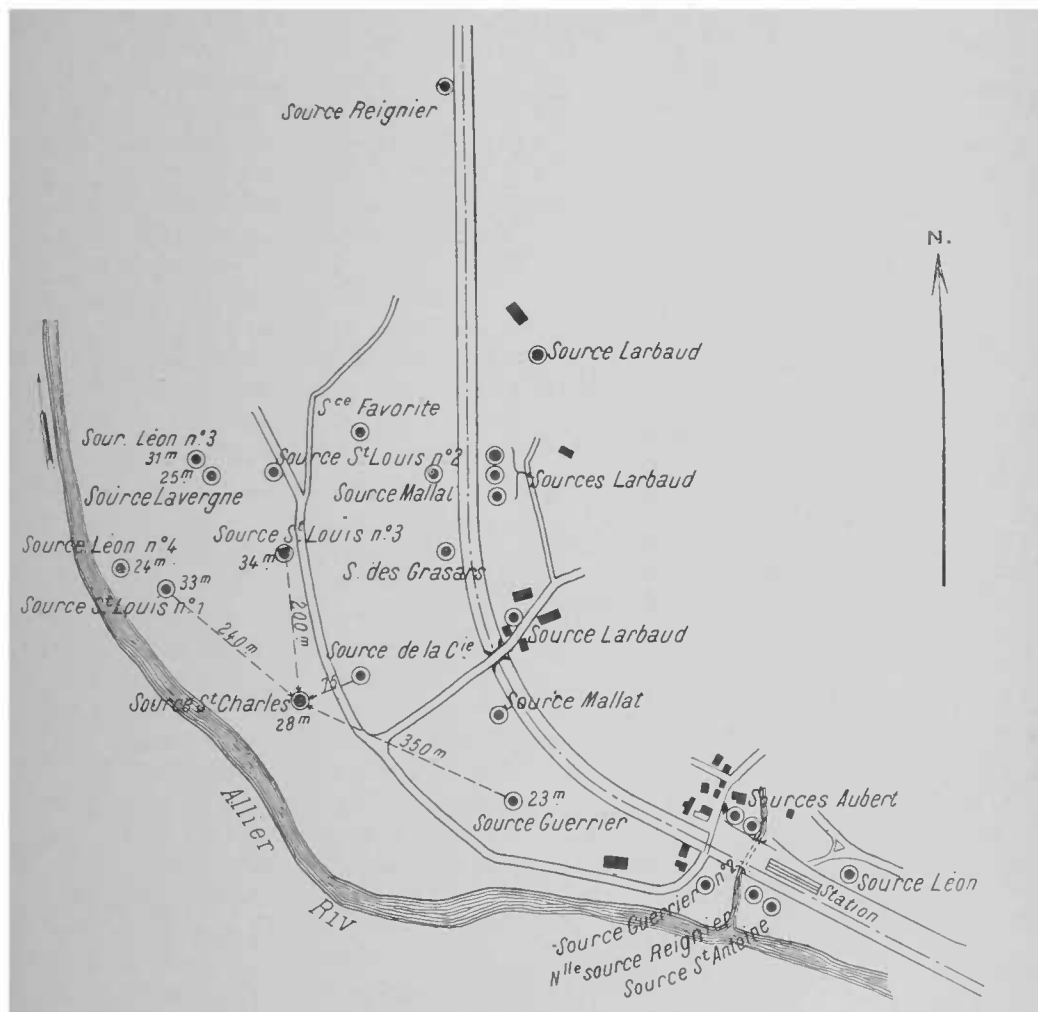


Fig. 118. — Carte des sources de la région de Saint-Yorre en 1889.

Prenons, par exemple, comme type, le forage de la source Saint-Charles n° 2 (fig. 119).

Ce forage, qui date de 1889, a été commencé au diamètre de 210 mm. et

Voir plus haut, p. 108, 110, 268.

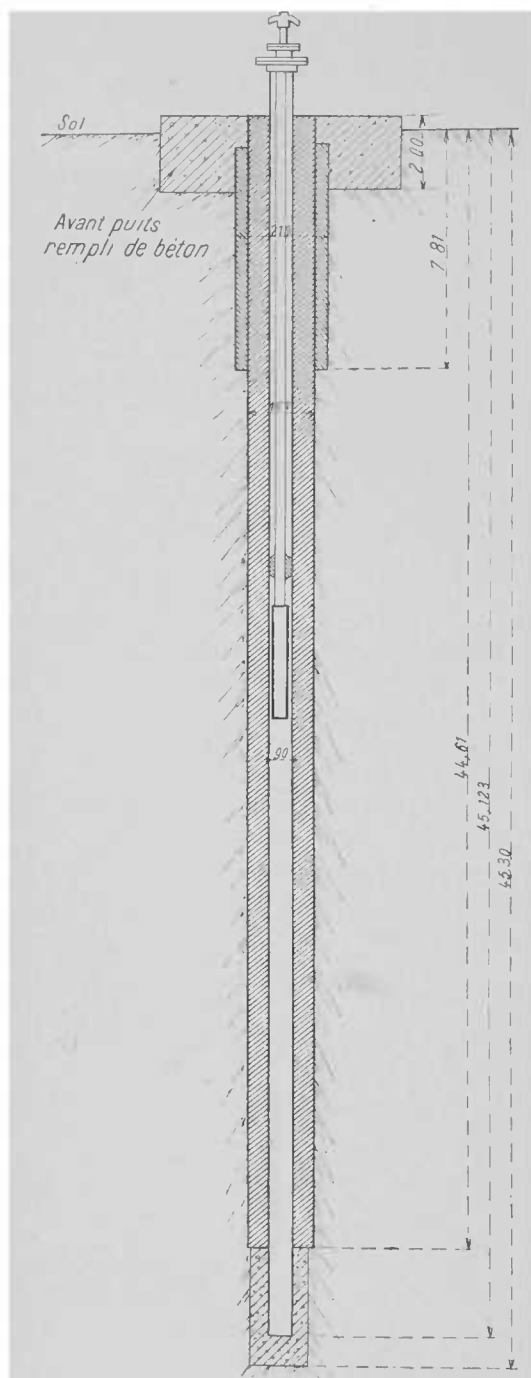


Fig. 449. — Système de captage usité à Saint-Yorre (source Saint-Charles).

plus petit. Les sections libres et les

garni, pour la traversée des terrains perméables de la surface, d'une première colonne de tuyaux en fer, ayant 210 mm. de diamètre intérieur et 3 mm. d'épaisseur. Le pied de cette colonne a été arrêté à la profondeur de 7, 81 m.; sa tête était à 0,68 m. sous le sol. Le forage a été poursuivi, ensuite, à travers des alternances de marnes, sables argileux et plaquettes calcaires, jusqu'à une profondeur de 45 m., où l'eau thermique a été rencontrée au milieu de gros sable. La source a jailli alors avec une force ascensionnelle considérable, amenant, dans le forage, des refoulements de 12 à 15 m. de hauteur de sable; on a dû, pour la canaliser, enfoncer une première colonne de tuyaux de 165 mm. de diamètre intérieur, assemblés par manchons rivés, que l'on a arrêtée au-dessus de la nappe thermique; puis une deuxième, en fer creux, à manchons à vis, de 90 mm. de diamètre intérieur, 100 mm. de diamètre extérieur, descendant jusque dans les gros sables aquifères.

L'eau montant, dès lors, exclusivement par cette colonne centrale de 90 mm., on a pu bétonner, d'abord, à l'extérieur du tubage vissé de 165 mm.; puis, après avoir préalablement coulé une certaine quantité de graviers lavés, entre les tubages de 165 mm. et de 90 mm.

La colonne de tuyaux de 90 mm. de diamètre, formant colonne ascensionnelle, dépasse le sol de 745 mm. On l'a surmontée d'un couvercle presse-étoupe, formant joint autour d'un tube plongeant, dit *siphonide*, servant à régulariser l'écoulement de l'eau minérale, en offrant au mélange d'eau et de gaz une section très inférieure à celle de la colonne d'ascension.

On a terminé ce tube lui-même par un *régulateur*, c'est-à-dire par un obturateur en bronze, percé d'un trou encore

sont combinées empiriquement, de manière à rendre continue et régulière une sortie d'eau émulsionnée, qui, sans cette précaution, pourrait souvent être intermittente.

Enfin, on a complété le captage en bétonnant à la surface, sur 2 m. de profondeur et 2 m². de surface, afin d'empêcher les infiltrations, d'autant plus à craindre ici que les crues de l'Allier recouvrent l'emplacement des sources.

A la source Amélie d'Hauterive, on a, en 1890, employé un tubage à peu près identique, pour une nappe jaillissante, trouvée à 58, 65 m. et qui peut être la même que celle des sources d'Hauterive (27 m.), Thiolier Gal (58 m.), Ramin (62 m.), Gannat (102 m.) (fig. 120).

Le premier tube en fer, de 10 m. de haut, a 248 mm. de diamètre intérieur; un second, de 161 mm. de diamètre, et un troisième, de 90 mm. de diamètre, descendent tous deux jusqu'à la nappe aquifère, où l'on a garni l'intervalle entre eux d'une perruque de chanvre, pour forcer l'eau thermique à monter uniquement par le centre; on a coulé du ciment dans les deux espaces annulaires, compris entre les tubes de 90 et 161, 161 et 248 mm.

Enfin, pour assurer la régularité du débit de cette eau très gazeuse, on a, par une pratique qui est courante à Vichy, introduit, à l'intérieur du tube ascensionnel de 90 mm., un tube siphonide de 27 mm., continué par un bout de tube de 34 mm., jusqu'à la profondeur de 29, 50 m.

A la profondeur de 20 m., à l'endroit où la colonne siphonide change de diamètre, on a mis une perruque de chanvre entre le tube siphonide et le tube ascensionnel, forçant ainsi toute l'eau à passer par l'orifice plus restreint que lui réserve le premier.

A l'ancienne source d'Hauterive, un sondage de 1842, repris en 1876 et poussé alors jusqu'à 97 m., sans rencontrer de nappe minérale plus bas que 27 m., a

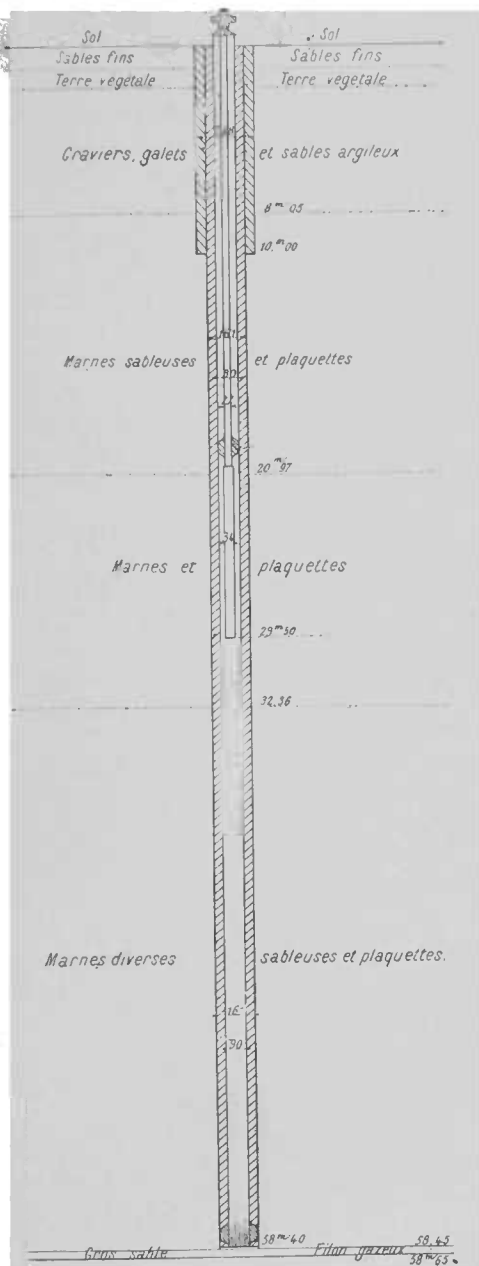


Fig. 120. — Mode de captage adopté à Hauterive (source Amélie).

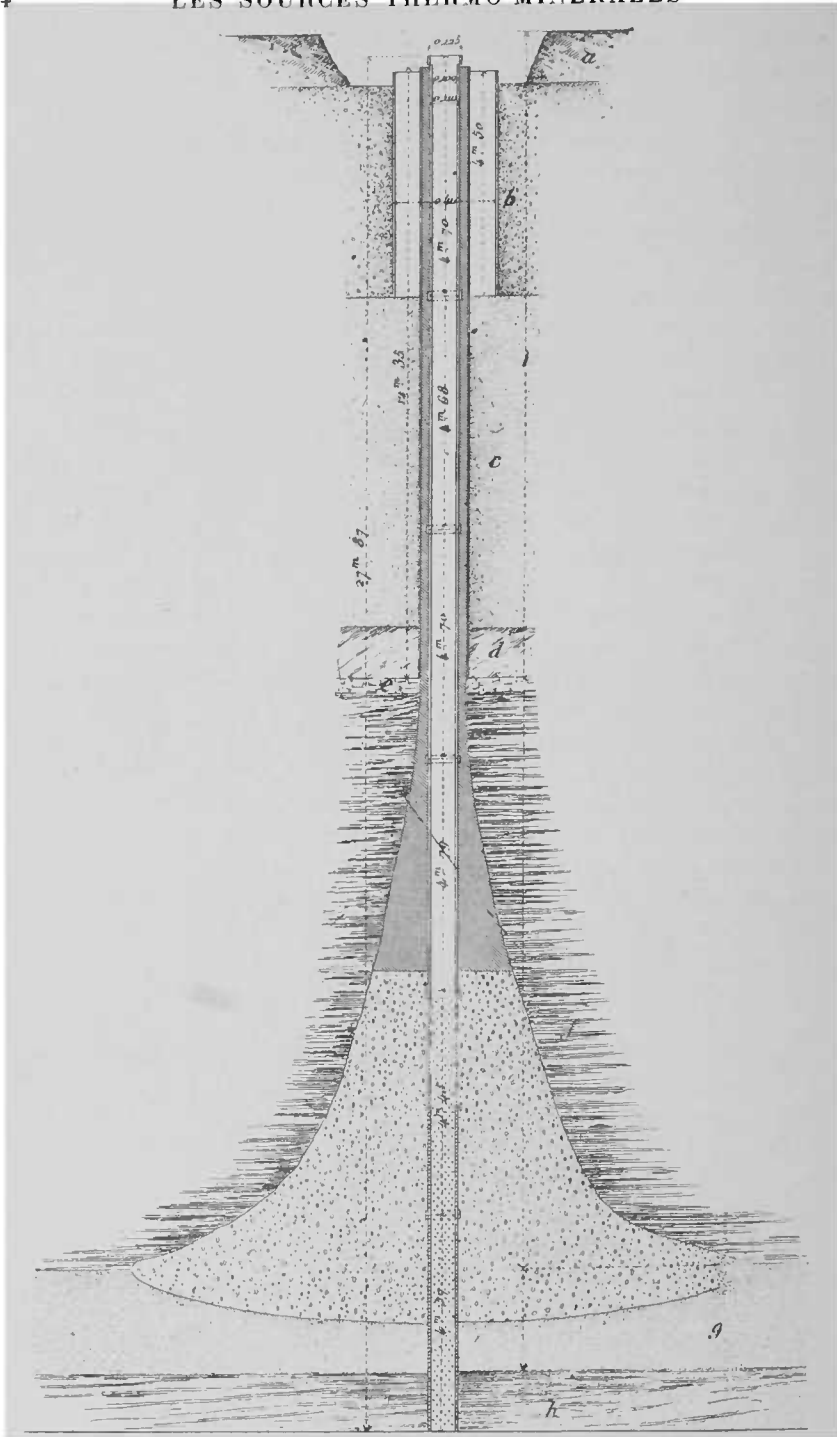


Fig. 121. — Coupe de la source d'Hauterive (près Vichy) après réfection du tubage en 1876 (d'après M. Voisin).

Echelle de 0,06 pour 10 m.

a, terre végétale. — b, gravier. — c, sable fin. — d, argile. — e, banc solide. — f, marne grise feuilletée. — g, sable argileux (nappe d'eau minérale). — h, argile rouge sableuse

donné lieu, à diverses reprises, a des observations intéressantes¹ (fig. 121).

Tout d'abord, dès 1842, on avait reconnu que le jaillissement trop fort de la source amenait un entraînement d'agile, de telle sorte qu'on chercha à le modérer, d'abord, en forçant l'eau à suivre, au sortir du tuyau ascensionnel, une conduite sinueuse de 15 m. de long jusqu'à l'atelier d'embouteillage; puis, en 1854, en plaçant, sur l'orifice du tuyau ascensionnel, une boîte de captage, munie d'un robinet régulateur². Ces mesures, qui avaient pour effet de comprimer la source, eurent, d'ailleurs, comme conséquence nécessaire d'en réduire le débit.

En 1876, le tubage en tôle, placé en 1842, était complètement rongé, sauf dans la partie supérieure, où il avait été enveloppé de cuivre et il s'était formé, à la base du sondage, par suite d'éboulements des marnes, une chambre considérable, qui nécessita des précautions spéciales.

Voici donc comment on a opéré, d'après M. Voisin :

Un premier tube de retenue de 0,25 m. a été arrêté à 27,87 m. de profondeur.

Le tuyau ascensionnel, qui a 0,10 m. de diamètre et dont l'orifice est à 0,50 m. en contrebas du sol, offre une longueur de 27,87 m. (en 4 tronçons, assemblés par des manchons à vis) : il descend donc jusqu'à la profondeur de 28,37 m. Dans sa partie inférieure, depuis la profondeur de 19,50 m. jusqu'à celle de 26,10 m., il est percé de trous de 0,006 m., de diamètre, au nombre de 1.100, qui représentent ensemble une section de 3^d 4,08, presque quadruple de celle du tuyau lui-même.

Pour couler du ciment autour de ce tube, on ne pouvait songer à l'entourer, comme on le fait d'habitude, d'une perruque de chanvre autour de la partie lanternée; car il fallait auparavant combler la chambre d'éboulement, dont on devait soupçonner la présence; on coula donc, entre le tube de retenue et le tube ascensionnel, plus de 9 m³. de gravier, débarrassé par criblage du sable fin et des galets trop gros; puis, au-dessus de ce gravier, destiné à servir de filtre, en même temps qu'à remplir les vides et arrêté à une profondeur de 19 m., on coula du ciment³.

Enfin, l'on raccorda le tuyau avec la conduite menant à l'embouteillage.

Sondages de Bourbonne. — Les travaux de captage de Bourbonne, portant sur des eaux minérales dont nous avons déjà indiqué l'allure⁴, se composent surtout de sept sondages, énumérés dans un tableau ci-joint (p. 556).

Comme l'indique ce tableau même, on a employé autrefois, pour des sondages allant jusqu'à 151 m., un tubage en bois de chêne, qui a l'avantage d'être beaucoup plus économique qu'un tubage de cuivre et peut-être plus résistant à l'eau qu'un tubage de tôle⁵.

VOISIN. *Loc. cit.*, p. 81.

¹ En général, comme les sources thermales amènent des dépôts, on ménage toujours, à côté du griffon, une cuvette de dépôt, où la plus grande partie de ces dépôts retombe.

² Comparez le sondage de Sauerbrunn, p. 345.

³ Pages 59, 102, 147, 153, 180, 193, 277; bibl., p. 277.

⁴ Voir p. 451 à 454. Cependant le bois réduit les sulfates et donne de l'acide sulfhydrique, qui attaque le bois, ou même le cuivre et le plomb, s'il s'en trouve au voisinage.

TABLEAU DES SONDAGES DE BOURBONNE

NUMÉROS	DATE du sondage.	EMPLACEMENT	PROFONDEUR	COTE	NATURE du tubage.	DIAMÈTRE intérieur.
			du fond du forage.	du fond du forage.		
			Mètres	Mètres.		
1	1859	Jardin des Thermes civils.	43,98	212,51	Bois.	0,40
8	1859	Cour de l'Hôpital militaire	41,97	213,94	—	0,40
9	1863	Rue de l'Hôpital	35,85	219,37	—	0,40
10	1862	Cour intérieure des Thermes .	45,60	210,31	Cuivre.	0,49
11	1864	Place des Bains (Source Megran) .	46,40	209,42	Bois.	0,40
12	1865	— (Fontaine-Chaude)	51	204,91	—	0,15
13	1875	Etablissement de 1 ^{re} classe. Puisard romain	45,45	210,44	Cuivre.	0,49

On a, en conséquence, préparé des tuyaux de 3 mètres de long, 0,20 m. de diamètre extérieur, 0,40 m. à l'intérieur, dont les extrémités ont été tournées, pour être assemblées à mi-bois, en forme de tabatière, sur une longueur de 0,06 m.

Dans chaque joint, entre les pièces consécutives, on a placé une rondelle annulaire de feutre, enduite de suif. Les joints ont été, en outre, recouverts par des viroles, faites avec des plaques de cuivre rouge de 0,004 m. d'épaisseur, 0,220 m. de longueur, dépassant ainsi de 0,080 m. chacune des extrémités de l'assemblage. Ces viroles ne sont pas brasées, attendu que l'eau minérale détruit le laiton; elles sont consolidées avec des rivets de même métal et fixées aux tuyaux en bois par seize clous cylindriques, également en cuivre rouge, de 0,008 m. de diamètre et 0,040 m. de longueur. Chaque virole, avec ses rivets et ses clous, a exigé 6,500 kg. de cuivre.

Puis, un premier tube en bois, dit *lanterne*, garni, à sa base, d'une frette en fer avec tranchant obtus, et percé de trous pour l'introduction de l'eau minérale¹, a été descendu dans le trou de sonde. On a assemblé, au-dessus, à l'extérieur, le second tube, également percé de trous, en se servant, pour le faire entrer à refus dans le premier, puis pour le forcer à descendre, du poids des tiges de sonde et l'on a continué ainsi de suite jusqu'à la fin.

Enfin, on a coulé du ciment romain entre le terrain et la colonne de bois définitive. Ce tubage, non compris ses frais de mise en place, est revenu à 540 francs (en 1862), tandis qu'une colonne de cuivre rouge pèserait environ 1 200 kilogrammes et coûterait au moins 3 000 francs; mais on a constaté que le bois s'altérerait rapidement.

Des tubages en cuivre ont été également adoptés, en 1862, à Bourbonne, notamment pour le sondage n° 10 de 44,60 m. de profondeur.

Les tubes étaient en cuivre rouge étiré, sans soudure, de 5 mètres de long, 0,19 m. de diamètre intérieur et 0,005 m. d'épaisseur. On les réunit bout à

L'ouverture inférieure de la colonne, étant plane et reposant sur la roche, ne pouvait rien fournir.

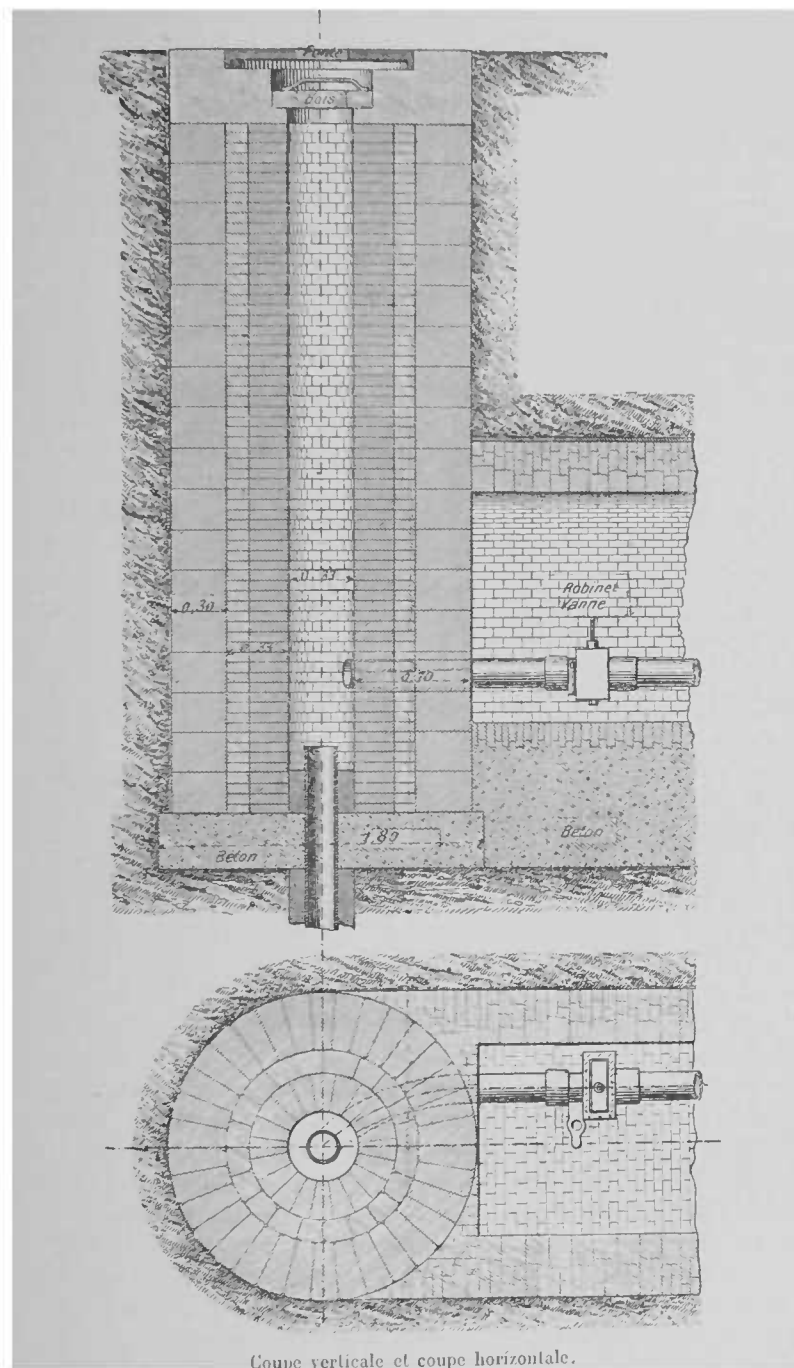


Fig. 122 et 123. — Tête de sondage et robinet vanne à Bourbonne (d'après M. Rigaud).

Echelle de $\frac{1}{44}$.

bout au moyen de manchons de même épaisseur, de 0,20 m. de diamètre intérieur et fixés chacun par 32 vis de même métal. Les cinq mètres inférieurs ont été percés chacun de 162 trous circulaires de 0,02 m. du diamètre, disposés en quinconce et présentant une somme d'ouvertures à peu près double de la section intérieure du tube. Les 23,26 m. suivants renferment ensemble 2240 trous semblables. Les 13,74 m. supérieurs sont entièrement pleins et portent, à leur partie inférieure, un cornet en tronc de cône élastique, formé de six feuilles de cuivre de 0,001 m. d'épaisseur, dont la grande base, de 0,30 m. de diamètre, est tournée vers le haut, de manière à arrêter les terres, qui auraient pu tomber et surtout le ciment romain, avec lequel on a opéré le scellement, pour empêcher l'eau thermale de s'élever à l'extérieur de cette partie supérieure¹

Aux mêmes sources de Bourbonne, M. Rigaud² a employé, en 1875, à la

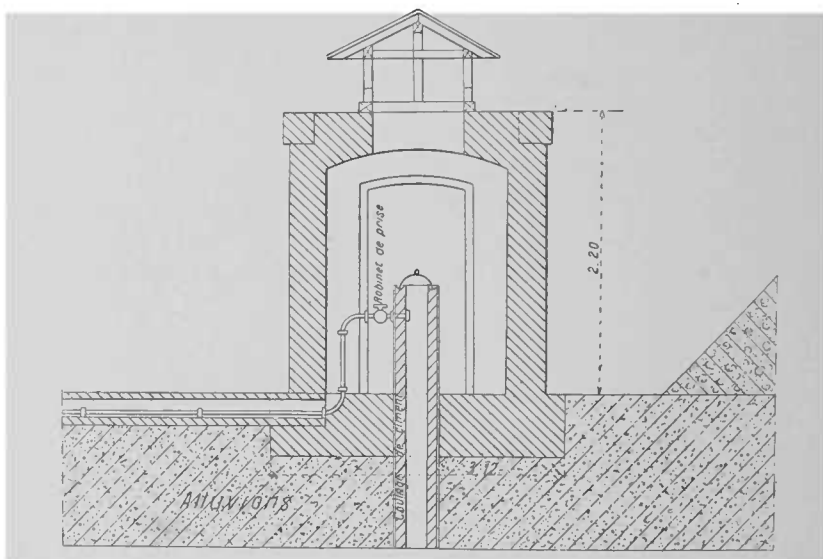


Fig. 124. — Geleznovodsk. Sous-groupe de l'Est. Source Ivanovsky. Coupe du captage, suivant l'axe de la conduite (d'après M. Dru).

tête des sondages, une disposition que nous allons décrire. Comme le montrent les figures 122 et 123, le tube du sondage s'engage, à sa partie haute, dans un puits en maçonnerie de briques, ayant 0,33 m. de diamètre intérieur et 0,33 m. d'épaisseur, entouré d'un second puits en maçonnerie de moellons de 0,30 m. d'épaisseur. Cet ouvrage repose sur une couche de béton de 0,30 d'épaisseur et 1,80 m. de diamètre, que le tube traverse et dépasse d'environ 0.40 m. L'ouverture libre du tube est recouverte d'une forte grenouillère en cuivre. Le haut du puits est fermé par deux tampons, le premier en bois, le second en fonte, de façon à préserver le tubage contre l'introduction de tout corps étranger tombé d'en haut et à permettre néanmoins de le curer, comme nous allons le voir, lorsqu'il s'ensable.

DROUOT. *Loc. cit.*, p. 67.

Loc. cit., p. 422.

Enfin, de ce puits part un tuyau de cuivre, muni d'un robinet-vanne et placé assez bas pour avoir son embouchure constamment noyée, de manière à éviter l'introduction d'air humide, qui viendrait le corroder à l'intérieur.

Les curages sont nécessaires pour faire disparaître les quantités considérables de sable siliceux que l'eau amène dans le tubage et qui, peu à peu, s'accumulant au bas, arriveraient à interrompre toute circulation, toute introduction de l'eau thermale.

Ces curages sont, les uns annuels et sommaires, les autres plus complets et plus espacés. Un curage sommaire peut se faire en agitant simplement les dépôts du fond au moyen d'un poids assez lourd, suspendu à une forte cordelette. Le mouvement de piston, qui en résulte, détermine de brusques soubresauts de l'eau thermale et, par suite, l'entraînement des sables tenus dans le courant ascendant : pour empêcher leur introduction dans la tuyauterie, on se sert alors du robinet vanne (fig. 122).

Les curages plus complets sont faits à la sonde, pour ramener directement à la surface la partie la plus grossière des dépôts.

Sondages de Geleznovodsk et Essentouky (Caucase) ¹. — Les sondages de Geleznovodsk reproduisent, dans leur ensemble, les dispositions de ceux de Saint-Yorre, décrits plus haut. Les figures ci-jointes 124 à 126, dues à M. Dru, ont pour but d'en mettre en lumière certains détails.

Les figures 124 et 125 montrent la prise d'eau au haut d'un sondage, avec la conduite allant d'une autre source (source Marie) à la buvette. Dans le premier cas (fig. 124), la buvette est tout près de la source et un peu plus bas : on s'est contenté d'un simple branchement. Dans le second cas (fig. 125), la com-

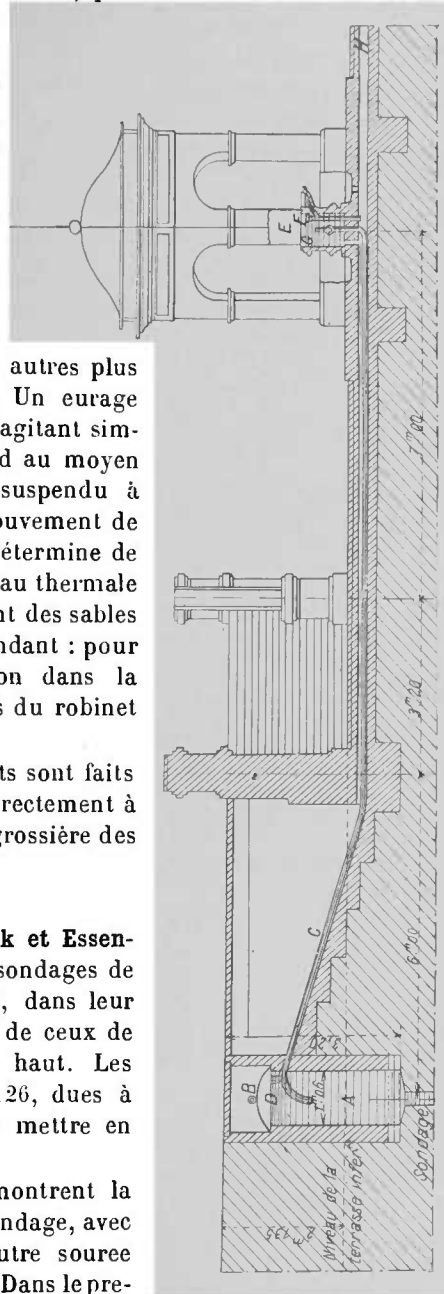


Fig. 125. — Geleznovodsk. Sous-groupe de la source Marie (d'après M. Dru).

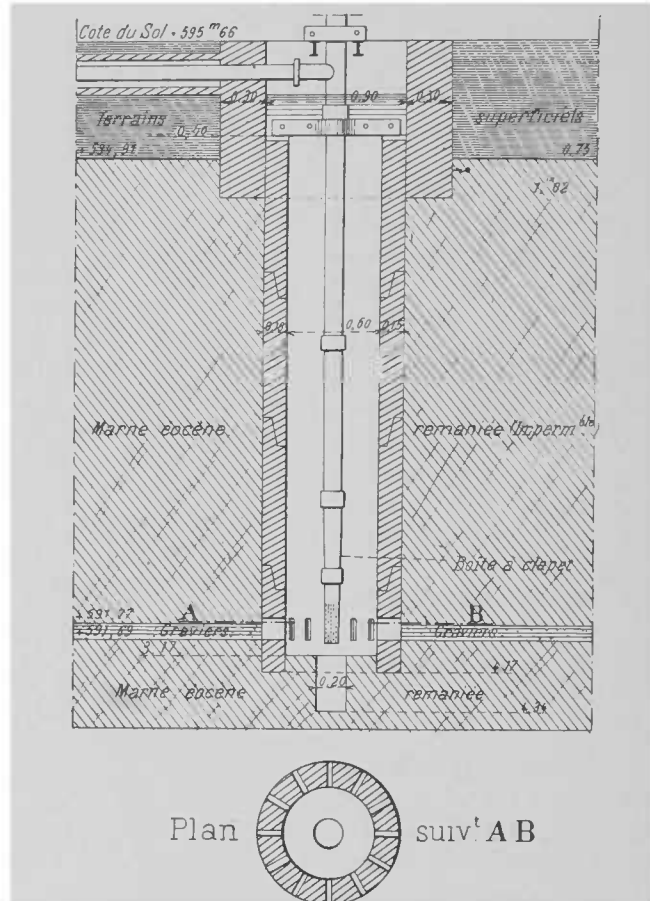
Coupe longitudinale.

A, réfection du captage. — B, fermeture hermétique. — C, conduite à la buvette. — D, trop-plein. — E, buvette. — F, trop-plein de la buvette. — G, bonde de vidange. — H, caniveau de décharge.

¹ Voir plus haut, p. 52, 141, 377, 478, 483, 504.

munication du captage avec la buvette a été établie par un siphon. Pour les deux sources, on a eu soin de réserver à l'eau un certain écoulement, afin de maintenir l'activité nécessaire dans les canaux souterrains.

A Essentouky (fig. 126), on a commencé par étudier le sondage, au fur et à mesure de son avancement, en isolant, d'abord, au moyen d'un tubage dans les alluvions, la nappe d'infiltration ; puis on continua le forage, pour préparer une deuxième vérification, dans les couches sous-jacentes, où l'on rencontra des marnes, ayant une légère odeur d'hydrogène sulfuré, qui s'accrut



Coupe verticale et plan.

Fig. 126. — Essentouky. Eaux minérales sulfureuses froides. Projet de captage (d'après M. Dru).

jusqu'à la découverte d'une nappe d'eau, située dans un lit d'alluvions caillouteuses : nappe dont on put apercevoir la circulation au moyen d'un miroir placé à l'orifice d'un sondage et que l'on analysa. Cette seconde venue d'eau fut isolée par un tube parfaitement étanche et l'on descendit jusqu'à une seconde nappe minérale, que l'on obtint ainsi parfaitement distincte des deux premiers niveaux d'eau et que l'on put, par suite, analyser exactement.

La figure 126 montre la façon dont on a capté la première nappe sulfureuse (que l'on a seule conservée, comme la plus importante) en faisant un sondage à grande section, qu'on a d'abord tubé en fer jusqu'aux marnes, puis dans lequel on a descendu, jusqu'à la nappe aquifère, un second tubage, fait d'anneaux en ciment ou en béton très fin. L'opération terminée, on a relevé le tube extérieur, pour couler du ciment dans le vide qu'il a laissé.

Exemples de sondages ayant rencontré, par hasard, des sources thermales (Mondorf, Montrond, Kissingen). — Parmi les sources thermales obtenues par sondages, on doit peut-être faire une catégorie à part de celles qui ont été rencontrées, par hasard, souvent à grande profondeur, dans des trous de sonde, ayant eu un tout autre but (comme il arrive de trouver une source thermale dans la profondeur d'une exploitation de mines.)

Tel est, par exemple, le cas de la source de *Mondorf* (Luxembourg)¹. Un sondage avait été exécuté, de 1841 à 1846, par M. Kind pour rechercher la suite des gîtes de sel de la Moselle. On descendit jusqu'à 730 m. sans succès; mais on avait trouvé, à 502 m., une source thermale chlorurée à 25°, donnant 606 litres par minute, que l'on a utilisée.

De même, en 1882-1883, à *Montrond*, canton de Saint-Galmier (Loire)², un sondage, qui recherchait la houille, a traversé, au-dessous des sables tertiaires supérieurs du Forez, 40 à 50 mètres de marnes blanches ou vertes de l'étage miocène inférieur, puis est resté, jusqu'à 502 mètres, dans des argiles verdâtres, alternant avec des bancs arénacés, qui sont d'âge permien ou antérieur. On a trouvé, dans ce sondage, trois nappes d'eau jaillissantes : l'une douce à 23 m., les autres thermales à 180 m. et 502 m. Le captage a été réalisé au moyen des six tubes suivants : 1° de 0,410 m. de diamètre, prenant pied à 28 m.; 2° de 0,360 m. à 100 m.; 3° de 0,310 m. à 223 m.; 4° de 0,260 m. à 419 m.; 5° de 0,210 m. à 473 m.; 6° de 0,123 m. à 502 m. et l'on a eu finalement une source intermittente, jaillissant par ce dernier tube central.

De même encore, à *Kissingen*, en Bavière, un sondage de 584 m., destiné à rechercher du sel, a donné, à 490 m., une très abondante source salée, chargée d'acide carbonique³.

Voir plus haut, p. 102, 136, 236.

DAUBRÉE. *Eaux souterr.*, I, 368 à 374, avec plusieurs figures. — LAUR (C. R.), t. XCVI, p. 426, 1883, etc. — Voir, plus haut, p. 37, 108, 168, 197, 272.

Voir plus haut, p. 37, 95, 102, 210.

CHAPITRE IV

PARTIES ACCESSOIRES DU CAPTAGE. — CAPTAGE DES GAZ. PROTECTION CONTRE LES INFILTRATIONS FROIDES.

Nous nous proposons, dans ce chapitre, de revenir sur deux points, que nous avons déjà eu l'occasion de traiter incidemment, mais qui méritent, par leur importance, une étude plus attentive : 1° le captage des gaz dans les sondages ; 2° la protection contre les infiltrations froides.

1° Captage des gaz. — Le captage d'une eau minérale ne serait pas complet, si l'on ne recueillait pas, en même temps que l'eau, les gaz qu'elle renferme et cela, autant que possible, sans en altérer ni la proportion, ni la nature. Ces gaz (acides carbonique, sulfhydrique, etc.) jouent, en effet, dans l'action physiologique des eaux, soit sous forme de boisson, soit sous forme de bains, un rôle important, qui serait même, d'après certains physiologistes, tout à fait prépondérant dans le second cas, puisqu'on admet aujourd'hui que les principes chimiques en dissolution dans un bain ne traversent pas la peau, si elle n'offre pas de lésion, tandis que les gaz la pénètrent.

Le problème du captage des gaz se pose tout différemment, suivant qu'il s'agit de recueillir l'eau gazeuse, telle qu'elle sort de la source, pour l'embouteiller ou la boire sur place, ou suivant que l'on veut, au contraire, utiliser séparément l'acide carbonique sous forme de douches, bains, inhalation et déglutition, etc..

Ces emplois spéciaux de l'acide carbonique sont particulièrement usités en Allemagne¹. Il est évident qu'ils nécessitent, avant tout,

¹ Voir, notamment : 1897 RUDINGER. *Ueber Kohlensäurebäder* (Club. Méd. de Vienne, 19 mai 1897). Dans cet article, l'auteur fait connaître un appareil, qu'il a construit pour la préparation des bains d'acide carbonique. Son appareil travaille automatiquement et fait absorber à l'eau rapidement 120 volumes de CO₂. Le bassin d'eau

l'installation de tubes et de cloches à gaz, où l'on fait rendre le gaz, dégagé spontanément par l'eau ; nous en citerons un cas relatif à Kislovodsk. La première hypothèse exige des dispositifs plus compliqués, dont nous allons donner des exemples en décrivant ce qui a été fait à Budapest, Châtelguyon, etc.. Mais, d'une façon générale, on peut dire qu'il faut éviter de soumettre les sources gazeuses, à aucun moment, avant leur embouteillage, à des secousses, qui pourraient avoir pour résultat de séparer les deux éléments.

Dans le cas où l'eau est pompée, il est nécessaire d'avoir des

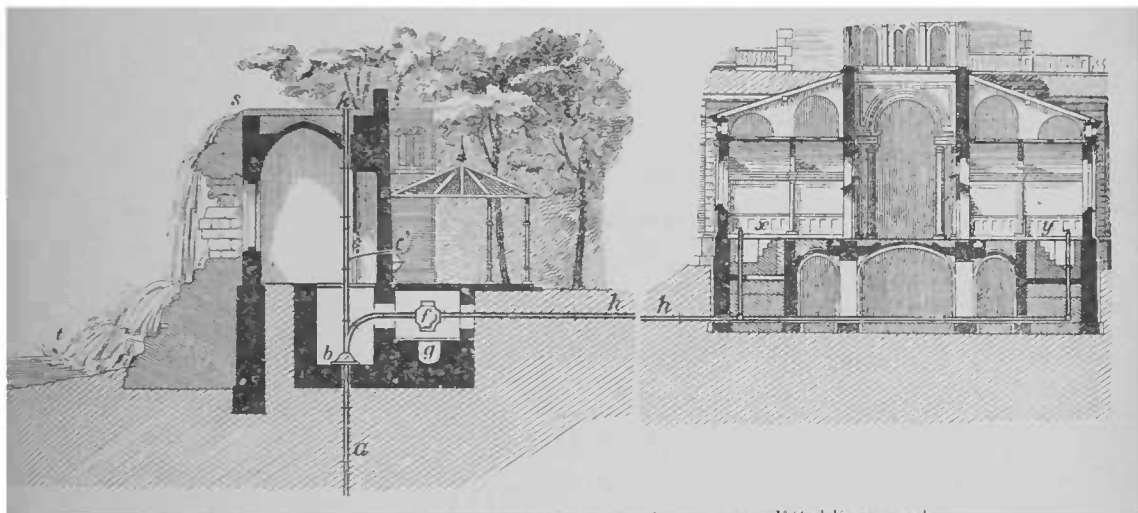


Fig. 127. — Communication de la source artésienne avec l'établissement dans l'île Marguerite (la partie intermédiaire de la conduite *hh* a été supprimée).

Echelle au $\frac{1}{360}$.

ab, partie supérieure du tube de sondage en bois. — *bc*, tuyau de fonte. — *bh*, tuyau conduisant aux bains *x* et *y*. — *st*, déversoir de l'eau thermale dans le Danube. — *cd*, tuyau conduisant à une buvette. — *f*, bassin de dépôt pour les matières en suspension.

pompes élévatoires plongeant dans l'intérieur des captages et fonctionnant à une faible vitesse : par exemple, une pompe, dite à piston plongeur, avec colonne élévatoire.

L'embouteillage de ces eaux gazeuses nécessite également des précautions spéciales.

A Budapest, il existe, au milieu du Danube, entre les deux villes de Pest et d'Ofen, une île charmante, l'île Marguerite, que, vers 1866, l'archiduc Joseph eut l'idée de convertir en un superbe jardin public. On fit, à cette époque, dans

est en communication avec deux bouteilles remplies de CO_2 . Une partie d'eau, qui a été déjà en contact avec l'acide carbonique, est ramenée de nouveau vers le courant de gaz.

file, un sondage dont nous avons parlé plus haut¹, qui produit une belle source jaillissante à 35°, aujourd'hui utilisée dans un établissement thermal. Pour conduire l'eau du sondage à l'établissement, l'ingénieur, M. Zsigmondy²

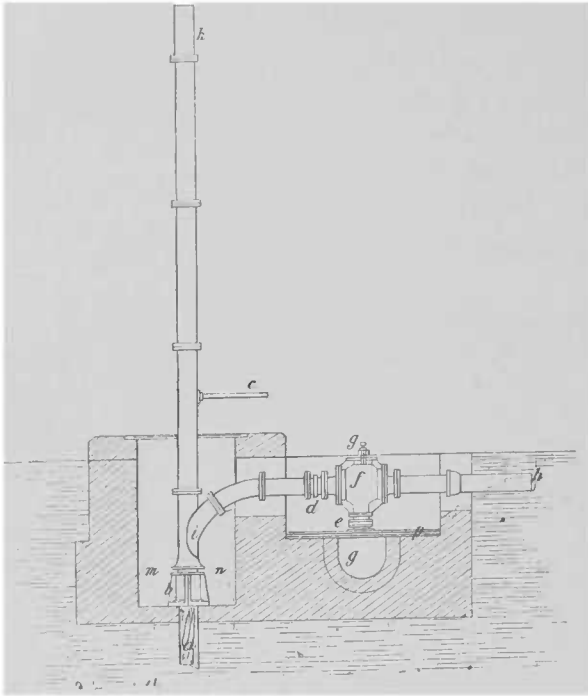


Fig. 123.

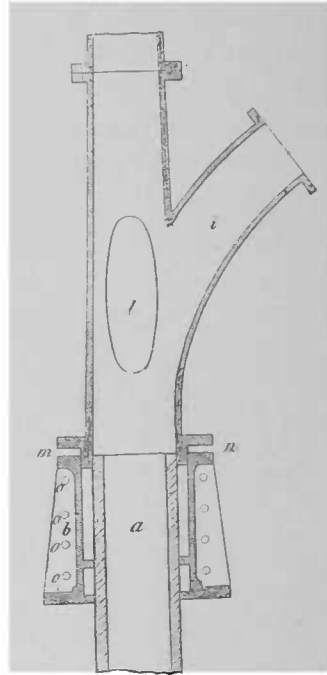


Fig. 130.

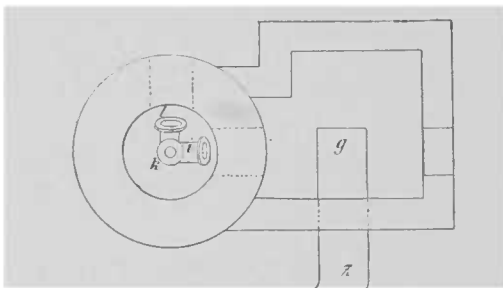


Fig. 129. — Coupe horizontale.

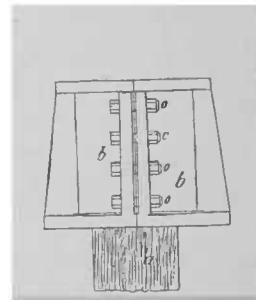


Fig. 131.

Fig. 128, 129, 130, 131. — Détail de l'emmanchement du tuyau d'alimentation des bains *h* sur le tube de sondage *a* (à Harkany). Les figures 130 et 131 représentent, à plus grande échelle, deux parties de la figure 128 (mêmes lettres).

adopta les dispositions représentées dans une coupe d'ensemble (fig. 127) et diverses coupes de détail (fig. 128 à 131).

La coupe d'ensemble (fig. 127) montre, au-dessus du tube de sondage en bois

Page 350.

1873, WILHELM ZSIGMONDY. *Mittheilungen über die Bohrthermen zu Harkany, auf der Margaretheninsel, nächst Ofen und zu Lippik and den Bohrbrunnen zu Alcsuth.*

ab , un tube que nous appellerons manométrique bk , avec un branchement bh , conduisant aux bains x et y . En f , est un récipient de dépôt pour les matières en suspension, que l'on peut, de temps en temps, faire évacuer au-dessous dans un canal g . cc' est un tuyau secondaire, alimentant une buvette. Enfin, le tube bk , ouvert à sa partie supérieure, peut se déverser vers ks et donner, au-dessus du Danube, une belle cascade st . Au moyen de tiroirs d et e , (fig. 128) pouvant ouvrir ou fermer les communications du récipient f , soit avec les bains, soit avec le canal d'évacuation g , on y obtient à volonté les trois états suivant :

1° Lorsqu'on veut alimenter les baignoires, on ferme le tiroir e et l'on ouvre d . L'eau thermale a alors assez de pression pour venir alimenter les baignoires x et y , en même temps qu'elle s'élève dans le tube bk (qui a 8 m. de haut au-dessus du sol) presque jusqu'à son orifice. L'expérience a montré que, même lorsqu'on alimente à la fois toutes les établissements (21 Wannensäler et 31 Spiegelbäder représentant 57 m³), l'eau ne descendait, dans le tube bk que de quelques centimètres au-dessous du déversoir et que, dans ces conditions, il ne se perdait pas de gaz.

2° Lorsqu'on veut nettoyer le récipient f , il suffit d'ouvrir d et e ; l'eau s'échappe alors en g et, de là, par le canal latéral gz (fig. 129).

3° Enfin, en fermant d , on fait monter toute l'eau dans le tube bk et on l'utilise alors pour alimenter la cascade.

Les figures 128 à 131 donnent le détail de ces dispositifs ; la figure 130 montre, en outre, l'amorce d'un second branchement l , destiné, comme le branchement i , à desservir un autre établissement.

Des installations analogues ont été adoptées par le même ingénieur aux deux autres sources artésiennes de Lippik et Alcsuth, également dans la plaine hongroise.

A **Châtelguyon**, nous avons déjà précédemment décrit¹ la disposition adoptée pour capter des sources gazeuses : disposition qui consiste, en principe, à laisser l'aide carbonique monter dans un tuyau superposé à la conduite d'eau thermale et venant déboucher dans le même réservoir d'emmagasinement que celle-ci.

A **Kislovodsk** (Caucase)², le problème se posait différemment : il s'agissait, non plus d'un sondage, comme à Pest ou à Châtelguyon, mais d'une chambre de captage en maçonnerie, posée directement sur le calcaire dolomitique néocène, d'où sortent, par des fissures, les eaux bicarbonatées ferrugineuses acidulées et l'on voulait, non plus maintenir intact le mélange d'eau et d'acide carbonique, mais recueillir cet acide isolément.

Sur l'emplacement de la source, dite du Narzan (géant), M. Dru a proposé d'établir une solide enceinte de maçonnerie (fig. 132), dont les fondations reposeraient directement sur la roche et de recueillir les gaz au moyen d'une cloche de 2, 20 m de diamètre, représentée par la figure. Cette cloche communiquait avec un réservoir, faisant fonction de collecteur, d'où les gaz sont refoulés dans un accumulateur de pression (nécessaire seulement si l'on veut avoir une

Dans le cas de bien des sources, surtout lorsque l'eau thermale sort avec une forte pression de la roche en place, il suffit, pour obtenir un isolement parfait, d'envelopper le griffon d'une enceinte en béton ou en maçonnerie, qui sert, en même temps, à recueillir l'eau thermale; nous en avons donné des types, pris à Bourbon-l'Archambault, à Nérès, etc., en faisant voir, dès lors, combien, même dans les cas les plus simples, il est indispensable de réaliser un système de captage, établi tout entier sur un même système bien homogène et en évitant rigoureusement tout ce qui pourrait contrarier les pressions.

Il est, presque toujours, bon d'entourer l'enceinte thermale d'un drainage, destiné à recueillir les eaux froides et à les entraîner au dehors.

On sait en quoi consistent les drains, dont le principe, déjà connu des Romains, fut retrouvé par Bernard Palissy. En creusant une rigole ou une galerie couverte et y posant, sur un lit d'argile, des files de tuyaux à joints perméables, ou de simples pierrées, on attire les eaux des terrains avoisinants, qui trouvent, dans ces conduites, une résistance moindre et une issue plus facile. C'est un procédé très employé, non seulement pour assécher des terrains, mais encore pour recueillir des eaux destinées à l'alimentation des villes¹

Quand il s'agit de sources captées par galeries, comme celles de Bagnères-de-Luchon, de Plombières, etc., le problème devient plus complexe : il est alors souvent nécessaire de faire, pour ces eaux froides, un véritable captage, analogue à celui des eaux thermales, par un drainage dans des galeries indépendantes et d'équilibrer soigneusement les pressions des eaux froides et des eaux chaudes afin d'empêcher tout mélange. Nous avons étudié en détail² comment on avait opéré à Luchon.

Enfin, il est arrivé parfois qu'on se soit trouvé dans des conditions beaucoup plus délicates, pour des sources telles que celles d'Ussat (Ariège), de Lavey en Valais, de Schinznach³ etc. suintant au milieu d'une vallée d'alluvions et subissant, à travers un sol per-

¹ Quand les galeries de drainage ont pour but de recueillir des eaux pures pour l'alimentation, on descend, autant que possible, en tranchée jusqu'à la roche solide; on garnit le fond (et parfois la paroi d'aval) d'un enduit argileux, pour boucher les fissures; on construit une galerie en pierres sèches, recouverte de sable fin et pur et l'on étend, au-dessus, un toit d'argile, destiné à empêcher les infiltrations superficielles; après quoi, on achève de remblayer la tranchée. Ce système pourra, exceptionnellement, servir aussi pour recueillir des eaux thermales.

² Pages 524 à 532.

Voir plus haut, pages 516, 172 et 332, 465.

méable, l'influence directe des eaux phréatiques ou du torrent voisin. Le problème consiste alors toujours à réaliser l'équilibre des pressions, de manière à refouler l'eau froide par l'eau thermale, ou, tout au moins, à les attirer séparément.

C'est pour le cas d'*Ussat* que M. François a imaginé la méthode des pressions hydrostatiques réciproques, décrite dans un chapitre précédent¹, en maintenant à un niveau donné les eaux froides, de manière à équilibrer les eaux thermales et empêchant qu'elles ne pussent s'élever davantage, pour acquérir une charge leur permettant de refouler les sources chaudes.

A *Encausse* (Haute-Garonne)², où une source sulfatée calcique sort d'un calcaire liasique, recouvert par les alluvions du torrent le Job, on a pu se protéger contre l'envahissement des eaux du Job par un simple barrage en béton.

A *Lavey*³, on s'est heurté à une difficulté plus grande encore ; car les eaux froides, au lieu de venir simplement d'une nappe d'eau voisine, à peu près au même niveau, suintaient elles-mêmes, sous pression, de fissures contigues à celles des sources thermales ; en sorte qu'il a fallu faire, entre les unes et les autres, un véritable triage et les capter séparément par des tuyaux distincts, placés dans le même puits. Après quoi, comme il s'agissait, en somme, malgré tout, de même qu'à *Ussat*, d'équilibrer les pressions de ces deux vases communicants, on a installé, sur chacun d'eux, une pompe distincte, dont la relation a été établie par tâtonnements. Il y a là un cas curieux, sur lequel nous croyons devoir donner quelques détails.

Captage de Lavey. — Les sources de Lavey jaillissent, comme nous l'avons dit⁴, sur la rive droite du Rhône, par des fissures du carbonifère, recouvert, en ce point, d'environ 20 m. d'éboulis et d'alluvions glaciaires. En 1831, la source fut découverte au milieu des éboulis et, en 1832, on établit un premier captage, formé de manchons en mélèze, engainés les uns dans les autres, jusqu'à une profondeur de 7, 50 m. ; puis, en 1860, on se décida à pousser le puits jusqu'à la roche en place ; mais on se trouva gêné, dans ce travail, par la rencontre, environ à 0, 50 m. au-dessus de la source thermale (dans la

¹ Page 516.

² 1872. FARIEL. *Captage des sources d'Encausse* (Toulouse, chez Pradel). Voir plus haut, p. 322.

Voir plus haut, pages 172 et 332, avec figures 56 à 58. Cf. DAUBRÉE. *Eaux souterraines*, I, 59.

Page 332, et figures 56 à 58.

cargneule ?), d'une venue d'eau froide, qui, en se mélangeant à l'eau chaude, la refroidissait et en affaiblissait les propriétés.

L'origine de cette eau froide est bien expliquée par la figure 58, p. 335, qui montre comment une nappe d'eau pluviale inclinée s'établit dans les éboulis de la rive droite du Rhône¹, pour aller se raccorder avec la nappe d'infiltration du thalweg du fleuve.

Pour y remédier, François conseilla un captage plus perfectionné des filets de la source, consistant dans un tube vertical, enfoncé dans la fissure thermique et mis en communication avec la pompe, et fit établir, en outre, deux pompes d'un diamètre proportionné à la colonne d'eau fournie², tant par la source thermique que par la source froide et destinées à épuiser, à mesure, la quantité d'eau provenant de l'une et de l'autre.

Ces pompes, actionnées par une grande roue hydraulique, qu'alimente le Rhône, devaient fonctionner jour et nuit, pendant la saison, sous la surveillance d'un mécanicien, qui avait pour charge, en réglant l'arrivée d'eau sur la roue, de lui faire donner un nombre déterminé de tours par minute. Il fallait que l'eau thermique eût un niveau constamment plus élevé que celui des eaux froides, pour empêcher celles-ci d'affluer vers elle et, néanmoins, que la différence de hauteur n'amenât pas l'eau chaude à s'enfuir vers les eaux froides.

C'était, en somme, la pression hydrostatique réciproque, réalisée par des pompes, mais avec cette difficulté que, la pression des eaux froides étant, à son tour, influencée par le niveau variable des eaux du Rhône, la différence théorique à établir entre les niveaux changeait constamment et devenait presque irréalisable.

En fait, le captage obtenu en 1860 fut très incomplet, et dans la suite, le débit et la température diminuèrent constamment, si bien qu'en 1881, une commission, qui comprenait MM. Renevier, Forel, Heim, Stockalper et Colladon, fut chargée d'aviser à le perfectionner. Les perfectionnements, qui furent proposés par ces savants, consistèrent, en principe, surtout à approfondir le puits de captage de manière à aller capter les filets d'eau chaude et d'eau froide dans la roche en place, comme le montre la figure 133³, puis à modifier les installations de pompes, de conduites etc., mais sans changer le principe général du captage; réalisés par M. Otto Ossent, ils donnèrent d'excellents résultats.

Après avoir installé un ventilateur et placé les pompes à 15 m. de profondeur dans le puits, on épuisa les eaux et l'on fit une fouille de 2 m., qui mit

¹ Il fut facile de constater que cette eau ne venait pas du Rhône (*rapport d'expertise de 1883*, p. 19) en vérifiant que la hauteur de l'eau du puits n'était pas en relation avec celle du fleuve.

² En réalité, dans la pratique, il y avait trois pompes, l'une pour l'eau chaude, l'autre pour l'eau froide (tiédie par un certain mélange d'eau thermique) et la troisième, dite pompe d'épuisement, destinée, en cas de nécessité, à épuiser rapidement l'eau froide et à la rejeter dans le Rhône. En temps ordinaire, les deux premières fonctionnaient seules.

³ Cette figure 133 représente un premier projet, dû à M. Heim. Il consistait à entailler, au fond du puits, un goulot *a* de 0,70 m. de diamètre, puis, plus bas, une chambre de captage plus large, dans laquelle, au moyen d'un épuisement continu, on pourrait faire travailler un homme, qui irait capter séparément les filets froids *c* et les filets chauds *d* par des tubes de grès, pris dans le ciment *e*. Le travail fini, on devait boucher les tuyaux amenant l'eau froide.

en évidence, dans le terrain métamorphique (carbonifère d'après M. Renevier, qualifié autrefois de gneiss), une fissure F, donnant issue à l'eau chaude et un certain nombre de veues froides *a, b, c*, (fig. 134). La fissure thermique fut alors recouverte d'une dalle, placée à 1,60 m. sous la surface du rocher et reliée par un tuyau en grès GH de 6 cm. de diamètre, posé en dessous de la dalle, avec une conduite verticale en ciment IL de 15 cm. de diamètre, qui s'élève jusqu'à 87 cm. en dessous de la surface du rocher. On opéra de même pour les

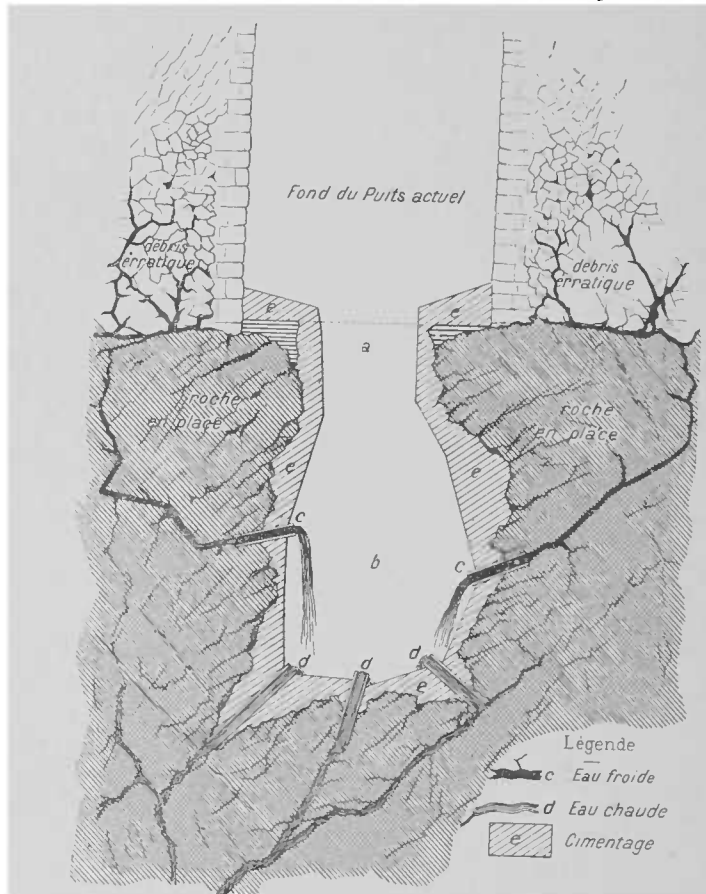


Fig. 133. — Esquisse d'un système de captage applicable à la source de Lavey (d'après M. Heim).

Echelle $\frac{1}{40}$.

eaux tièdes (mélange d'eaux froides et d'un peu d'eau thermique), qui furent captées dans quatre tuyaux collecteurs *b, b', b'', b'''* dirigés vers une conduite en ciment MN. pareille à celle de l'eau chaude.

A partir de 87 cm. en dessous des maçonneries, les deux conduites verticales sont continuées par des tuyaux de grès de 15 cm. de diamètre intérieur, qui s'élèvent, celui d'eau chaude jusqu'à 2,59 m., celui d'eau tiède jusqu'à 2,35 m. au-dessus de l'établissement des maçonneries.

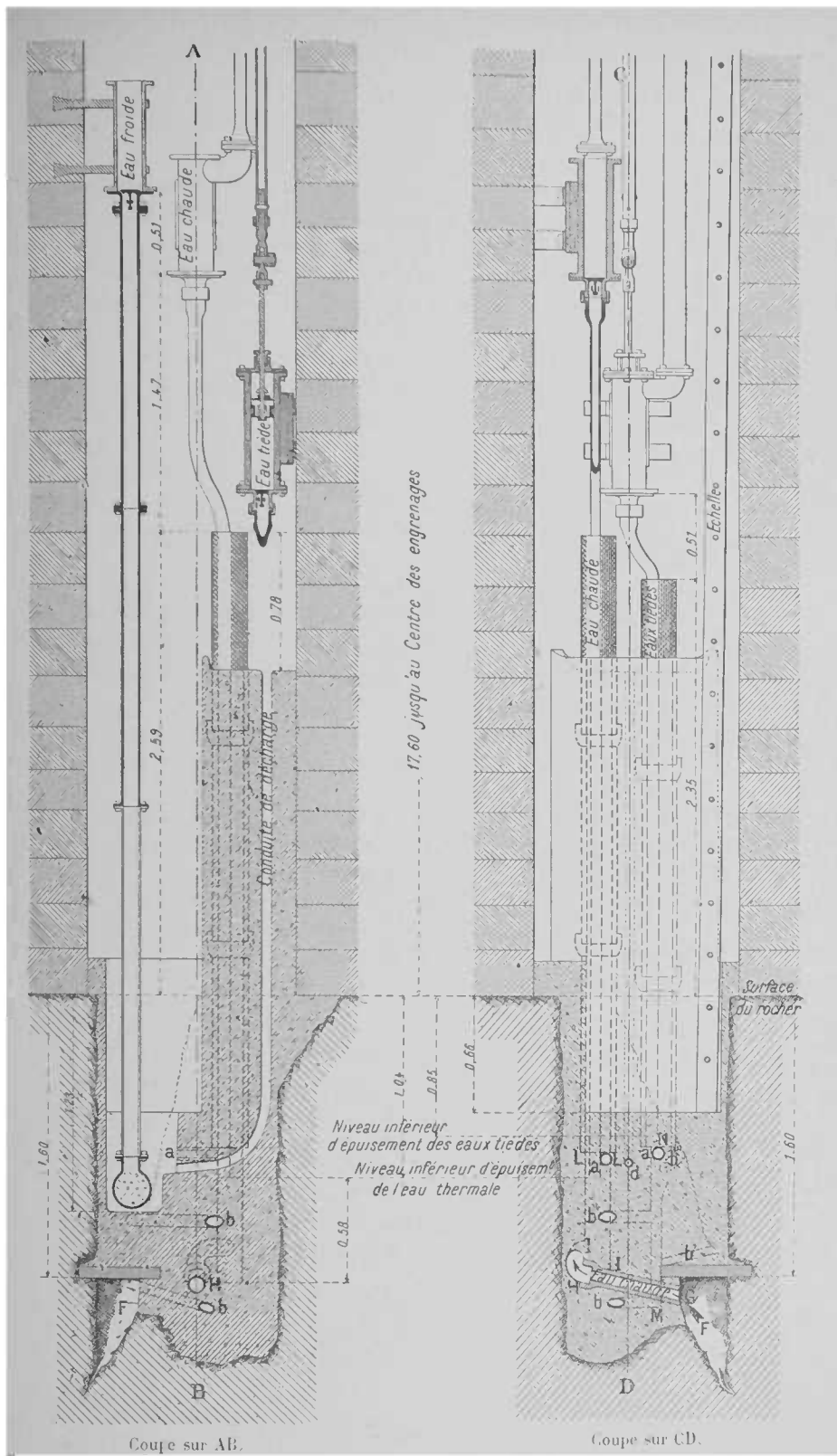


Fig. 134. — Travaux de captage et transformation du mécanisme du puits de Lavey, exécutés en 1884 par M. Otto Ossant.

Echelle de 2,6 cent. pour 1 m.

Le tuyau d'aspiration de la pompe d'eau chaude plonge de 3,63 m. dans son tuyau de grès et celui de la pompe d'eau tiède de 3,20 m.

Jusqu'à 50 cm. environ de leur orifice supérieur, les tuyaux de grès sont pris dans un massif de béton, dont la partie supérieure forme cuvette et reçoit les eaux, que déversent les tuyaux de grès lorsque les pompes sont arrêtées.

Pour empêcher la formation des vapeurs d'eau chaude, une conduite de décharge est ménagée dans le milieu du massif de béton, derrière les tuyaux de grès ; par cette conduite, les eaux s'écoulent dans une fosse, au fond du puits, d'où elles peuvent être épuisées par la grande pompe.

La pompe d'eau tiède est à 14,74 m. au-dessous du centre des engrenages ; celle d'eau chaude à 13,54 m. et celle d'épuisement à 13,03 m. Les deux petites pompes ont 13 cm. de diamètre intérieur et 675 mm. de longueur ; la grande pompe a 15 cm. de diamètre et 625 mm. de longueur. Les trois pompes sont à simple effet, aspirantes et élévatoires. La course du piston est : pour les pompes d'eau tiède et d'épuisement, de 33 cm. ; pour la pompe d'eau chaude, variable entre 0 et 48 cm.

Le niveau d'épuisement des eaux dans les tuyaux de grès peut être réglé à volonté, en combinant la vitesse du moteur avec la longueur de la course de piston de la pompe d'eau chaude. La manœuvre des pompes est rendue très facile par ce fait que l'eau tiède doit toujours être pompée jusqu'au fond, tandis que l'eau chaude est maintenue de 10 à 20 cm. au-dessus.

La grande pompe d'épuisement ne fonctionne que lorsqu'une des autres pompes est arrêtée et pour épuiser les eaux d'infiltration ; elle marche environ deux fois, dix minutes par jour.

La dépense totale de cette réfection a été de 13 650 fr., ainsi décomposée :

I. — *Installations et matériel.*

Terrassements, charpentes, abris, etc	729
Location d'une locomobile.	654
Achat d'un ventilateur et de son tuyau	500
Outils, appareils d'épuisement, etc.	3 487
	<u>5 370</u>

II. — *Main-d'œuvre.*

Journées de tailleurs de pierre.	2 214
— de mécaniciens, surveillants, etc.	2 325
— de manœuvres	55
Total.	<u>4 594</u>

III. — *Combustibles, huile, etc*

1 156

IV. — *Travaux de cimentage dans le puits.*

445

Divers, déplacement des pompes, transports, etc

2 085

13 650

QUATRIÈME PARTIE

AMÉNAGEMENT DE LA SOURCE THERMO-MINÉRALE APRÈS LE CAPTAGE

Lorsque la source thermo-minérale est entièrement captée et que l'eau peut être recueillie, sur le griffon, dans un état de pureté complet, l'ingénieur a terminé la partie la plus délicate et la plus ardue de sa tâche. Néanmoins, il reste encore quelque chose à faire pour amener l'eau au point où elle doit être consommée, sous la forme même où on l'utilisera.

Ici il convient de distinguer :

Les applications des eaux minérales peuvent toutes se ranger dans deux catégories principales : à l'état interne, en boisson ; à l'état externe, en bains, douches, etc. Suivant que l'eau sera destinée à l'un ou à l'autre de ces emplois, il est évident qu'on devra lui faire subir, au sortir du griffon, des manipulations différentes.

L'eau destinée à la boisson sera, en général, ou débitée sur la source même, ou immédiatement embouteillée sur place et les opérations, auxquelles elle pourra être soumise, seront simplement un pompage, une clarification et un embouteillage.

L'eau, destinée au service des bains, commencera, au contraire, presque toujours, par subir un certain transport jusqu'à l'établissement thermal (parfois dans des conditions particulièrement difficiles, en siphon, par-dessus un obstacle) et, comme on aura besoin de pression pour les douches, il arrivera souvent qu'on la fasse remonter jusqu'à un réservoir, placé sur un point culminant.

En outre, sa température ne sera qu'exceptionnellement au griffon celle qui convient pour des bains ; il faudra donc, soit la

refroidir, soit la réchauffer : ce qui exigera des installations spéciales.

Nous allons examiner, tour à tour, ces deux cas principaux : après quoi, nous dirons quelques mots de certaines formes accessoires, sous lesquelles on utilise parfois les eaux thermales : eaux pulvérisées, sels évaporés, boues, conferves, etc.

CHAPITRE PREMIER

UTILISATION EN BOISSON — POMPAGE CLARIFICATION. — EMBOUTEILLAGE

Les eaux minérales, une fois captées et, si besoin est, pompées¹ ne peuvent généralement pas être employées immédiatement pour la boisson, telles qu'elles sortent du griffon par des sondages. C'est ainsi que beaucoup d'eaux, surtout parmi les sources gazeuses obtenues artificiellement par trous de sonde, entraînent de minces particules sableuses ou argileuses, qui les rendent tout à fait impropres à l'embouteillage. Pour remédier à cet inconvénient, on doit, avant tout, agir sur le régime de la source, le régulariser, éviter les intermittences et les bouillonnements, qui donnent de brusques soubresauts dans toute la colonne thermale et nous avons vu comment on pouvait souvent y parvenir par un tubage complet et par l'emploi d'un tube, dit siphonide².

Lorsqu'on n'a pas d'autre ressource, il faut, tout au moins, laisser l'eau se clarifier par dépôt dans une caisse de décantation : ce qui n'est pas sans quelque inconvénient pour les eaux gazeuses acidulées, employées comme eaux de table, eaux pour lesquelles cette mesure est le plus nécessaire. En effet, pendant le séjour de l'eau dans cette caisse, une partie de son acide carbonique se dégage et peut diminuer ses propriétés ; il est alors bon d'employer un appareil analogue à celui que nous décrirons bientôt à Châtelguyon, page 590, pour remélanger l'excès d'acide carbonique avec l'eau³.

Une décantation de ce genre est, d'ailleurs, nécessaire pour

¹ Nous reviendrons, p. 595, sur l'application des pompes aux sources thermales.

² Page 552, à Saint-Yorre.

³ Nous ne parlons pas du procédé frauduleux et trop usité, qui consiste à forcer la proportion d'acide carbonique, au moyen d'appareils qui le fabriquent artificiellement, avec du marbre et de l'acide chlorhydrique.

bien des eaux gazeuses, dans lesquelles il se produit un trouble, un louche, formé d'un précipité ferrugineux, au moment du premier dégagement d'acide carbonique et qui, ainsi altérées en apparence, ne seraient plus marchandes.

Pour les eaux, qui ne sont pas gazeuses, cette clarification, par repos dans une caisse fermée, n'a plus d'inconvénient et peut même se combiner avec la réfrigération, dont nous allons parler. Comme il n'est guère d'eau thermale, qui n'entraîne des parcelles en suspension, il sera, presque toujours, utile de l'adopter, même dans le cas des eaux destinées à l'usage balnéaire : soit, comme à Bagnères-de-Luchon, par des caisses interposées sur les conduites¹, soit, comme dans les sources captées sur le griffon en roche, dans la chambre de captage même.

Tubes ou chambres de captage auront, d'ailleurs, on le conçoit, une tendance à s'emplier progressivement de dépôts et il sera nécessaire de les curer de temps à autre. Nous en avons donné un exemple à Bourbonne². A Bourbon-l'Archambault, où la source est captée directement sur le gneiss, il s'est déposé, de 1600 à 1860, 1,60 m. d'un sable quartzueux blanc grisâtre, formé de particules très ténues du gneiss sous-jacent, peu à peu coagulées.

L'installation des *buvettes* est toujours simple³. On les place ordinairement sur la source même et, toutes les fois qu'il y a lieu d'éviter l'altération il est bon de faire le puisement par un robinet latéral, alimenté par un tuyau plongeant dans la source, en forme d'entonnoir renversé. Si la température de l'eau ne convient pas à la boisson, on la fait circuler dans un serpentin à tuyau plein, fonctionnant, soit à réfrigération, soit à réchauffement.

L'*embouteillage* des eaux minérales, qui s'était fait longtemps sans précautions spéciales, est, aujourd'hui, dans les stations thermales bien organisées, l'objet de mesures hygiéniques, destinées à combattre l'introduction des microbes.

On a, en effet, constaté que certaines eaux minérales, utilisées précisément comme eaux de table par crainte des boissons contaminées, arrivaient à contenir jusqu'à 100 000 microbes par centimètre cube, microbes pour la plupart introduits au moment de l'embouteillage, bien que pouvant provenir aussi d'un défaut de captage.

Voir page 500, figure 96.

Voir page 539.

Voir les coupes des figures 124 et 125, p. 558 et 559.

Les mesures propres à éviter cette contamination des eaux minérales sont encore très discutées ¹.

On a prescrit la méthode suivante :

1^o Premier lavage des bouteilles dans un local distinct de celui servant à l'embouteillage :

2^o Stérilisation par l'eau acidulée à l'acide sulfurique (très critiquée par d'autres personnes), ou par tout autre système et transport des bouteilles, le goulot renversé, au lieu d'embouteillage ;

3^o Dernier rinçage par de l'eau portée à 120° sous pression et embouteillage immédiat.

Quant à l'embouteillage lui-même, on a proposé de le faire dans l'intérieur d'une caisse stérilisée par l'acide sulfureux gazeux et reposant sur une cuve d'eau acidulée ². Cette caisse a des parois vitrées, avec des manches en caoutchouc pour introduire les mains. Les bouteilles elles-mêmes ne pénètrent qu'en passant par un réservoir profond, rempli d'eau acidulée, où elles sont manœuvrées par de petits ascenseurs.

Une fois qu'on les a ainsi stérilisées, on les remplit et les bouche dans l'intérieur même de la caisse.

Il va, d'ailleurs, de soi qu'on doit prendre des bouteilles en verre noir ³ et des bouchons très fins, très flexibles, d'un diamètre supérieur environ d'un quart à celui du goulot de la bouteille, qu'on introduit mécaniquement sous pression et qu'on recouvre d'une capsule métallique. On a proposé de faire macérer préalablement ces bouchons dans une solution de sulfate de fer, pour saturer la matière astringente du liège, qui pourrait agir sur le fer des eaux, et de les purifier par immersion dans le bisulfate de soude, ou encore par un courant d'acide sulfurique. Pour les eaux sulfureuses, on a recommandé de faire l'embouteillage à la température ordinaire, en refroidissant, au besoin, préalablement l'eau thermale par la circulation dans un serpent in.

On doit également signaler l'emploi, souvent proposé, mais peu pratiqué, de vases de grande capacité, destinés à l'exportation des eaux minérales, vases pouvant être, par exemple, flexibles comme une vessie, pour éviter l'accès de l'air pendant le remplissage.

¹ Voir l'écho de ces discussions au congrès d'hydrologie de Clermont, 1897.

Voir *Nature*, 5 mai 1894, p. 350. — Cf. *Dictionnaire* DURAND-FARDEL : Articles *Bouteilles, conservation, embouteillage*.

³ Le verre clair laisserait passer les rayons solaires, qui peuvent produire une altération.

CHAPITRE II

TRANSPORT DES EAUX DU GRIFFON A L'ÉTABLISSEMENT BALNÉAIRE

Conditions générales du problème. — Le problème du transport des eaux de leur point de captage à leur point d'utilisation, sans être des plus difficiles, n'est pourtant pas aussi simple qu'on est d'abord disposé à se l'imaginer. Il faut, en effet : d'une part, conserver à l'eau toutes ses propriétés, c'est-à-dire sa température, ses gaz dissous et ses éléments chimiques ; d'autre part, adopter une combinaison, qui résiste à l'action toujours corrosive d'une eau chaude et minéralisée.

Le problème se compliquera, lorsqu'il sera nécessaire d'élever l'eau mécaniquement au-dessus de son point d'émergence : ce qui arrivera assez souvent, par suite de la position habituelle des griffons thermaux dans les dépressions orographiques, représentant des points de moindre pression.

Avant d'entrer dans le détail des diverses combinaisons, très nombreuses, que peuvent présenter les données ci-dessus indiquées du problème, nous allons d'abord montrer sommairement quelle est l'influence de chacune d'elles. Quand, dans la pratique, ce qui arrivera souvent, on aura à satisfaire, en même temps, à deux ou trois conditions distinctes, demandant chacune une solution plus ou moins contradictoire, il y aura lieu de discuter le compromis à établir.

D'une façon générale, nous attirerons, en outre, l'attention sur la nécessité de placer les conduites d'eau thermale dans des conditions telles qu'on puisse les surveiller facilement, les curer au besoin, s'il s'y est produit des dépôts incrustants et les remplacer par parties.

1° *Pour conserver à l'eau toute sa chaleur*, il faut, évidemment, la transporter dans une conduite mauvaise conductrice et préservée, le mieux possible, des influences extérieures. C'est ainsi qu'on

sera amené à adopter une conduite en bois, ou mieux un tuyau de bois, entouré d'une seconde enveloppe de bois, séparée de la première par un matelas d'air. En enterrant cette double conduite à une certaine profondeur, on pourra, sur plusieurs kilomètres de distance, ne perdre qu'une fraction de degré, ainsi que nous en donnerons plus loin un exemple à Pfäfers-Ragatz et l'on réalise, en outre, surtout dans les pays de forêts, une notable économie. Mais une semblable conduite présente tout une série d'inconvénients, qui la rendent presque inutilisable dans bien des cas.

C'est ainsi qu'il est impossible d'établir des joints rigoureusement étanches, de sorte que cette solution se trouve condamnée, tant pour les eaux très gazeuses, dont une bonne partie des gaz se perdrait, que pour les eaux destinées à être soumises à une forte pression, par exemple celles qui sont refoulées par des pompes vers des réservoirs situés plus haut, ou encore pour les eaux peu abondantes et dont la moindre goutte est précieuse.

En outre, certaines eaux minérales attaquent très rapidement le bois. A Bourbonne-les-Bains, on avait employé, en 1859, des tubes de chêne, qui, sous l'action des sulfates contenus dans l'eau, donnèrent¹ un dégagement abondant d'hydrogène sulfuré : il en résulta, non seulement l'altération du bois, mais une attaque des parties de cuivre et même de plomb, quoique ce dernier métal résistât parfaitement à l'eau minérale pure. Cependant, d'après d'anciennes observations faites sur les mêmes sources, le sapin aurait été moins attaqué.

Dans certains cas, pour empêcher l'altération du bois par l'air ou l'humidité, on l'injecte de chlorure de zinc. Pour maintenir l'étanchéité dans les coudes trop prononcés, on peut y intercaler localement, entre les tuyaux de bois, de courts tuyaux de plomb.

Pour faciliter les remplacements dans les conduites en bois, François a recommandé l'emploi des joints biseautés.

Indépendamment du bois, le grès² se prête assez bien au transport de l'eau sans perte de chaleur et a, en outre, l'avantage de fournir des tuyaux très imperméables et surtout inaltérables sous l'action de l'eau minérale. Cependant, son application, sans précautions spéciales, a parfois donné lieu à des déboires. C'est ainsi qu'à

1863. DROUOT. *Bourbonne-les-Bains* (Ann. d. M., t. III, p. 52 du tirage à part).

² On a également proposé, à Lavey, en Suisse, l'emploi des tuyaux de serpentine, qui se fabriquent dans le val Bognanca, près de Domo d'Ossola.

Bourbonne, en 1875 ¹, des conduites de ce genre, placées dans une galerie, où se produisaient des infiltrations froides, ont été très rapidement fendillées en tous sens, sous l'influence des variations de température, amenant des effets de dilatation et de raccourcissement; au bout de trois ans, il a fallu les remplacer par des tubes de cuivre.

D'autre part, il ne faut pas oublier que les conduites d'eau sont soumises à de brusques à-coups qui obligent à leur donner une forte résistance.

Par contre, en divers points de Suisse, à Gurnigel, à Lavey ². etc., on a pu s'en servir, avec des précautions spéciales que nous indiquerons, pour le transport de l'eau à la surface sur plus de 500 m. de long.

Enfin, on peut employer des pâtes calorifuges (bitume, mélange d'argile et de bourre), des enveloppes en filasse goudronnée, des manchons de mortier recouverts de bitume. etc.

En tout cas, il faut éviter les tuyaux de métal, et notamment de fonte, qui, étant très conducteurs, donnent une perte de température notable; il importe également de ne pas mettre la conduite trop près du sol et de lui assurer, quand on le peut, une pente suffisante pour que le trajet de l'eau s'accomplisse rapidement.

^{2°} *Pour conserver les gaz*, il faut prendre quelques dispositions particulières. En effet, ces gaz, qui, en profondeur, c'est-à-dire sous pression, étaient dissous dans l'eau, ont, depuis le moment où ils sont arrivés à la surface, une tendance constante à se dégager, à se séparer de l'eau; et, si le captage n'enveloppe pas complètement le griffon, ou si la canalisation n'est pas tout à fait étanche et à niveau plein, ils pourront se perdre en partie. D'autre part, la force ascensionnelle de l'eau, notamment des eaux acidulées à acide carbonique (Sauerlinge des Allemands), est généralement, en grande partie, une résultante de la pression des gaz; et, comme ceux-ci montent par bouffées intermittentes, l'écoulement des eaux très irrégulier peut amener de brusques coups de bélier. Nous avons déjà indiqué la façon dont, à Châtelguyon, ce problème de transport des gaz a été résolu ³. Nous allons y revenir en traitant de la composition chimique.

^{3°} *Pour conserver la composition chimique intacte*, il convient,

RIGAUD. *Mémoire sur Bourbonne* (Ann. d. M., 7^e, t. XVII, p. 427 et 529).

Rapport d'expertise sur les eaux de Lavey, p. 33 et 52.

³ Page 473.

toutes les fois qu'on le peut, de faire fonctionner les conduites à tuyau-plein, afin d'éviter le contact de l'air : ce qui exige, notamment, une étude attentive du profil, soit une pente toujours ascendante, soit une descente suivie d'une remontée ; le moins possible, un point culminant, où se dégageraient les gaz.

On peut, dans ce cas, produire un refoulement par pompes à l'amont, après règlement de l'écoulement à l'aval : ce qui donne de bons résultats pour les eaux gazeuses. On a également appliqué le remous à l'aval ou sur le trajet, au moyen de robinets régulateurs à cadran.

La bonne conservation de l'eau dépend beaucoup de celle des gaz, qui contribuent à maintenir certains principes, notamment la chaux et l'oxyde de fer, en dissolution.

La nature, plus ou moins altérable, de la conduite aura également une influence, puisque à une altération des tuyaux par l'eau minérale correspond forcément une altération connexe de celle-ci. C'est ainsi que les tuyaux de bois sont à proscrire avec une eau chargée de sulfates, à moins toutefois qu'on ne désire voir l'eau se charger de sulfures : ce qui arrivera toujours par la réduction opérée en présence des matières organiques.

Il peut être plus grave d'introduire, dans la composition d'une eau, des quantités appréciables de cuivre ou de plomb, par l'emploi de tuyaux de l'un de ces métaux en présence de certains sels. C'est ainsi que l'hydrogène sulfuré, en présence de l'air, peut transformer le plomb en sulfate.

4° Pour éviter l'action corrosive des eaux minérales, on recourra parfois au grès, plus souvent au métal : notamment au cuivre pour les eaux chlorurées, au plomb pour les eaux sulfurées. En ce qui concerne le choix du métal, nous renvoyons à ce que nous avons dit, plus haut, d'une façon générale¹. Dans la plupart des cas, on aura, en pratique, avantage à employer de la fonte, plus économique bien que plus altérable que le cuivre, surtout si on peut éviter l'intervention de l'air et si on a des facilités pour la surveillance et le remplacement des conduites corrodées.

Néanmoins, à Bourbonne, où l'on a fait, en 1873, une tuyauterie très compliquée, on a été forcé, par suite de l'altération rapide du fer sous l'action de l'eau minérale, d'employer du cuivre.

5° Le problème d'élever l'eau peut se poser de deux façons

¹ Page 451.

différentes : ou bien, il s'agira de recueillir l'eau au fond d'un puits, pour la conduire, en définitive, à un niveau inférieur à celui de son émergence, et, dans ce cas, fréquent en pays de montagnes, l'usage du siphon sera tout indiqué ; ou bien, le niveau d'utilisation sera, au contraire, supérieur au niveau d'émergence et il faudra employer une pompe, mue par un moteur quelconque, pompe que l'on utilisera alors souvent, en même temps, pour augmenter le débit de la source en la captant plus bas.

Nous donnerons des exemples de siphons à Enghien, à Uriage, etc. ; des exemples de pompes à Bourbon-l'Archambault, Nérès, Lavey, etc.

Il est rare qu'on ait à refouler l'eau par des pompes à une grande hauteur ni à une grande distance. Dans la majorité des cas, l'établissement thermal est, en effet, à proximité immédiate de la source et l'on n'aura en vue que d'y faire arriver l'eau sous pression à un étage supérieur, ou, quand les conditions du terrain le nécessiteront, de l'envoyer à un bassin réfrigérant, situé, pour faciliter l'évaporation, sur une hauteur. Jamais, on peut le dire, la difficulté à résoudre ne sera semblable à celle qui s'est présentée pour les sources de pétrole, dont on voulait transporter le produit à des dizaines de kilomètres. Cependant, il arrivera parfois que le point d'émergence de la source soit impropre à l'établissement d'une ville thermale, soit par sa position au fond d'une gorge presque inaccessible, comme à Pfäfers, ou dans un bas-fonds sombre, un peu marécageux ou même malsain, comme dans certaines stations du Caucase, et, dans ce cas, on n'aura pas toujours la facilité de s'établir en aval, c'est-à-dire de laisser l'eau descendre par sa gravité, comme à Pfäfers : il pourra arriver, précisément parce que les eaux sourdent en général au point le plus bas, qu'on soit obligé de les remonter. En pareilles circonstances, la solution si remarquable des pipe-lines américains pour le transport du pétrole pourra être intéressante à étudier.

Éclaircissons maintenant ces principes par l'examen des solutions adoptées dans quelques cas de détail.

§ 1. — *Transport d'une eau chaude, mais peu minéralisée, vers un point situé à l'aval.*

Ce cas, qui est peut-être le plus simple de tous, est celui qui s'est présenté dans nombre de stations alpestres : ainsi, de Pfä-

fers à Ragaz, où, sur 5 km., on est arrivé à ne perdre que 2°,5 de température; de Wilbad-Gastein à Hof-Gastein, où, sur plus de 8 km., on n'a perdu que 7°,5, etc.

Pour éviter la déperdition de chaleur, on sera conduit alors à adopter des conduites en bois, qui, vu la faible minéralisation de l'eau, n'auront aucune raison pour s'altérer rapidement et, comme il faudra commencer par extraire l'eau thermique d'une fosse plus ou moins profonde, on adoptera, sur le griffon même, un siphon alimentant cette conduite.

Les résultats à Pfäfers (canton de Saint-Gall) ont été particulièrement satisfaisants.

Pour les 500 premiers mètres du trajet, les eaux doivent suivre une gorge très encaissée, suspendue au rocher au-dessus du torrent; sur cette longueur seulement et en raison de ces conditions spéciales, on a pris de gros tuyaux de fonte, scellés dans la pierre, qui, en 300 m., ont donné une perte de 1°,3. A partir de là, le long de la vallée descendant à Ragaz, où se trouvent les bains, on a utilisé des conduites de bois, qu'on faisait jadis avec des troncs creusés suivant l'axe et d'un diamètre intérieur d'environ 0,18 m., les joints étant garnis de lames de tôle; aujourd'hui, on emploie de préférence des conduites artificielles formées de plusieurs pièces de bois assemblées, comme le montre la coupe (fig. 135), à la façon des douves d'un cuvelage, avec cercles de fer tous les 50 cm. La perte de température, sur 5 km, n'est que de 2° à 2°,5, alors qu'avec des tuyaux de fonte semblables à ceux du début, elle eût été 3 fois plus forte.

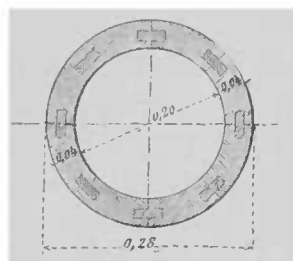


Fig. 135. — Coupe des conduites en bois entre Pfäfers et Ragaz.

Echelle au $\frac{1}{11}$.

Il convient d'ajouter que la pente des tuyaux de fonte n'est là que de 0,008 par mètre, tandis que celle des tuyaux de bois est de 0,032 (163 m. pour 5 kil.).

A Lavey (canton de Vaud), on avait, jusqu'en 1883, des conduites de fer galvanisé de 32 mm. de diamètre, qui, sur 500 m., faisaient perdre 11 degrés et demi. M. Colladon conseilla alors de les remplacer par des tuyaux en poterie de grès, d'un diamètre plus grand (40 mm.), en préservant ceux-ci de la perte par rayonnement, ainsi que des accidents de rupture dus aux coups de bélier, par les divers dispositifs suivants (fig. 136 et 137).

Sur nos figures, TT représente la conduite en poterie de 500 m. environ de long. CC est un canal, ou caisse, long de 500 m., en planches de sapin ou de mélèze, d'au moins 3 cm. d'épaisseur, qui enveloppe la conduite sur toute sa

longueur. Cette caisse présente, à l'intérieur, un vide d'environ $\frac{1}{3}$ de mètre carré de section, que l'on bourre de sciure de bois bien tassée ou de laine de scories (plus coûteuse) pour éviter les pertes de chaleur.

Chaque tube est supporté par une forte traverse en mélèze KK, portée elle-même par des taquets MM vissés à la caisse. Pour garantir le tube contre les ruptures, on interpose, entre lui et la traverse, un petit coussin élastique en toile grossière.

A chaque 100 m., on intercale un tuyau en poterie, muni d'une tubulure *t*,

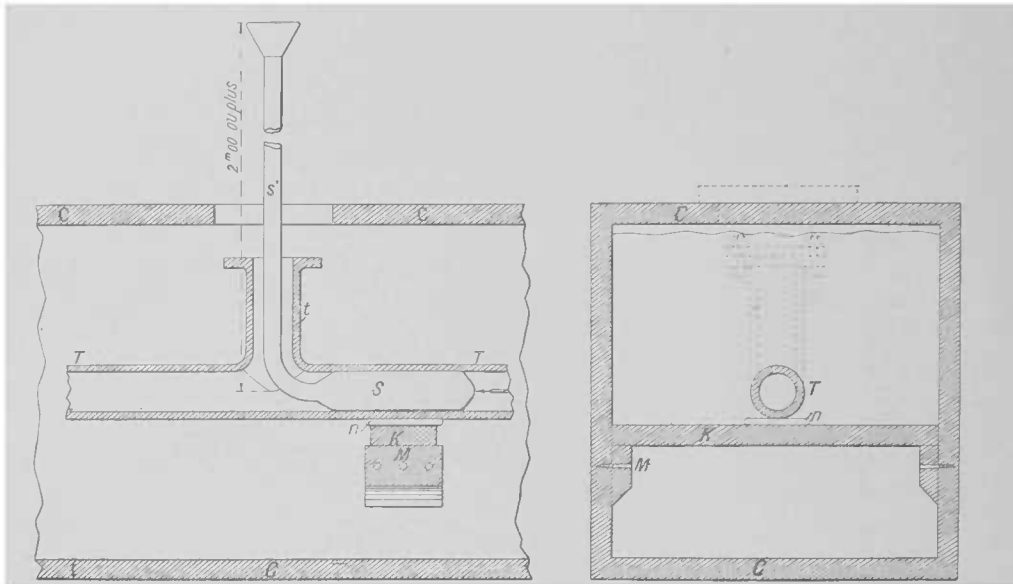


Fig. 136 et 137. — Coupe longitudinale et coupe transversale de la caisse, d'après un rapport sur les sources de Lavey.

Echelle au $\frac{1}{12}$.

hermétiquement fermée à sa partie supérieure par son couvercle et faisant fonction de cloche d'air ou de gaz, en temps ordinaire.

Lorsqu'une diminution notable dans la quantité d'eau arrivant aux bains fait reconnaître qu'il existe une fuite, on introduit à la main, par chacun des tubes *t*, un bouchon en caoutchouc S, soit un simple cylindre, soit une bouteille en caoutchouc munie d'un long tube S', dont la longueur est suffisante pour que la pression intérieure dépasse la pression de l'eau thermale dans le tube d'amont. On isole ainsi des sections de 100 m., qu'il suffit de remplir successivement avec de l'eau ordinaire pour constater, par l'observation du niveau dans la tubulure la plus élevée, laquelle présente une fuite.

Enfin, pour atténuer les coups de bélier quand la vitesse de l'eau dans la conduite doit subir des interruptions, on peut interposer, entre l'extrémité aval de la conduite et les robinets d'écoulement dans un réservoir ou dans les baignoires, un tuyau de caoutchouc de quelques mètres de longueur, assez épais pour ne pas se déchirer et qui, par son élasticité, prévient les causes de rupture qui résulteraient d'un trop brusque arrêt.

L'établissement de cette conduite a été estimé approximativement comme suit :

500 m. de tuyaux en poterie, diamètre intérieur : 40 mm.	500 fr.
Caisse en sapin, 500 m. de long, 1,60 m. de contour, 3 cm. d'épaisseur de bois, posée.	2 200 —
500 traverses et taquets, rendus posés.	500 —
100 m ³ de sciure de bois, à 2,50 fr. le m ³	250 —
Accessoires, fouilles, goudronnage de la caisse.	1 200 —
	4 650 fr.

A la source sulfureuse du **Gurnigel**, on a établi, de même, une conduite en poterie de 1 220 m. pour remplacer une conduite métallique. Les tuyaux de 1 m. de long et 8,50 cm. de diamètre sont à emboîtements et joints par du ciment ; ils sont enfouis à une profondeur de 0,90 à 1 m. et sont placés dans des triangles de planches, en vue de prévenir des ruptures.

Enfin, l'on peut encore exceptionnellement employer des conduites de fonte ou de tôle de fer, lorsque le trajet à effectuer est court ou que la source est surabondamment chaude, en sorte qu'on ne craint pas de la refroidir.

Aux sources de **Stachelberg**, dans le Linththal, nous avons vu employer des conduites en tôle de fer (fig. 138), ayant 1,40 m. de long, avec un diamètre

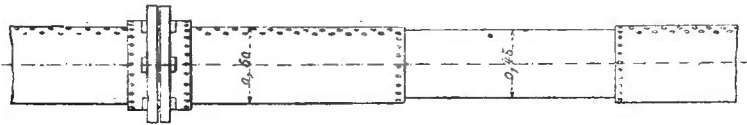


Fig. 138. — Conduites en tôle employées à Stachelberg.

Echelle au $\frac{1}{35}$.

extérieur alternativement de 0,45 m. et 0,50 m. pour permettre l'emboîtement et, tous les 7 m., un joint de dilatation.

§ 2. — *Transport d'une eau sulfurée, facilement altérable, avec forte descente.*

A Cauterets, on avait à transporter des eaux sulfurées facilement altérables à une distance de 290 m., avec une dénivellation, en descente, de 95 m. : ce qui présente une difficulté spéciale pour avoir l'écoulement à niveau plein, ou pour empêcher l'altération des eaux.

« On a adopté avec succès, d'après François, le mode d'écoule-

ment à tuyau plein à l'amont et à l'aval, au moyen de robinets de remous, combiné avec l'écoulement à section libre dans le trajet, sans aucun contact avec l'air extérieur. Les conduites sont en terre cuite dure, montée au ciment de Vassy et consolidée par un manchon de béton. »

§ 3. — *Transport d'une eau fortement gazeuse vers un point plus bas que son niveau hydrostatique.*

C'est le cas des sources de Châtelguyon, dans le Puy-de-Dôme.

Nous avons déjà indiqué incidemment ailleurs¹ la disposition générale, qui avait été adoptée pour capter les gaz dans cette station thermale ; il nous reste à donner quelques détails.

Quand une source est chargée de gaz, il faut prendre des précautions toutes spéciales pour obtenir un écoulement régulier de ceux-ci : sans quoi, on aurait bientôt des désordres complets dans le débit et des coups de bélier, qui disloqueraient la canalisation.

Il est facile de s'en rendre compte.

En effet, l'eau saturée de gaz en profondeur, en montant le long du filon thermal, laisse s'échapper peu à peu, par suite de la diminution de la pression qu'elle a à supporter, une certaine quantité de ce gaz. Une partie de ce dernier continue à faire route avec l'eau, et le surplus se loge dans toutes les poches renversées que peut présenter le filon. Une fois ces poches remplies, tous ces gaz, mis en liberté, s'accumulent dans la colonne ascendante liquide, la rendant, par cela même, plus légère : d'où résulte une diminution de pression, qui permet au gaz emprisonné dans les poches de se détendre et de s'échapper tumultueusement.

Quand la source, à l'état normal, ne monte pas jusqu'à la surface du sol, ce phénomène produit des jaillissements intermittents, comparables à ceux des geysers ; et c'est en le reproduisant artificiellement par la création d'une cloche à gaz à la base du captage qu'on obtient certaines sources intermittentes, destinées à attirer la curiosité des touristes. Mais il va de soi qu'une semblable irrégularité et de pareils « coups de bélier » ont les inconvénients les plus graves pour la conservation des conduites d'arrivée de la source.

Si, dans les profondeurs du griffon, il est assez difficile d'y remé-

¹ Pages 472 à 474.

dier, sauf par un tubage, tout au moins doit-on et peut-on éviter qu'une action du même genre se reproduise dans les cloches du captage et des conduites allant de la source à l'établissement : ce qui arriverait certainement, si on y laissait le mélange de gaz et d'eau sous pression, en présence de coudes dans le profil vertical.

Pour supprimer ces inconvénients, M. Caméré a eu soin, à Châtelguyon, de séparer d'abord l'eau minérale de son excès de gaz en meltant, comme nous l'avons vu précédemment¹, au-dessus de la conduite horizontale destinée à conduire l'eau, des tubulures de dégagement pour les gaz, branchées sur une seconde conduite supérieure. Ces deux conduites arrivent alors séparément dans un réservoir R, servant à l'emmagasinement des eaux minérales. Les figures 80 et 81, page 474, expliquent suffisamment cette disposition, sur laquelle nous n'avons pas à revenir ; mais il nous reste à montrer quelles mesures ont été prises pour régulariser l'écoulement de l'eau minérale entre le réservoir R et la vasque de la buvette V².

Soit G (fig. 139), la conduite amenant l'eau minérale gazeuse au fond du récipient R (où aboutit, d'autre part, la conduite E, dont nous n'avons plus à nous occuper). On remarque, tout d'abord, que nous faisons arriver l'eau gazeuse à la buvette en montant constamment, malgré l'inconvénient de la mettre en charge sur elle-même et, par suite, de réduire son débit. Si nous avions, en effet, des conduites descendantes et à profil sinueux dans un plan vertical, il se produirait, à tous les points hauts du tubage, des accumulations de gaz, amenant des coups de bélier, qu'on ne pourrait éviter qu'en laissant, au moyen d'une soupape manométrique, échapper, à l'occasion, une partie des gaz.

Le réservoir R est en plomb et a 1 m. de hauteur sur 0,60 m. de diamètre. Le tuyau C, qui le fait communiquer avec la cuvette V, y plonge jusqu'à 0,20 m. au-dessus du fond. Un autre tuyau en plomb T, plus petit, partant du haut du réservoir et muni d'un robinet d'arrêt R, conduit également dans la vasque, où il est surmonté d'une pomme d'arrosoir P, de grande surface, percée de trous très fins (fig. 139). Trois tuyaux t^1 , t^2 , t^3 , de petit diamètre, munis chacun, à leur partie supérieure, de robinets, r^1 , r^2 , r^3 , et débouchant : l'un au sommet du réservoir, l'autre au tiers et le troisième aux deux tiers de sa hauteur, furent établis le long d'un mur de l'établissement. Enfin, sur un quatrième tuyau t^4 partant du sommet du réservoir et garni à son extrémité d'un robinet d'arrêt r^4 , fut adapté un double branchement, surmonté, d'un côté, d'une soupape à poids S, et, de l'autre, d'un manomètre de pression M.

Ceci posé, voyons de quelle manière doit fonctionner cet appareil :

Si nous admettons que les robinets A, r^1 , r^2 , r^3 , r^4 , soient fermés, il est

² Toute la suite de cette description est extraite, ainsi que les figures correspondantes, du mémoire de M. Caméré.

facile de comprendre : 1^o que l'eau chargée de gaz, en arrivant de la source dans le réservoir R, y forme deux couches, l'une supérieure composée de gaz seulement, et l'autre inférieure ne comprenant que l'eau saturée de gaz ; 2^o que, pendant que cette dernière alimente la vasque V par le tuyau C, la couche supérieure, par les apports continuels de gaz, augmente peu à peu d'épaisseur, jusqu'au moment où elle atteint l'extrémité inférieure de la conduite C. Une certaine quantité de gaz libre se dégagera alors par la conduite C et, en rendant la colonne d'eau, renfermée dans cette conduite, plus légère, amènera la détente brusque du gaz du réservoir : lequel se précipitera, avec des bouillonnements violents, dans la vasque, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre se repro-

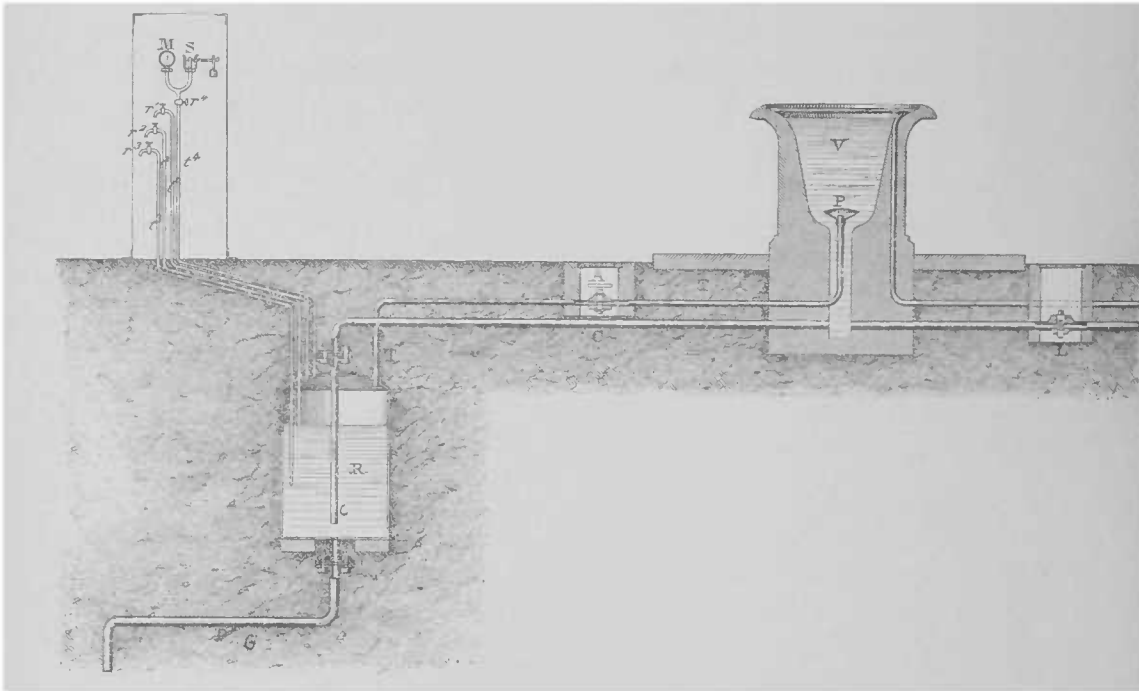


Fig. 139. — Appareil pour régler l'émission des eaux minérales gazeuses (d'après M. Camérad).

Echelle au $\frac{1}{11}$.

V, vasque de la buvette. — P, pomme d'arrosoir à trous très fins. — T, conduite d'arrivée de gaz à la vasque. — A, robinet d'arrêt. — C, conduite d'amenée de l'eau à la vasque. — L, robinet de décharge de la vasque. — p, trop-plein de la vasque. — R, réservoir. — p', conduite d'amenée des eaux de la source. — M, manomètre de pression. — S, soupape de règlement de la pression. — r, r', r'', robinets d'observation. — r', r', r', conduites des robinets d'observation. — r', robinet d'arrêt. — t', conduite du manomètre et de la soupape.

duise ; après quoi, l'écoulement des eaux redeviendra de nouveau calme, pour repasser ensuite par les mêmes périodes d'effervescence. De plus, on comprendra également que, par suite du remplissage et de la vidange alternative du réservoir R, le débit des eaux, dans la vasque V, éprouve des variations, et que le niveau des eaux, dans cette vasque, après avoir atteint un maximum avant l'éruption gazeuse, atteigne un minimum immédiatement après.

Ces effets, dont on se rend compte aisément, comme on le voit, par le rai-

sonnement, ont été vérifiés entièrement par l'expérience directe, et, comme ils sont identiques à ceux qui se manifestent dans les sources non captées, on peut en conclure que l'explication, que nous avons donnée plus haut, au sujet des phénomènes accompagnant le jaillissement de ces sources, est vraisemblablement exacte.

Supposons maintenant que l'on ouvre le robinet A, juste assez pour que le niveau de l'eau dans le réservoir R reste dans le voisinage des deux tiers de la hauteur du réservoir à partir de la base (ce dont on se rendra compte en ouvrant tour à tour les robinets r^1 , r^2 , r^3 , lesquels donneront, soit un jet de gaz, soit un jet d'eau, selon que leurs extrémités inférieures plongeront ou ne plongeront pas dans l'eau ; supposons enfin que le robinet r^4 soit ouvert et la soupape S chargée de manière à être sur le point de s'ouvrir.

Il est facile de saisir que, dans ces conditions : 1° le gaz non dissous, amené de la source par la conduite p^1 , s'accumulera en haut du réservoir et s'écoulera sous une pression constante par la pomme d'arrosoir P, à travers les eaux retenues dans la vasque, auxquelles il communiquera un bouillonnement régulier, beaucoup plus propice qu'un bouillonnement tumultueux à la conservation de la quantité de gaz, dissous ou non, en suspension dans l'eau ; 2° les coups de bélier, pouvant provenir du fait, soit de la source elle-même, soit des travaux de captage, se trouveront bien amoindris par la présence de la soupape S.

C'est ce que l'expérience a permis de vérifier, en montrant qu'il suffisait, pour assurer le jeu régulier de cet appareil, de régler l'écoulement, de temps en temps, par une manœuvre convenable des robinets r^1 , r^2 , r^3 , et du robinet A, afin de tenir compte des variations se manifestant dans le débit des gaz et des eaux fournis par la source.

Reconstitution des eaux minérales au moyen de leurs éléments. — Lorsque les eaux sont amenées, depuis leur émergence jusqu'au lieu d'emploi, par des conduites ascendantes, en dehors des perturbations dans leur marche dues aux coups de bélier, elles ne subissent, en somme, aucune altération notable : leur régime artificiel ne diffère pas beaucoup de leur régime naturel. Mais il n'en est pas de même lorsque les eaux, à partir des captages, doivent être amenées au lieu d'emploi au moyen de conduites descendantes ou à profil en long mouvementé. Dans ce cas, en effet, une grande partie du gaz entraîné dans l'eau, et même, suivant les circonstances, une partie du gaz dissous tendent à remonter vers le sommet des conduites et jusqu'aux captages, où ces gaz gênent l'arrivée des eaux et tendent à s'échapper par toutes les fissures qu'ils peuvent rencontrer.

On est, de plus, souvent obligé, pour arriver à obtenir un écoulement régulier par la conduite d'amenée, et pour éviter les coups de bélier résultant de la marche en sens inverse des eaux et des gaz, de laisser échapper une grande partie de ceux-ci au point de départ de la conduite.

Dans ces conditions, les eaux, à leur arrivée, ont complètement changé de nature au point de vue des gaz qu'elles contiennent, et en renferment, presque toujours, infiniment moins.

C'est à quoi on peut remédier par un appareil très simple, dit régénérateur, dont voici la description (fig. 140) : dans un cylindre C, terminé, d'un côté, par

une partie conique et, de l'autre, par une partie cylindrique d'un plus fort diamètre, se trouve engagé un cylindre *C'* portant, à l'une de ses extrémités, une pomme d'arrosoir conique à trous très fins, et, à l'autre, un tube,

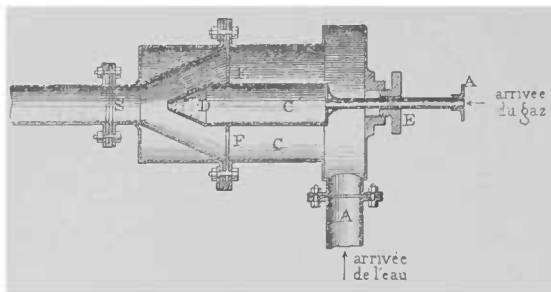


Fig. 140. — Régénérateur pour la reconstitution des eaux minérales gazeuses (d'après M. Caméré).

Echelle au $\frac{1}{22}$.

A, tubulure d'arrivée de l'eau. — A', tubulure d'arrivée du gaz. — C, cylindre parcouru par l'eau. — C', cylindre parcouru par le gaz. — D, pomme d'arrosoir conique. — S, tubulure de sortie de l'eau gazeuse. — E, presse-étoupes. — F, collier pour guider le cylindre intérieur.

traversant un presse-étoupes, monté sur le gros cylindre. Des tubulures sont ménagées, en outre, sur cet appareil : en A, pour l'arrivée de l'eau dans le gros cylindre ; en A', pour l'arrivée du gaz dans le petit, et, en S, pour la sortie du mélange opéré dans l'intérieur de l'appareil. Une double conduite ayant été établie entre cet appareil disposé sur le réservoir d'emmagasinement des eaux minérales et le captage de la source, de manière à

amener l'eau et le gaz séparément aux tubulures A et A', il a suffi, après avoir ouvert le robinet d'arrêt de la conduite de gaz et rapproché, à une distance convenable, les parois des deux portions coniques des cylindres, de laisser l'écoulement des eaux se produire sous pression, en n'ouvrant que modérément le robinet de la conduite d'eau, pour voir sortir, par l'orifice S, une eau absolument émulsionnée par le gaz entraîné.

§ 4. — Transport d'une eau minéralisée corrosive, avec surélévation par des pompes. Installation complète d'une tuyauterie.

Nous prendrons, comme exemple, la tuyauterie de Bourbonne, qui a été minutieusement décrite par M. Rigaud.

Les eaux, obtenues par des sondages décrits précédemment¹, sont amenées, par des tuyaux de cuivre placés dans des galeries, jusqu'à une chambre centrale de distribution, où elles sont réunies et mélangées, de façon à donner un produit régulier et uniforme.

Après de chaque sondage un robinet-vanne permet d'arrêter la sortie des eaux, ou de les forcer à se déverser par un robinet latéral, où il est alors facile de les jauger (fig. 122 et 123, p. 557).

Les galeries ont une largeur de 1 m., avec un caniveau axial entre deux banquettes, au-dessus desquelles la hauteur est de 1,20 m. à 1,50 m. Les

Voir p. 277 et 555.

tuyaux sont placés sur ces banquettes¹, de manière à être à l'abri des eaux s'écoulant par le caniveau et celui-ci peut être recouvert au moyen de grandes briques, ou de petites dalles (fig. 141).

Les tuyaux de cuivre ont des diamètres de 0,065 m. à 0,160 m., calculés de manière à égaliser les pertes de charge sur tout le parcours. Ils sont posés sur des cales en bois, réunis entre eux par des joints en bronze à vis et interrompus, en certains points, pour permettre les mouvements de dilatation. Le jeu des extrémités libres se fait alors dans des manchons en cuivre, dits boîtes à rallonges (fig. 142 et 143), dont les brides renferment des garnitures de caoutchouc. La *chambre de distribution* (fig. 144 et 145) a la forme d'un octogone régulier, recouvert d'une voûte et muni d'une cheminée.

Au centre se trouve la *bâche de distribution* : c'est-à-dire une cuve en cuivre de 1,10 m. de côté, dont un des angles est abattu. Le dessus est fermé par un couvercle, et les parois verticales sont pourvues de 3 vannes. Une cloison intérieure, descendant jusqu'à 0,10 m. du fond, partage la bâche en deux compartiments : l'un de mélange, pourvu de 3 vannes ; l'autre de départ, pourvu de 2 vannes.

Les trois conduites d'arrivée débouchent dans le premier compartiment, où

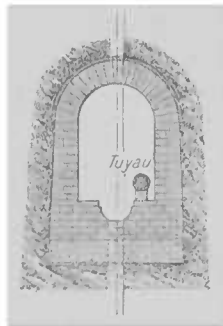


Fig. 141. — Coupe des galeries des sources à Bourbonne (d'après M. Rigaud)

Echelle de 0,0035 pour 1 m.

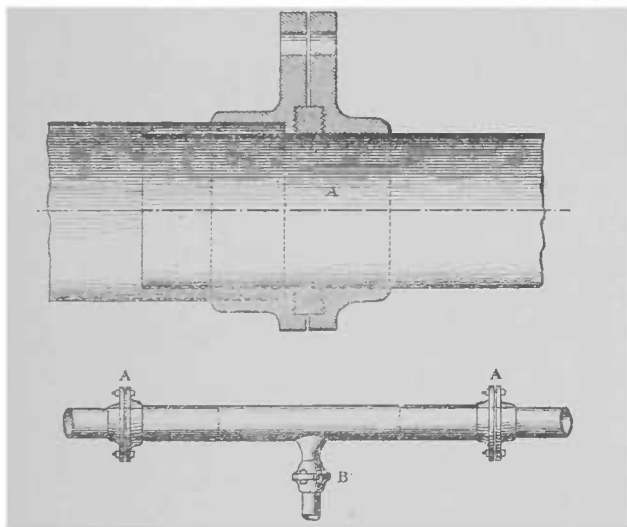


Fig. 142 et 143. — Boîte à rallonge des conduits en cuivre à Bourbonne (d'après Rigaud).

Coupe aux $\frac{3}{10}$. Vue au $\frac{1}{22}$.

A.A, joints à glissière, avec garniture caoutchouc. — B, tubulure.

s'accomplit le mélange de toutes les eaux des sondages ; les eaux passent ensuite ensemble dans le second compartiment, par-dessus la cloison sépara-

¹ RIGAUD. *Loc. cit.*, p. 426 et 526.

tive. Ainsi confondues, elles sont réparties, au moyen de vannes, entre les deux conduites de départ, alimentant : l'une, l'établissement civil ; l'autre,

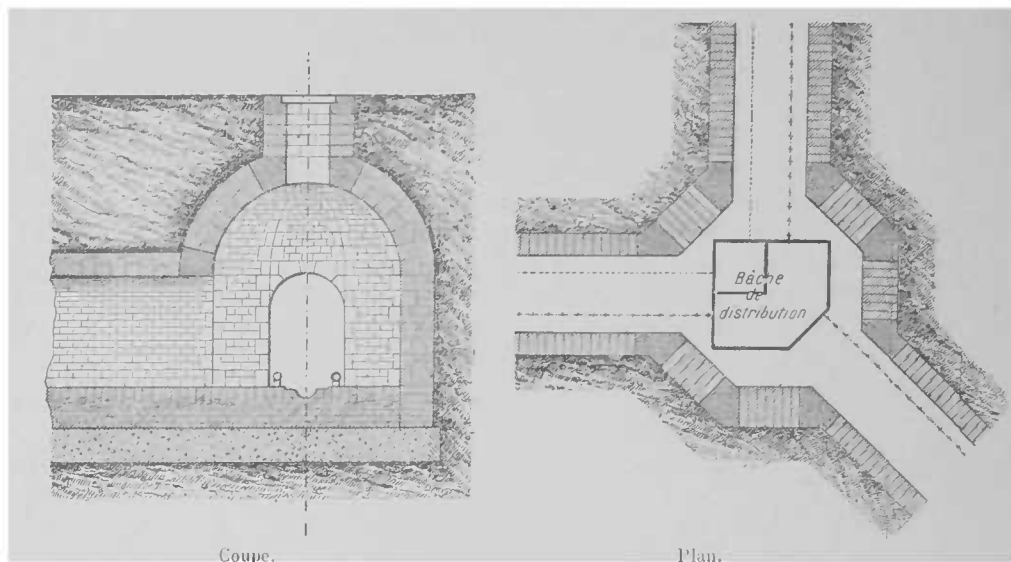


Fig. 144 et 145 — Chambre et bache de distribution à Bourbonne (d'après Rigaud).

Echelle au $\frac{1}{110}$.

l'établissement militaire, dans des proportions réglées après de longues discussions.

Chacune des conduites de départ va alors alimenter un puisard (fig. 146), où l'on puise, au moyen de pompes, pour les besoins de l'établissement.

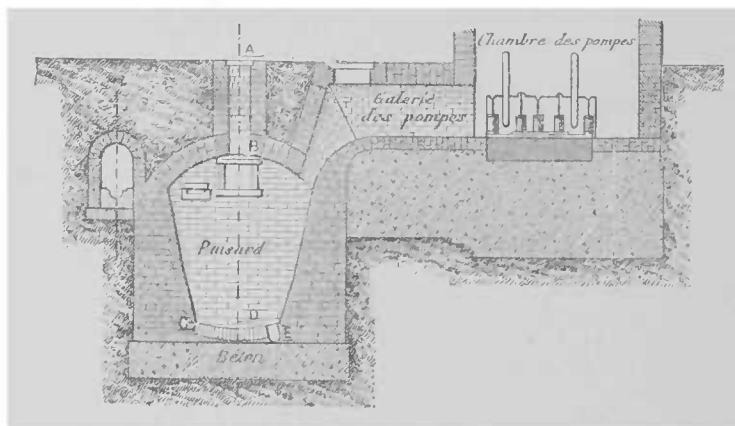


Fig. 146. — Coupe du puisard civil et de la chambre des pompes à Bourbonne (d'après M. Rigaud).

Echelle au $\frac{1}{220}$.

Le puisard civil a une capacité de 200 m³, avec deux cheminées AB à la voûte pour l'aérage et les nettoyages. Son radier CD est composé de briques debout,

posées à bain de ciment et suivant une forme cylindrique légèrement concave. Il repose sur un massif de béton de près de 1 m. d'épaisseur. Une petite cuve E a été ménagée au pied d'une des parois, pour loger l'aspirateur des pompes. Le béton lui-même est posé sur un drainage, formé de moellons calcaires bruts, interposés entre lui et les argiles bariolées sous-jacentes.

L'aspirateur des pompes communique, par un tuyau, avec trois corps de pompes en bronze à piston plongeur, mus par une machine à vapeur. La hauteur d'aspiration maxima est d'environ 6 m. L'eau, chassée par les pompes, passe d'abord par un réservoir d'air en bronze, puis par un robinet-vanne; elle suit alors une colonne d'ascension en tuyaux de cuivre de 0,12 m. de diamètre, interrompue, vers son milieu, par une boîte à rallonge, qui en permet la dilatation. Dans cette galerie d'ascension, elle est, tantôt soutenue à la voûte par des eolliers, tantôt posée sur des tablettes de pierre et appuyée sur des cales en bois, qui en empêchent l'usure par frottement. L'eau est ainsi élevée de 27,50 m. au-dessus du fond du puisard jusqu'aux bassins réfrigérants¹. d'où, après l'avoir ramenée à 40° environ, on la fait redescendre à volonté aux douches, bains et piscines, etc.

§ 5. — *Transport par siphon vers un point, situé à l'aval, par-dessus un obstacle intermédiaire.*

Le *siphon* est couramment employé dans les captages hydrothermaux, quand il s'agit d'amener l'eau d'un griffon, par-dessus un obstacle, à un point d'utilisation, situé plus bas que le point d'émergence : ce qui arrive, en particulier, toutes les fois que la source est captée dans une fosse ou un puits, d'où l'on veut extraire l'eau pour la conduire en aval.

L'usage du siphon est, généralement, des plus simples; il suffit, pour le mettre en marche, d'y faire arriver, au moyen d'un petit tuyau, l'eau d'un réservoir plus élevé. Une fois le courant bien établi, on ferme ce tuyau de secours. Il n'y a de précautions spéciales à prendre que si les eaux minérales sont gazeuses; on peut alors se servir d'un purgeur automatique, semblable à celui d'Uriage.

Nous avons déjà cité, incidemment, l'application d'un siphon à Pfäfers, nous allons commencer par en indiquer une autre à Enghien.

La source des **Roses d'Enghien** est située sur la berge orientale du lac, où elle a été rencontrée, à 5,80 m. de profondeur, par sondage. On a creusé un puits de 2 m. de diamètre, dans lequel on a descendu une cuve en bois de

¹ Voir, plus loin (fig. 151 p. 604), une coupe générale des installations de Bourbonne.

0,50 m. de diamètre en bas, 0,70 m. en haut, en coulant du béton hydraulique au ciment de portland dans l'intervalle. Puis on a enfoncé, dans la cuve, jusqu'au niveau de l'eau sulfureuse, un tube en fer de 0,48 m. de diamètre, dans lequel plonge l'extrémité d'un siphon, menant au réservoir de l'établissement situé en contre-bas. Ce siphon s'amorce au moyen d'une conduite branchée sur un des réservoirs élevés.

A la source Lévy, à Enghien, on a employé un système analogue, en remplaçant la cuve de bois par une cuve de béton de 0,57 m. de diamètre intérieur, reposant sur une couche de ciment de portland, traversée par un double tube en fer.

Enfin, toujours à Enghien, l'épuisement de la source du Lac, dont nous avons décrit plus haut le captage¹, se fait également au moyen d'un siphon.

Le cas d'Uriage est un peu plus compliqué. M. Haton de la

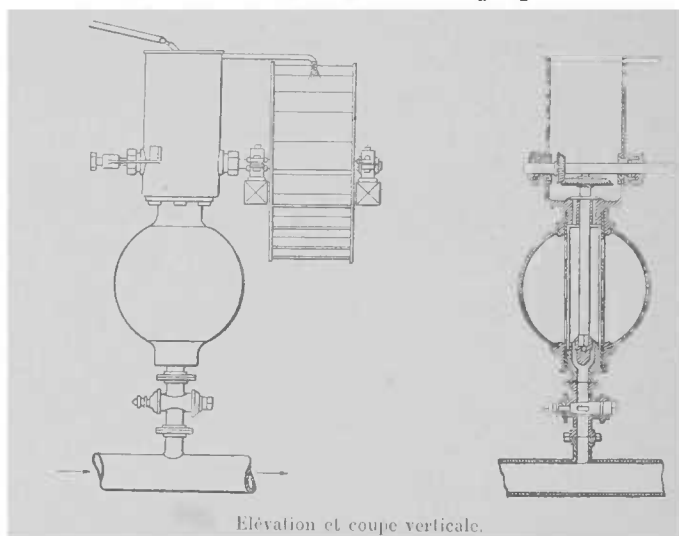


Fig. 147. — Siphon à Uriage (d'après M. Haton de la Goupillière).

Goupillière a décrit² l'emploi intéressant, qui y a été fait du siphon par M. de Saint-Ferréol (fig. 147).

« En vue d'augmenter le débit de la source minérale par l'abaissement de son point d'émergence, on a réavalé de 8 mètres le puits pratiqué dans le calcaire noir à bélemnites. De plus, afin d'éviter de percer pour le rejoindre une nouvelle galerie horizontale, on a profité de celle qui existait déjà au niveau supérieur, sur 3 000 mètres de longueur, pour y établir un siphon, débouchant aux bains, à 17 m. plus bas. Mais il est alors arrivé que la dépression, produite au point maximum, y déterminait le dégagement des gaz

¹ Page 521 et figure 104.

² HATON DE LA GOUPILLIÈRE (*Bull. Soc. d'Encour.*, 3^e, t. III, p. 277 et 1885. *Cours d'exploitation des Mines*, t. II, p. 246).

dissous dans l'eau, en désamorçant fréquemment l'appareil. Cette difficulté a été conjurée au moyen d'un *purgeur automatique*.

Il se compose (fig. 147) d'une sphère creuse, que deux tiroirs circulaires, tournant respectivement autour de ses deux rayons verticaux, mettent en communication successivement avec l'atmosphère, à travers un vase supérieur, ou avec l'intérieur de la tubulure branchée sur le point maximum du siphon, de manière à évacuer les gaz qui encombrant ce dernier. Le mouvement alternatif de ces tiroirs est déterminé automatiquement par une roue à godets non centrée, que son poids rappelle dans une position d'équilibre, mais qui chavire périodiquement par l'action d'un filet d'eau réglé à volonté, à l'aide d'un robinet. Ce courant commence par passer à la partie supérieure du vase, qui surmonte la sphère, de manière à le maintenir toujours plein, malgré ses pertes, employées à remplir, dans la sphère et le siphon, l'espace laissé libre par l'échappement des gaz. Le surplus de ce courant atteint alors la roue et se déverse dans ses godets du côté opposé à celui du centre de gravité. Leur remplissage, en créant un porte-à-faux, détermine le basculement, qui les vide de nouveau et permet à la roue de se remettre en place. -

Enfin, l'on pourrait, dans les pays de montagnes, où l'on dispose d'assez fortes différences de niveau, établir, au-dessus d'un griffon MN, une aspiration par trompe (fig. 148), en adaptant sur la roche une cloche O, où l'on ferait le vide et utilisant la chute AB, comme un siphon amorcé, pour faire monter l'eau de N en M.

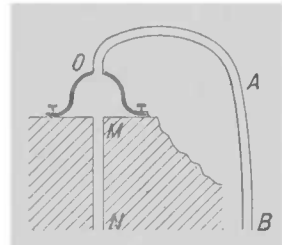


Fig. 148. — Croquis d'une aspiration par trompe.

§ 6. — *Transport de l'eau d'une source vers un point plus élevé que son émergence. Pompes.*

On a, d'une façon générale, dans les captages de sources thermales — et surtout quand ces sources sont gazeuses — intérêt à faire disparaître, le plus possible, les engins élévatoires, tant pour réaliser une économie que pour éviter de modifier profondément les propriétés de l'eau. Mais, par contre, nous avons vu que le moyen le plus simple d'accroître le débit d'une source était d'abaisser son niveau de captage et que le griffon lui-même, étant par définition un point de moindre pression, était toujours un point bas.

En outre, dans un établissement thermal, on a besoin d'avoir de l'eau sous pression, tout au moins pour le service des douches.

Par suite, lors-même que la place ne manque pas à côté de la source pour établir les bâtiments, on peut être conduit à surélever tout ou partie de l'eau pour l'envoyer aux réservoirs.

Cette opération se fait au moyen de pompes, mues : soit à la main, s'il s'agit d'un service temporaire; soit par un moteur hydraulique. dans les pays montagneux, où on a un torrent au voisinage (Lavey en Valais, Schinzach en Argovie); soit par une machine à vapeur (Bourbon-l'Archambault, Nérís, Plombières); soit enfin par une transmission électrique.

Toutes les fois qu'il s'agit d'une eau à gaz libre, on doit proscrire les pompes aspirantes, qui provoquent le départ des gaz et employer une pompe foulante à piston immergé ou plongeur. Quand il s'agit d'une eau à principes fixes, on est libre, au contraire, de choisir un appareil quelconque.

Nous décrirons, comme type, les pompes de *Bourbon-l'Archambault*, où l'on a pris des précautions spéciales pour éviter l'altération du métal de la pompe par l'eau thermale chlorurée et l'ensablement de la crépine d'aspiration par les matières en suspension dans le réservoir de captage. Il s'agit là de remonter l'eau de 27 mètres jusqu'aux bassins réfrigérants.

La machine à vapeur est une machine verticale, à traction directe, d'une force nominale de 13 chevaux, donnant, en réalité, 7 ch. 3 de force disponible sur l'arbre des volants (le travail de la pompe devant être, au maximum, de 4,4 ch. en eau montée).

La pompe 1 (fig. 149 et 150) est à double effet du système différentiel et comprend un corps cylindrique en fonte, avec chemise intérieure en bronze, surmonté d'un réservoir d'air; ce corps porte, à sa base, un système de clapets étagés, qui s'ouvrent du dehors en dedans; à l'intérieur, se meut un piston avec clapets semblables, lié à un plongeur, dont la section est la moitié de celle de ce piston. La tige de la pompe descendant, les clapets intérieurs se ferment, ceux du piston se soulèvent et le plongeur refoule un volume d'eau égal au sien. Dans le mouvement ascensionnel, les clapets intérieurs s'ouvrent, le corps de pompe se remplit et le piston à clapets soulève, en même temps, un volume double de celui du plongeur; mais la moitié de ce volume reste dans le réservoir d'air pour combler le vide laissé par la remontée du plongeur et la colonne d'ascension ne profite, en définitive, que de la différence, c'est-à-dire du volume même du plongeur, qui mesure ainsi la quantité d'eau élevée par chaque oscillation de la machine.

La course de la pompe est de	0,50 m.
Son diamètre de	0,187 —
Correspondant à une section de	0,027485 m ²
Et le nombre de tours par minute de.	30

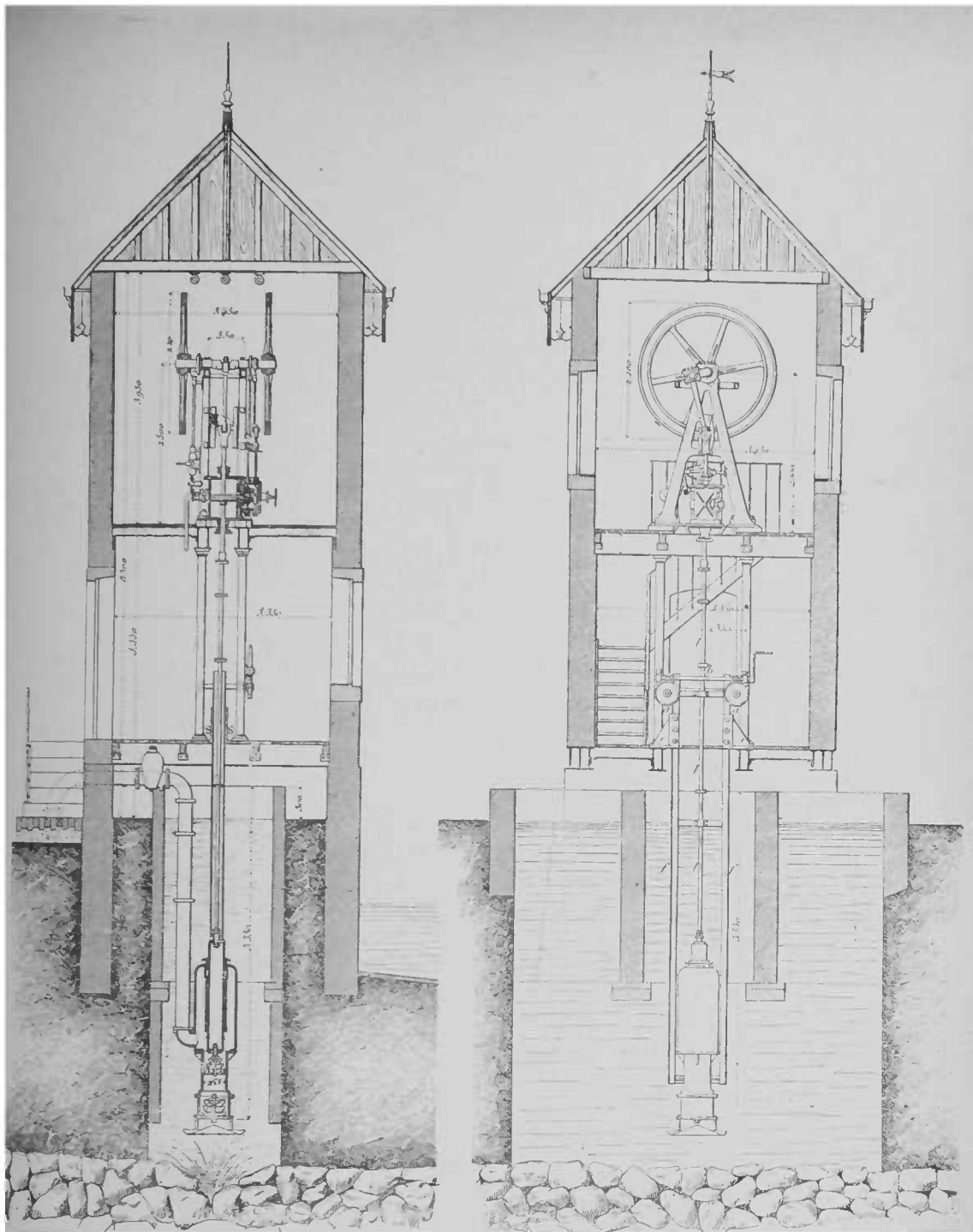


Fig. 149 et 150. — Coupe et élévation du système de pompe adopté à Bourbon-l'Archambault.

Echelle de 8,6 mm. par mètre.

ff, fers à — reliés par des entretoises et formant châssis; ils portent une crémaillère sur toute la longueur et ils sont percés de trous, pouvant recevoir des boulons. Ce châssis supporte la pompe: il sert à la fixer à des hauteurs variables dans le réservoir et à l'en retirer. — *ss*, supports à glissières, auxquels le châssis peut se fixer à l'aide de boulons. — *III*, allonges mobiles du piston, servant à faire varier la hauteur de la pompe dans le réservoir. — *aa*, arbres mobiles dans des paliers fixés aux colonnes; ils portent, en leur milieu, une roue dentée, qui engrène avec la crémaillère du châssis et une autre roue dentée à l'extrémité. — *b*, arbre à manivelle, également fixé aux colonnes, qui porte un double pas de vis sans fin, engrenant avec les roues dentées fixées aux extrémités des arbres précédents. Si l'on enlève les boulons qui fixent le châssis à ses supports, l'une des allonges du piston de la pompe et le coude supérieur du tuyau de refoulement, on peut, en faisant mouvoir cet arbre, monter ou descendre à volonté le châssis et même le mettre complètement hors du réservoir.

Le volume engendré par seconde est donc

$$\frac{0,027485 \text{ m}^3 \times 0,50 \times 2 \times 30}{60} = 0,0137 \text{ m}^3.$$

pour un rendement supposé de 0,011 m³, au maximum, représentant 80 p. 100 du volume réel, et qui reste, par conséquent, dans les limites admises.

La vitesse de la pompe est de $\frac{0,50 \times 2 \times 30}{60} = 0,50$

par seconde, la même bien entendu que celle de la machine à vapeur.

Enfin, la conduite d'ascension ayant 190 m² de diamètre, ou 0,028353 m² de section, l'eau y prend une vitesse de

$$\frac{0,011 \text{ m}^3}{0,0283} = 0,39 \text{ m. par seconde seulement.}$$

Cette pompe est directement immergée dans le réservoir de la source et peut aussi bien marcher noyée dans la masse liquide que hors de celle-ci.

Mobile suivant la verticale à l'aide d'un mécanisme particulier, elle peut se fixer à la hauteur qu'on veut dans le réservoir et même en sortir complètement, pour être réparée dans les intervalles de marche, ou pour être mise en magasin après la saison.

Sa puissance d'élevation est de 13 litres par seconde.

Son tuyau d'aspiration plonge, en général, dans le réservoir à 5 m. de la surface : ce qui correspond à un débit de 864 m³ et laisse la crépine à l'abri des sables fins charriés par la source, ainsi que des gaz dégagés. On aurait pu la descendre de 0,70 m. plus bas, jusqu'au fond même du réservoir ; mais alors il aurait fallu la munir, comme cela a été fait à Nérès, d'un fourreau protecteur, qui aurait eu pour conséquence de faire perdre l'augmentation espérée.

Etant donné le débit, le temps nécessaire pour élever les 200 m³ demandés par l'établissement est de 5 heures 35.

Au corps de pompe est lié un tuyau de refoulement, qui conduit l'eau minérale dans les bassins réfrigérants situés à 27 m. au-dessus de la source, derrière l'établissement¹. Cette conduite a été établie, non en cuivre rouge, comme on eût été tenté de le faire pour éviter l'action corrosive de l'eau, mais en fonte. On a, en effet, remarqué que l'eau minérale, qui ronge les métaux au contact de l'air, est sensiblement sans action sur eux hors de ce contact.

Cette pompe a coûté 4 200 francs, la machine à vapeur 9 500, les chaudières 8 200, la conduite de vapeur en cuivre (85 m. ou 691 kg.), avec gaine en fonte, enveloppe en paille, mise en place etc., 4 500 : soit, en tout, 26 400.

A Plombières, on se trouvait en présence d'un problème analogue ; les bassins réfrigérants ayant été nécessairement placés à un niveau supérieur à celui des sources, il fallait commencer par

¹ Voir plus haut, le plan, fig. 75, p. 468.

remonter les eaux de 26 m. jusqu'à ces bassins : ce qui se fait au moyen de trois pompes à pistons plongeurs, actionnées par une machine à vapeur de huit chevaux. Auprès des pompes sont cachés, sous le sol, deux réservoirs souterrains : l'un, où arrive d'abord l'eau chaude ; l'autre, où elle redescend, une fois refroidie ; les pompes puisent à volonté, soit dans l'un, soit dans l'autre, pour envoyer l'eau chaude aux bassins réfrigérants, ou l'eau refroidie à l'établissement.

Enfin, à **Lavey**, nous avons donné¹ le détail de l'installation des pompes.

¹ Page 571 et figure 134.

CHAPITRE III

RÉFRIGÉRATION OU RÉCHAUFFEMENT DES EAUX

La température, à laquelle l'eau thermale peut être utilisée en bains et en douches, étant comprise entre des limites assez restreintes, il faudrait, évidemment; une circonstance très exceptionnelle pour que ce fût précisément la température de la source au sortir du griffon et, dans la plupart des stations thermales, il faut se livrer, soit à une réfrigération, soit à un réchauffement.

Contrairement à ce qu'on pourrait croire tout d'abord, c'est le premier problème qui est le plus difficile à résoudre et qui nous arrêtera le plus longtemps. C'est, d'ailleurs, peut-être celui qui se pose le plus fréquemment; car, sauf dans le cas des eaux très minéralisées, il est rare qu'on ait eu l'idée d'utiliser en bains une eau qui ne se faisait pas remarquer par une température vraiment anormale.

1° Réfrigération. — La température maxima des bains et douches étant de 40°, tandis que certaines sources thermales sont voisines de 100°, il s'agit de refroidir, parfois, de 20, 30 ou 60° une quantité d'eau importante, sans altérer ses propriétés chimiques et, par suite, en général, sans la mélanger avec de l'eau froide, dans une saison qui est particulièrement défavorable à cette opération, puisque c'est pendant les chaleurs de l'été que les stations thermales sont fréquentées.

Le problème se complique encore du fait que l'eau froide est souvent chose rare dans la ville d'eaux, où l'on est obligé de subvenir à l'alimentation temporaire d'un très grand nombre de baigneurs et où l'on n'a pas toujours la volonté, ni la possibilité d'amener les grandes masses d'eau, qui seraient nécessaires¹

¹ Cette nécessité d'une grande quantité d'eau froide, qui est impérieuse dans une station thermale, s'impose d'autant plus qu'on emploie souvent aujourd'hui des

La solution adoptée est, presque toujours, connexe de celle d'un autre problème, que nous indiquerons en passant plus loin et qui consiste à accumuler des provisions d'eaux suffisantes pour assurer le service régulier des bains.

La réfrigération peut s'obtenir, en principe, par trois procédés principaux, plus ou moins parfaits et plus ou moins convenables suivant les circonstances :

1° Par mélange;

2° Par exposition prolongée à l'air, dans de grands bassins peu profonds ;

3° Par contact avec des tubes ou des serpentins, dans lesquels circulent, soit de l'air froid, soit de l'eau froide (les deux derniers systèmes revenant à l'emploi de la conductibilité).

1° Le *procédé par mélange* est rarement applicable ; car il va de soi que l'on n'ira pas volontairement mêler de l'eau douce avec de l'eau thermale, de façon à en altérer les propriétés. C'est, néanmoins, ce que l'on se trouve faire indirectement, quand on réunit, dans un même bassin, les eaux de plusieurs sources thermales d'une même station, qui ne sont, presque toujours, à une température différente, que parce qu'elles ont été superficiellement mélangées d'une proportion plus ou moins grande d'eau froide.

Il peut, toutefois, arriver exceptionnellement qu'à côté d'une source thermale trop chaude on ait, dans la même localité, une source provenant de la même venue profonde et ayant conservé la même minéralisation, mais s'étant refroidie par suite d'un trajet souterrain plus long, au contact des couches froides de la surface. Tel serait, d'après M. Dru, le cas à Géleznovodsk (Caucase), où les eaux thermales arrivent de la profondeur par les diaclases d'un porphyre pétrosiliceux, tandis que certains de leurs épanchements latéraux se refroidissent, sans immixtion d'eau douce, par circulation sous une couche de travertin, que les eaux elles-mêmes ont anciennement déposé.

Nous avons vu¹ comment on avait capté séparément ces deux

installations hydrothérapiques annexes de l'établissement thermal proprement dit. L'ingénieur, chargé du captage de ces eaux chaudes, a souvent, en même temps, pour tâche d'assurer cet aménagement en eau froide. C'est là, évidemment, un problème, que nous ne pouvons songer à traiter ici en détail. Néanmoins, comme les principes de captage sont, pour la plupart, les mêmes, qu'il s'agisse d'une eau froide ou d'une eau thermale, nous nous sommes trouvé donner incidemment la solution des principaux problèmes qui se posent à cette occasion. Pour plus de détails, on peut consulter un traité d'hydraulique, tel que celui de Bechmann.

¹ Pages 480, 483 et 505.

groupes de sources, les unes à 50°, les autres à 17°; en les mélangeant en proportion convenable, on aura un bain à 34°.

2° Le *procédé par bassins réfrigérants* est, en général, le plus simple, le plus économique et, par suite, le plus fréquemment adopté. Il présente parfois quelques difficultés.

La première tient à la disposition du sol autour des sources; les sources thermales étant, en général, situées dans un fond, soit le long d'un cours d'eau, soit au pied d'une colline, il pourra arriver que l'on manque de place; comme, d'autre part, on a un double avantage à placer les bassins à une certaine hauteur, tant pour disposer d'une pression pour le service des bains et des douches que pour les soumettre à une action plus énergique du vent, on choisira, volontiers, un emplacement situé sur le flanc d'un coteau voisin, à 10 ou 20 m. au-dessus des bains et l'on y enverra l'eau au moyen de pompes. Telle a été la solution adoptée à Bourbon-l'Archambault, Nérès, etc.

En second lieu, la conductibilité de l'eau étant faible, si l'on ne renouvelle pas les surfaces en contact avec l'air, on aura besoin, surtout dans la saison chaude d'été, qui est, comme nous le remarquons tout à l'heure, la saison thermale, d'un temps très long pour le refroidissement et l'on pourra être exposé à manquer d'eau tiède pour le service des bains. On sera alors conduit à adopter des bassins de grande superficie et de très faible profondeur et surtout à renouveler plusieurs fois les surfaces exposées à l'air, en faisant passer l'eau successivement dans deux ou trois bassins réfrigérants juxtaposés, mais distincts, par un orifice étroit.

Enfin, il existe toute une catégorie d'eaux, pour lesquelles le séjour prolongé dans ces bassins entraînerait des altérations profondes: ce sont les eaux à éléments instables, comme les sulfurées, les ferrugineuses, ou encore les eaux chargées d'un excès de gaz, que l'on est alors forcé de refroidir, comme nous le dirons, au moyen de tubes ou de serpentins.

Donnons, d'abord, quelques exemples de bassins réfrigérants:

Bourbon-l'Archambault ¹ (Allier). — A Bourbon-l'Archambault, les bassins réfrigérants, construits par M. de Gouvenain en 1882, et situés à 18 m. au-dessus de la source, sont au nombre de trois, ayant chacun 200 m² de superficie et 1 m. de profondeur, avec un premier réservoir voûté, d'une contenance de 50 m³ (fig. 75, p. 468).

1888. L. DE LAUNAY. *Mém. sur Bourbon-l'Archambault* (Ann. d. M., mai 1888, p. 55).

L'eau commence par arriver dans ce réservoir, qui est constamment plein, et d'où elle redescend, par une conduite, aux robinets des piscines et de douches. La température, dans ce réservoir, n'est inférieure que de 1° à celle des sources.

De là, l'excédent d'eau se déverse dans les trois bassins de réfrigération, munis de vannes de bronze, de manière à les faire communiquer entre eux, ou avec l'établissement. L'expérience a montré que, même dans la plus forte chaleur, il suffisait d'un séjour de cinquante heures dans ces bassins pour ramener l'eau à une température de 29 à 30°, convenable pour le service des bains.

Il est facile de se rendre compte que, dans ces conditions, les trois bassins sont largement suffisants. En effet, chacun d'eux peut être rempli le soir même du jour où il est vide. D'autre part, la dépense journalière de l'établissement est d'environ 200 m³, soit le contenu d'un bassin. Par suite, le tour de chaque bassin ne revient au minimum qu'au bout de deux jours, c'est-à-dire, en moyenne, toutes les 50 ou 60 heures.

Étant donné le débit, la durée du remplissage est de 1 heure 35 environ.

Les travaux de maçonnerie pour ces réservoirs ont coûté 2 000 francs; l'établissement de la conduite de fonte qui y refoule l'eau sur 156 m. de long à coûté environ 4 000 francs.

Néris (Allier). — A Néris, on s'est contenté longtemps de bassins réfrigérants, remplis par l'écoulement naturel de la source et pouvant alimenter de même les baignoires et les piscines. Ces bassins, au nombre de 6, représentaient une surface totale de 626 m² et une capacité de 790 m³. Outre qu'ils étaient à un niveau trop bas pour servir aux douches, ils donnaient trop peu d'eau refroidie. En 1865, on construisit, sous la direction de M. de Gouvenain, sur une terrasse assez élevée à l'ouest de l'établissement, quatre bassins réfrigérants de 250 m² de superficie et 1 m. de profondeur, au voisinage desquels on plaça une machine à vapeur, destinée à élever l'eau de la source, qui, une fois refroidie, redescend aux bains et aux douches.

Bourbonne-les-Bains. — A Bourbonne, le mode de réfrigération est analogue à celui de Néris et de Bourbon. La figure 151 montre, en coupe longitudinale, la disposition générale des installations dans cette station thermale¹.

A 18 m. au dessus de l'établissement, on a, sur le sol arasé, placé une couche de béton de 0,30 m. d'épaisseur et une seconde couche de même épaisseur en maçonnerie de moellons; puis, sur cette couche, on a élevé des bassins réfrigérants, garnis intérieurement en ciment de Grenoble, avec soupapes pour les nettoyages, comme pour les prises d'eau: bassins de 400 m² de surface sur 1 m. de profondeur.

Ces bassins sont divisés par trois petits murs en quatre compartiments. Chacun d'eux présente deux ouvertures sur sa face nord. L'une d'elles, de 0,05 m. de diamètre, fermée habituellement par un tampon de bronze, vissé dans un écrou scellé dans la maçonnerie, sert à la vidange et aux nettoyages. La seconde est un trou horizontal, à garniture de bronze, de 0,20 m. de diamètre,

¹ RIGAUD (*Ann. d. M.*, 1880, t. XVII, p. 432 et 530).

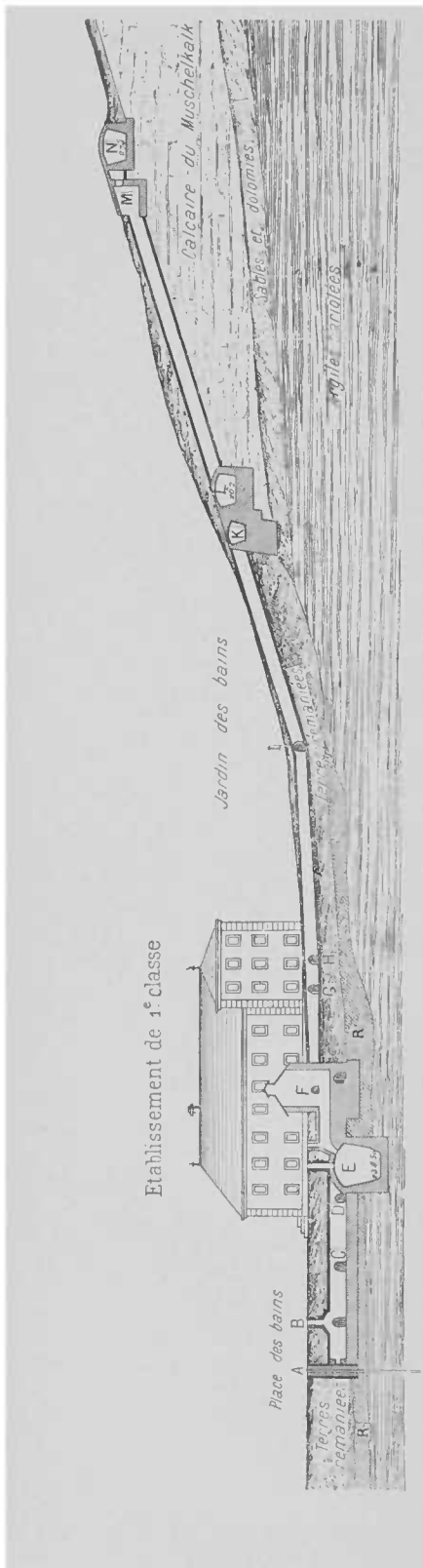


Fig. 131. — Coupe générale N.S. à Bourlonne (d'après M. Rigaud, 1880).

Echelle de 0,00075 m. pour 1 m.

A, sondage n° 12. — B, chambre de distribution. — C, entrée de l'aqueduc. — D, galerie du sondage n° 41. — E, puisard civil. — F, chambre des pompes. — G, H, I, galeries de distribution. — K, hâche des douilles faibles. — L, réservoir des eaux douces. — M, chambre des distributeurs. — N, réservoirs du coteau. — R, fondation romaine.

muni d'une soupape conique de même diamètre. Une grenouillère de cuivre, à trous très fins, entoure la soupape, et celle-ci est mue par une longue tige filetée, en bronze, manœuvrée par une clef mobile. Ce système permet de faire communiquer séparément chaque compartiment avec un gros tuyau de grès de 0,20 m. de diamètre, enterré horizontalement, qui conduit au distributeur des eaux refroidies.

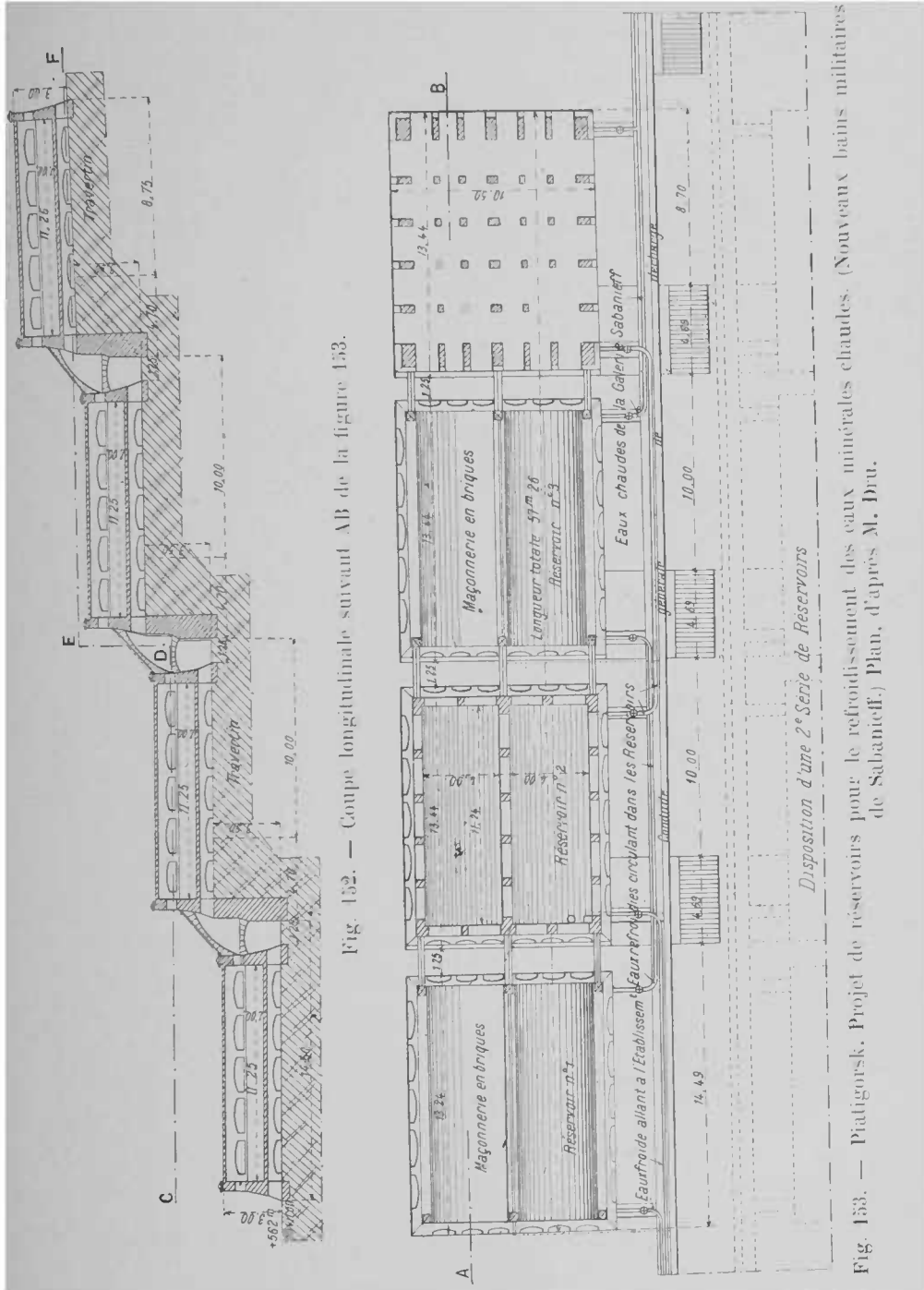
Piatigorsk (Caucase)¹ — A Piatigorsk, M. Dru a étudié divers projets de bassins réfrigérants, que nous allons décrire successivement. Les figures 152 et 153 représentent, en plan et coupe longitudinale, la disposition proposée pour les nouveaux bains militaires de Sabanieff.

Il s'agissait là de fournir de l'eau pour cinquante baignoires, renouvelées chaque demi-heure, pendant douze heures de balnéation, à raison de 300 lit. par baignoire : soit 360 000 lit. d'eau à 34°, que l'on obtient par mélange de moitié eau à 46° et moitié eau refroidie à 22°. Ce qui revient à réfrigérer et emmagasiner dans des bassins 180 000 litres d'eau pendant 24 heures environ, pour avoir un abaissement de 24° dans la température de l'eau. Comme il était bon de laisser les bassins vides 8 à 10 heures pour laisser refroidir les maçonneries, on a, pour obtenir largement l'eau nécessaire, doublé dans les évaluations le cube ainsi calculé.

La nécessité d'avoir de grandes surfaces a conduit à construire des réservoirs peu profonds, pouvant se vider les uns dans les autres et développant, sous de faibles épaisseurs de maçonnerie, le plus de surface possible de refroidissement. Le plan montre la disposition

¹ 1884. DRU. *Rapport sur les eaux minérales du Caucase* (p. 30 et pl. XIII).

des quatre réservoirs accouplés deux à deux : le n° 3 se déverse dans le



n° 1, lorsque la température est abaissée et il reste vide, pour se refroidir à son tour, pendant que le n° 1 est en charge et affecté au service des bains;

les deux autres, les n^{os} 2 et 4, ont les mêmes fonctions. Ainsi, quand l'eau des bains supérieurs est refroidie, elle est dirigée dans ceux du bas, puis distribuée à l'établissement balnéaire ; la première série est ensuite laissée vide,

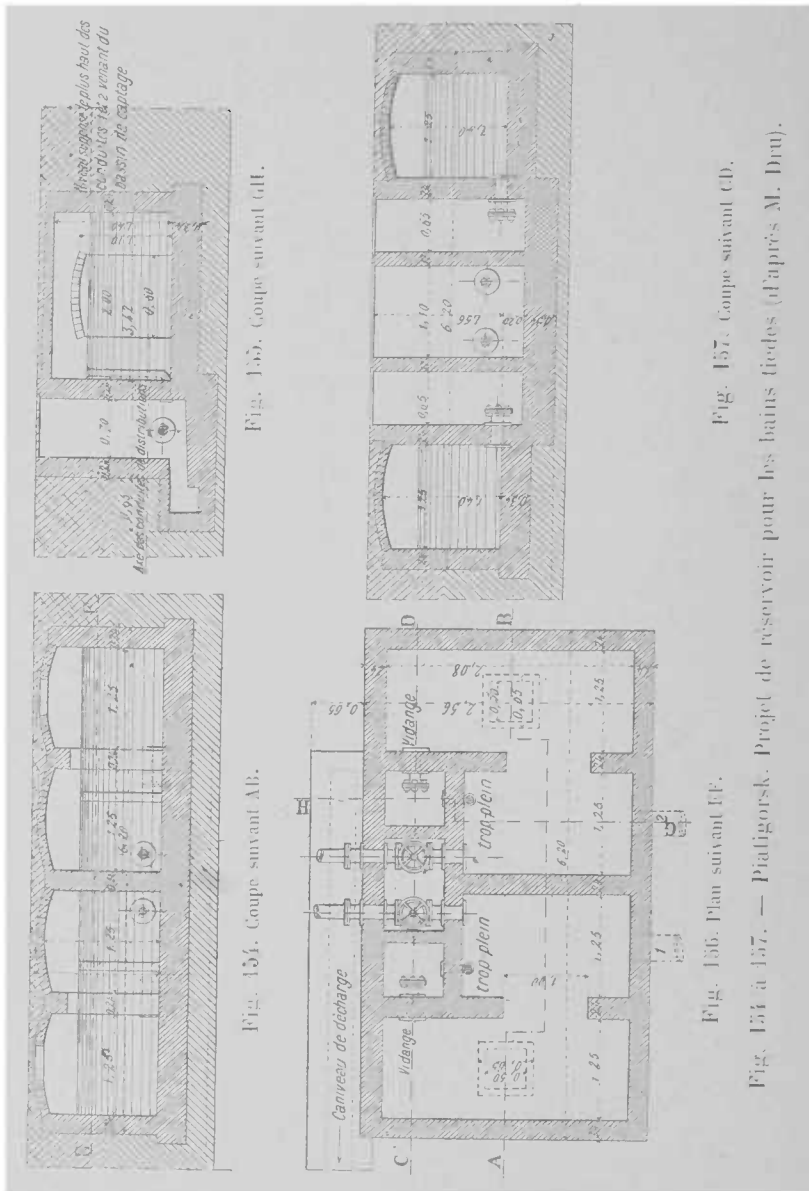


Fig. 155. Coupe suivant GH.

Fig. 154. Coupe suivant AB.

Fig. 157. Coupe suivant CD.

Fig. 156. Plan suivant EF.

Fig. 154 à 157. — Piatigorsk. Projet de réservoir pour les bains tièdes (l'après M. Dem).

jusqu'à ce que la température intérieure de l'ensemble de la construction soit suffisamment diminuée pour recevoir un nouveau remplissage.

Les conditions sont, d'ailleurs, favorables à Piatigorsk où le climat est continental, avec des écarts de température très élevés.

On a proposé, si l'on voulait activer le refroidissement, d'entraîner les vapeurs à la surface des réservoirs par le tirage d'une cheminée d'appel ; mais le calcul montre aussitôt que la réalisation de cette idée nécessiterait la circula-

tion d'un volume d'air énorme; il faut, en effet, 0,970 m³ d'air, pour entraîner, à l'état de vapeur, 3 gr. d'eau; d'où, pour soulever aux 180 000 l. 3 780 000 calories (pour abaisser leur température de 21°). 2 085 500 m³ d'air à mettre en mouvement par dix heures.

Les figures 154 à 157 montrent, dans la même station de Piatigorsk, un autre projet de réservoirs pour les bains sulfureux tièdes, calculé de façon à alimenter vingt baignoires.

Lippik (près Pest)¹. — A Lippik, près Pest, l'eau, obtenue par un sondage, a également besoin d'être refroidie. On en fait alors tomber une partie dans un bassin découvert de 48,60 m. de diamètre et 151,60 m³ de capacité et, pour le service des bains, on mélange l'eau chaude avec l'eau refroidie dans les proportions convenables.

Des systèmes analogues sont employés à Wiesbaden, Teplitz, Karlsbad, etc.

A **Teplitz**, on a, pendant longtemps, employé simplement de grands récipients de bois, où l'eau restait exposée au contact de l'air. Vers 1835, on a installé, sur une hauteur, un réservoir de 0,80 m. de profondeur, où l'eau, remontée de la source au moyen d'une roue, commençait par tourner, contre la paroi, dans une rigole spiraloïde avant d'arriver au fond².

A **Gastein**, le réservoir du Bade-Schloss (de 80 m³) est constitué par deux puits concentriques, le puits intérieur recevant l'eau des conduites et la laissant déborder dans le bassin extérieur.

On règle la température des bains à volonté, au moyen de deux réservoirs à 44° et 25°.

3° La réfrigération par contact avec un circuit (tubes, serpentins, etc.) d'air froid ou d'eau froide peut s'employer dans des conditions plus ou moins complexes. Le circuit d'eau froide est évidemment préférable; mais il arrive, bien souvent, dans les stations thermales, que l'eau froide fait défaut et l'on peut alors se contenter d'air froid.

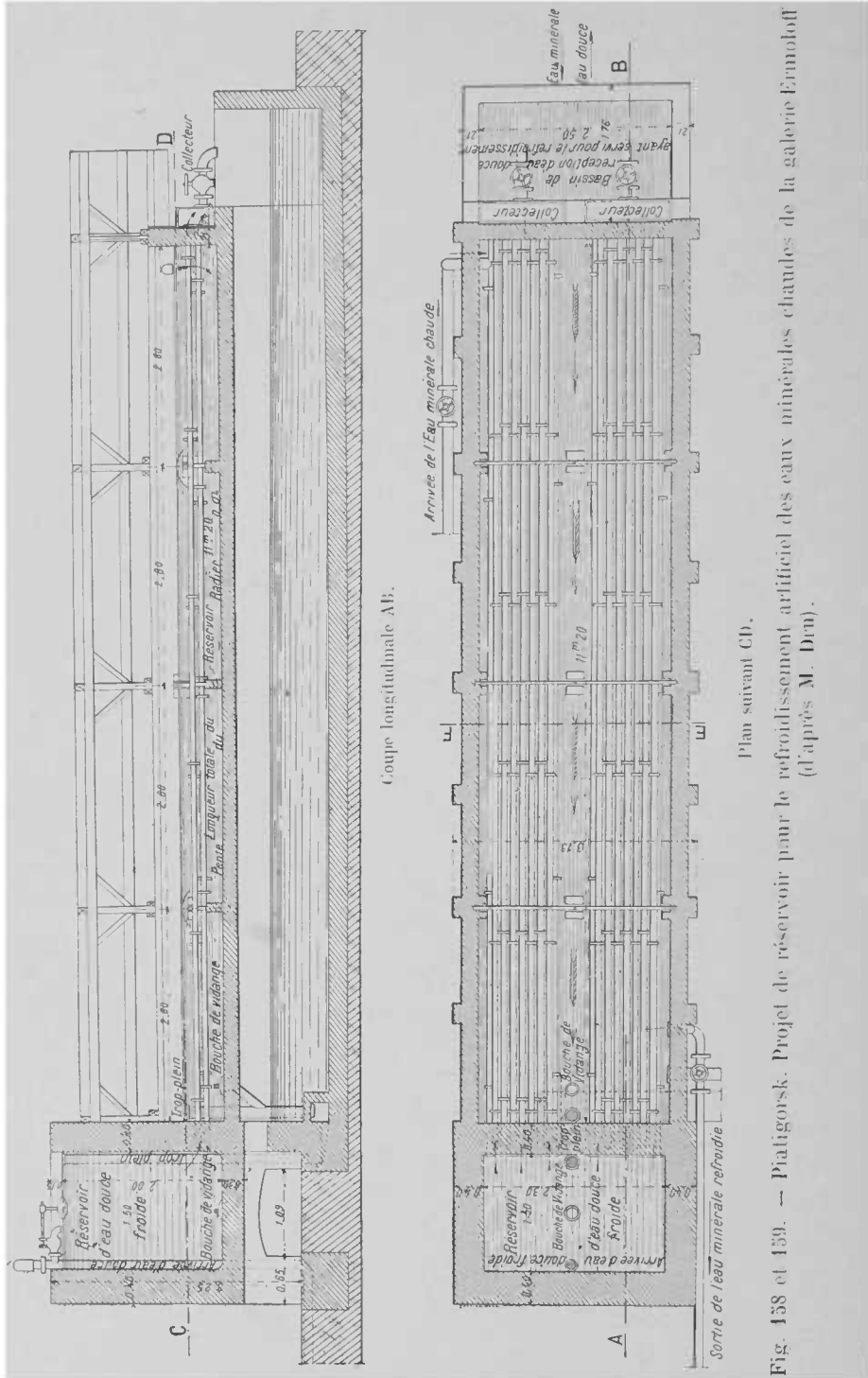
Ce mode de réfrigération, qui s'applique dans des caisses fermées, soustraites au contact de l'air, est tout indiqué pour les eaux sulfureuses, ferrugineuses ou gazeuses, qui s'altéreraient dans des réservoirs à l'air libre.

La nature du serpentín varie selon les eaux. Avec les eaux chlorurées, le cuivre rouge convient bien; le fer émaillé ou le plomb étamé peuvent servir pour les sulfureuses. Le zinc pur, quand les eaux en question ne l'altèrent pas trop vite, a l'avantage d'être économique.

A **Teplitz**, Költreuter avait simplement proposé d'installer, dans les bassins

¹ 1873. ZSIGMONDY, *Mittheil. über die Bohrthermen zu Harkany* (Pest), p. 79. Voir plus haut, p. 563.

² REUSS, *Teplitz*, p. 155.



réfrigérants, des tubes de terre cuite, où l'on établirait un courant d'air rapide.

A **Plombières**, M. Jutier¹ a installé, en 1862, dans un encaissement ménagé à l'intérieur de l'aqueduc, qui amène l'eau chaude, un système de tuyaux de cuivre horizontaux de petit diamètre, engagés par leurs extrémités dans deux plaques de cuivre, comme les tubes d'une locomotive. A cet encaissement aboutit, d'autre part, une dérivation du torrent voisin, l'Eaugrogne. Au moyen d'un simple jeu de vannes en bois, l'eau minérale peut aller directement à son réservoir, ou traverser les tubes de cuivre de l'appareil réfrigérant, baignés par un courant d'eau froide en sens inverse et l'on peut régler l'intensité de l'action réfrigérante en agissant, au moyen de vannes, sur la prise d'eau froide.

A **Bourbonne**, on a installé un système de réfrigération artificielle, consistant en une auge à circulation d'eau froide, contenant 43 tuyaux de cuivre de 8 m. de long, disposés sur trois rangs en quinconce.

Ces tuyaux avaient 0,01 m. de diamètre intérieur et 0,04 m. d'écarte-

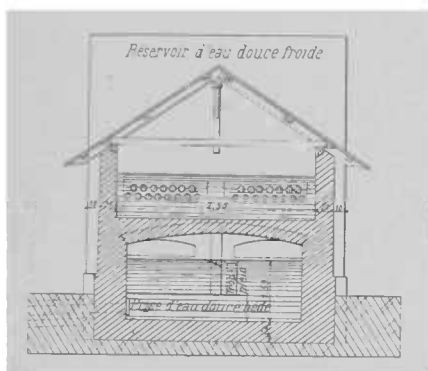


Fig. 160. — Coupe suivant EF du réservoir de Piatigorsk (fig. 158 et 159).

ment. Ils aboutissaient à deux boîtes : l'une, où arrivait l'eau chaude dans un sens ; l'autre, par où partait l'eau refroidie, le sens du courant d'eau chaude étant naturellement inverse de celui d'eau froide.

A **Piatigorsk**, M. Dru² a proposé, en outre des systèmes indiqués plus haut, une réfrigération par circulation d'eau froide, à l'aide d'une disposition mixte de réservoirs en maçonnerie et de tuyaux à mince paroi en fer émaillé, ou peut-être en cuivre nickelé. L'emploi de l'émaillage ou du nickelage a pour but d'empêcher l'altération toujours rapide des métaux par les eaux sulfureuses.

Il s'agit d'obtenir, en 12 heures, environ 240 000 l. d'eau refroidie à 21° avec de l'eau à 46°, c'est-à-dire d'enlever en 12 heures cinq millions de calories, ou 115 calories par seconde : ce qui exige la circulation, pendant ce même temps, de 260 000 l. d'eau froide à 14° et fixe à 84,40 m² la surface de l'appareil réfrigérant, dont les figures 158 à 160 montrent la disposition.

Dans tous ces appareils, on fait, en somme, passer l'eau à refroidir dans un serpentin métallique, immergé dans une caisse, où circule, en sens contraire, un courant d'eau froide.

On peut encore disposer un serpentin le long d'un radier en pente forte, ou

¹ *Etude sur Plombières*, p. 68.

² *Mém. sur le Caucase*, p. 31 et pl. XIV.

mieux en gradins étagés, noyé par un courant descendant d'eau froide. L'eau froide se divise à chaque gradin, qui produit une cascade et sa division amène, avec une vaporisation active, un refroidissement plus énergique. Si on en a le moyen, il est bon de faire, sur la longueur du radier, s'échapper et se renouveler plusieurs fois l'eau froide.

Ce sont des dispositions de ce genre que M. François a employées à *Amélie-les-Bains* pour obtenir, avec de l'eau sulfureuse à 63°, de l'eau froide à 25°, sans altération du principe sulfureux.

A **Amélie-les-Bains**, l'eau thermale est conduite de la source à l'établissement, sur 380 m. de long, dans des canaux de 0,10 m. de diamètre, taraudés dans des poutres en sapin, injectées de chlorure de zinc, recouvertes d'un enduit bitumineux et enduites à l'intérieur d'une couche de 0,04 m. de ciment de Vassy. Vers le tiers de sa course, l'eau se divise en deux conduites, dont l'une, munie d'un robinet, qui permet d'en régler à volonté l'écoulement, communique avec un serpentín réfrigérant.

Ce serpentín est constitué par un tuyau de plomb de 0,08 m. de diamètre, se repliant trois fois sur lui-même, sur une étendue de 100 m. et sur lequel passe, avec une grande vitesse, une masse d'eau froide, qu'au moyen d'un barrage on renouvelle deux fois dans son parcours. On abaisse ainsi la température de 61° à 23°; puis, si on veut avoir de l'eau à une température intermédiaire, on fait serpenter cette eau refroidie, sur un parcours plus ou moins long, dans un tuyau de plomb de 0,05 à 0,06 m., au milieu du réservoir d'eau chaude.

A **Ax**, on utilise, de même, un serpentín pour la réfrigération d'une eau sulfureuse.

Il faut, pour qu'un serpentín soit bien établi, qu'il ait un calibre bien égal, de manière à être constamment rempli d'eau, sans pénétration d'air qui altère les sulfures et, notamment, que l'orifice de sortie ne soit pas plus grand que l'orifice de l'entrée. La pente doit être suffisante pour permettre un écoulement facile et, néanmoins, assez faible pour que le parcours de l'eau chaude, c'est-à-dire son contact avec l'eau froide, soit prolongé. Enfin, la réfrigération doit se faire, autant que possible, par de l'eau courante.

2° Réchauffement. — Un réchauffement est nécessaire pour toutes les eaux dont la température n'atteint pas 35°, telles que Enghien, Bagnoles, Vichy, Salies, Schinznach, etc.

Il est à peine besoin de signaler l'inconvénient de cette opération, qui altère la composition des eaux, provoque des dépôts, dégage les gaz, etc. On a essayé parfois de la pallier en produisant un mélange très rapide avec de l'eau douce, préalablement chauffée à haute température; mais, le plus généralement, on emploie un serpentínage à la vapeur ou à l'eau chaude. En tout cas, la caléfaction à feu nu doit être proscrite pour ses nombreux défauts, sur lesquels il est inutile d'insister.

On a encore tenté de chauffer l'eau dans de grandes caisses en tôle, hermétiquement fermées, au centre desquelles passait un tuyau

de vapeur ; quelquefois même, on a envoyé des jets de vapeur dans l'eau minérale elle-même.

Enfin, dans certaines stations thermales, tant pour dissimuler cette nécessité d'un réchauffement que pour donner à ceux qui la constateraient l'illusion d'un calorique plus comparable à celui de la terre, on a placé, sur le griffon même, un système de tubes de métal, pénétrant aussitôt dans un milieu artificiellement chauffé (Cannstadt).

CHAPITRE IV

CONSOMMATION D'EAU D'UN ÉTABLISSEMENT THERMAL. — UTILISATION DES SOURCES THERMO-MINÉRALES SOUS DES FORMES ACCESSOIRES : EAUX PULVÉRISÉES, BUÉE, SELS ÉVAPORÉS, BOUES, CONFERVES, ETC.

Quand l'eau thermale a été captée et amenée à l'établissement thermal, sous la forme et à la température demandées par le service médical, le rôle de l'ingénieur cesse, comme nous l'avons dit, et nous pourrions également terminer ici cet ouvrage. Néanmoins, quelques renseignements tout à fait sommaires sur l'utilisation des eaux pourront être utiles, ne fût-ce que pour l'étude même du projet de captage.

Le premier point est évidemment de savoir la quantité d'eau que nécessitera le service.

Cette quantité d'eau dépend : 1° de la consommation par bain, douche, etc. ; 2° du nombre de bains, douches, etc., que l'on peut être appelé à donner.

En moyenne, on admet une consommation de 250 à 600 litres d'eau par bain ou douche, suivant la dimension donnée aux baignoires : dimensions qu'on a une tendance à accroître progressivement¹ ; mais il est évident que cette consommation devient beaucoup plus élevée, lorsqu'on établit, comme dans certaines stations alpestres à gros débit (Ragaz, etc.), un courant continu dans les baignoires.

Par exemple, à Bourbon et Nérès, on a calculé : 550 litres par bain ; 535 par grande douche fonctionnant à plein jet ; 267 par

¹ *Dictionnaire DURAND-FARDEL* ; articles *Baignoire, Cabinets de bain, etc.* La baignoire simple a 1,30 m. à 1,45 m. de long, 0,48 m. à 0,62 m. de large, 0,55 m. à 0,65 m. de haut, et sa capacité est de 250 à 280 litres. On emploie des baignoires en zinc fort, en cuivre étamé, en fonte émaillée, en marbre, en pierre ; des baignoires piscines en carreaux de faïence, etc. Nous avons estimé, page 203, l'unité balnéaire moyenne à 333 litres.

douche réduite à moitié, comme cela a lieu en pratique; 194 litres par petite douche sous-marine.

A Bourbon également, on a établi des piscines, mesurant 54 m² de surface et 75 m³ de capacité, avec une profondeur croissante d'une extrémité à l'autre, entre 0,60 m. et 1,20 m. On peut régler le débit des piscines, de manière à assurer à chaque baigneur la même quantité d'eau nouvelle que dans un bain particulier.

Le nombre de bains à donner est aussi variable que possible d'une station à l'autre. D'après une statistique officielle, nécessairement très inexacte en raison de son objet, on aurait eu, dans la même année, les nombres suivants de malades dans diverses stations françaises :

Bagnères-de-Bigorre, 16,697 ; Cauterets, 15,371 ; Dax, 10,499 ; Vichy, 9,692 ; Aix, 6,500 ; Royat, 5,050 ; la Bourboule, 5,000 ; Evian, 4,325 ; Mont-Dore, 4,049 ; Ax, 3,700 ; Barèges, 3,654 ; Vals, 3,525 ; Luchon, 3,370.

La quantité d'eau à dépenser par jour permet de calculer la réserve à faire pendant la nuit pour ne pas être arrêté pendant le service. En tenant compte, s'il y a lieu, du temps nécessaire au refroidissement, on peut en déduire le volume à donner aux réservoirs.

Dans certaines stations à faible débit et très fréquentées, on a dû se préoccuper d'emmagasiner à l'avance, pour la saison thermique, qui ne dure que quatre mois, une partie de l'eau perdue pendant les huit autres mois.

En pareil cas, s'il s'agit d'eaux altérables, on peut employer des réservoirs surmontés d'un gazomètre, afin d'éviter le contact de l'air¹

Indépendamment des bains et douches, on utilise souvent l'eau thermale sous un certain nombre de formes accessoires, que nous allons rapidement signaler².

Vapeurs spontanées et pulvérisation pour l'inhalation. — Il est facile d'obtenir la pulvérisation de l'eau. Il suffit de la faire arriver, sous une pression convenable, par un tuyau, à l'extrémité duquel

¹ Pour la construction des réservoirs, on peut consulter BECHMANN, *Distributions d'eau*, p. 274 à 297. On trouvera, dans le même ouvrage, des renseignements sur les conduites.

² Sur l'installation des établissements, voir *Dictionnaire DURAND-FARDEL et FRANÇOIS*; articles *Appropriation, Cabinets de bains et de douche, Piscine*, etc.

elle rencontre un cône rentrant, sur la surface duquel sont pratiquées des rainures capillaires. L'eau minérale, ne trouvant d'autre issue que ces rainures, se divise en autant de jets capillaires, qui viennent se briser à l'extérieur sur des disques et se réduisent en poussière aqueuse, qui se répand, comme un nuage, dans l'atmosphère de la salle.

On utilise également des vapeurs spontanées, dégagées par les réservoirs des sources : ainsi à Saint-Honoré, au Mont-Dore, etc., où des salles d'inhalation existent au-dessus des réservoirs. Il faut, dans ce cas, régulariser l'émission des vapeurs ; on opère, à Saint-Honoré : soit par la division de l'eau sous pression, ou dans une roue mue par l'eau elle-même ; soit par sa chute en cascades.

Enfin, l'on attribue un rôle notable à la buée dégagée par certaines eaux et l'on a vu parfois les effets d'une station thermale se modifier notablement après la construction d'un nouvel établissement plus confortable, où les cabinets de bains, trop vastes et trop aérés, ne permettaient plus cette action de la buée¹.

Sels évaporés. — Diverses stations thermales expédient au loin des sels obtenus par l'évaporation de l'eau minérale : sels vendus, soit à l'état naturel, soit en mélange avec du sucre, de la gomme adragante et diverses substances parfumées.

On peut citer, en premier lieu, Vichy, où, dès 1830, Darcet eut l'idée de saturer du carbonate neutre de soude du commerce par l'acide carbonique spontané des sources, pour obtenir des pastilles de bicarbonate.

Depuis 1855, on fait en grand l'évaporation des eaux, pour obtenir de véritables *sels de Vichy*, extraits de ces eaux².

La méthode, qui s'est perfectionnée peu à peu, et qui exige toujours un tour de main assez délicat pour bien réussir, consiste à concentrer peu à peu l'eau dans une série de chaudières, munies de cheminées d'aspiration ; après quoi, on amène la liqueur dans des cristallisoirs, où elle reçoit des gaz spontanés dégagés par les sources et où le carbonate de soude, amené à saturation, précipite.

Suivant la façon dont on conduit l'opération, on peut obtenir des produits de composition assez sensiblement différente.

Voir *Dictionnaire* DURAND-FARDEL, articles *Buée* et *Inhalations*.

² DURAND-FARDEL, articles *Pastilles* et *Vichy*.

Utilisation des boues ¹ — Les boues minérales (*Mineralmoore* des Allemands), déposées ou simplement imprégnées par les eaux thermales, sont utilisées dans nombre de stations : à Dax, à Uriage, à Bourbonne, à Balaruc, à Aix et à Saint-Amand en France et, plus souvent encore, à l'étranger : à Franzensbad, Karlsbad et Teplitz, en Bohême ; à Elster, Salzungen, Radeberg, Marienberg, en Saxe ; Gleissen et Muskau, en Prusse ; Meinberg, dans l'Allemagne septentrionale ; Neustadt et Toplicka, en Croatie ; Loka, en Suède ; Acqui et Valdieri en Piémont ; Abano, en Lombardie ; Viterbe, près Rome, etc.

Les propriétés chimiques de ces boues tiennent à la présence de l'humus et des matières organiques, agissant sur les éléments compris dans les eaux thermales ².

A *Franzensbad* ³ (à 6 km. d'Eger), où cette médication est particulièrement développée, des terres marécageuses, de plusieurs mètres de profondeur et de plus d'un kilomètre d'étendue, sont traversées par des sources, riches en sels de fer, notamment en sulfates.

La réduction de ceux-ci donne, à une certaine profondeur, une imprégnation pyriteuse, englobant des débris végétaux ; au-dessus, se trouve une couche superficielle de vase, ayant de 0,32 m. à 0,48 m. d'épaisseur, que l'on utilise.

Pour cela, on la retire du marécage à la fin de l'été et on l'expose, pendant tout l'automne et l'hiver, sur un terrain incliné, après l'avoir étendue en couches épaisses. Là, elle absorbe l'oxygène de l'air, dégage des gaz carbonique et sulfhydrique, etc.

Au printemps, on la retourne, on enlève les parties grossières, telles que racines, petites branches, etc., qu'elle peut contenir et on la réduit en poudre.

Puis, lorsqu'on veut l'utiliser, on l'échauffe en y faisant arriver de la vapeur de l'une des sources et on mélange cette boue échauffée, en proportions convenables, avec de la boue fraîche.

La boue de Franzensbad contient, comme éléments principaux, pour 1 000 parties de boue séchée ou 3 000 de boue humide, les suivants :

Dictionnaire DURAND-FARDEL, etc. article Boues minérales.

² Dans le peuple, on s' imagine souvent y trouver une sorte de concentration des propriétés de la source elle-même.

³ 1852. BOSCHAN. *Essai sur les bains de boues ferrugineuses et salines de Franzensbad.* — Voir, plus haut, sur cette source, p. 290 et 305.

A, matières solubles dans l'eau = 112,68.

$\text{Na}^2\text{OSO}^3 = 38,06$; $\text{FeOSO}^3 = 24,82$; acide humique, 20,93 ; $\text{NaCl} = 10,03$; $\text{CaOSO}^3 = 4,97$; $\text{Al}^2\text{O}^3, 3\text{SO}^3 = 4,78$.

B, humus soluble dans l'alcool = 37,61.

C, matières solubles dans l'acide chlorhydrique = 252,47.

$\text{FeO} = 88,50$; substances végétales = 62,14 ; $\text{SiO}^2 = 42,84$; $\text{Al}^2\text{O}^3 = 29,58$; $\text{MgO} = 14,34$.

D, acide humique, soluble dans l'ammoniaque = 123,26.

E, matières insolubles (sable grossier et substances végétales non détruites) = 473,63.

Dans d'autres stations, les boues sont le résidu de matières en suspension, entraînées par l'eau thermale et déposées par elle dans ses canaux, bassins, etc. Mais, beaucoup plus souvent, on les obtient artificiellement, en délayant une boue quelconque dans la conduite de circulation de l'eau thermale.

Le limon de *Saint-Amand* (Nord), qui fut très renommé, aux XVII^{e} et XVIII^{e} siècles, pour les blessés des guerres de Flandre et des Pays-Bas, tient, pour 100 (d'après Pallas) :

$\text{H}^2\text{O} = 57$; $\text{SiO}^2 = 30,4$; matière organique = 8 ; $\text{CaOCO}^2 = 1,56$; $\text{FeOCO}^2 = 1,45$; $\text{MgOCO}^2 = 0,56$; $\text{S} = 0,2$.

Celui de *Bourbonne* tient (d'après Vauquelin) :

$\text{SiO}^2 = 64,40$; matière organique = 15,40 ; $\text{CaO} = 6,20$; $\text{FeO} = 5,80$; $\text{Al}^2\text{O}^3 = 2,20$; $\text{MgO} = 1,00$.

A *Piatigorsk* (Caucase), on a essayé d'utiliser les boues alcalines et légèrement ferrugineuses du lac Tamboukan, en les mélangeant, dans des fosses peu profondes exposées à l'air, avec les sources thermales alcalino-calcaires sulfurées.

Ces boues du lac tiennent, pour 100 :

Résidu insoluble = 86,81 ; $\text{Al}^2\text{O}^3 = 4,52$; $\text{SO}^2\text{H} = 3,16$; $\text{CaO} = 2,83$; $\text{Fe}^2\text{O}^3 = 1,22$; $\text{Na}^2\text{O} = 0,48$; $\text{MgO} = 0,44$; $\text{Cl} = 0,32$.

Les boues de *Viterbe*, employées dans certains hôpitaux de Rome, sont, les unes sulfureuses, les autres ferrugineuses :

Boue sulfureuse (d'après Poggiale) ; $\text{SiO}^2 = 55$; $\text{S} = 22,73$; matières organiques = 21,03 ; $\text{FeOCO}^2 = 0,23$; $\text{CaOSO}^3 = 0,11$; $\text{CaOCO}^2 = 0,08$; $\text{CaCl} = 0,006$.

Boue ferrugineuse ; $\text{CaOCO}^2 = 70,68$; $\text{FeOCO}^2 = 20,69$; $\text{CaOSO}^3 = 3,27$; $\text{SiO}^2 = 2,72$; $\text{Al}^2\text{O}^3 = 1,05$; matières organiques = 1,03.

A *Ischl* (Autriche), on imprègne des boues avec les sels minéralisateurs de la source.

On applique également des bains de boue à *Pystjan* en Hongrie, *Ronneby* et *Loka* en Scandinavie, *Acqui* en Italie, etc.

En Russie, on a donné une assez large extension aux bains de boue¹ : ces boues étant elles-mêmes, soit celles des lacs salés (limans) à *Odessa*, *Saky*, *Mainaky*, etc., ou des baies maritimes d'*Arensbourg* et d'*Hapsal* dans le nord de la Russie, soit celles des tourbières (*Kemmorn-Bousk*, etc.).

Dans certains endroits du sud de la Russie, on chauffe au soleil une couche de boue, pétrie avec de la saumure, jusqu'à une température de 48 à 50° et on y couche le malade.

Utilisation des conferves. — Les conferves sont, nous l'avons vu², des végétaux, qui se développent dans les bassins d'eau thermale, exposés à l'air et au soleil. Il s'y produit parfois une concentration, parfois même une cristallisation, de certains éléments dissous dans l'eau ; notamment des traces d'iode, imperceptibles dans la source même, peuvent, par un phénomène commun à nombre de végétaux dans les eaux douces quelconques, s'y rassembler assez pour y devenir dosables. Une fermentation insensible y agit également sur certains sels. Enfin, des gaz s'y accrochent en bulles et y forment un mélange, qui n'a plus les mêmes proportions qu'en se dégageant du griffon, etc.

Toutes ces raisons peuvent être invoquées pour expliquer les effets, que l'on a cru constater, surtout autrefois, en appliquant ces matières en frictions ou en véritables bains.

L'usage des conferves pour frictions et cataplasmes a existé en France, à Nérès, à Bagnères-de-Luchon, à Dax. A Nérès, en particulier, on était arrivé à en faire une véritable culture artificielle³.

En Allemagne, ces limons végétaux (*mineralschlamme*) sont parfois employés en bains comme les boues minérales.

¹ PINSKER. *See und Limanbäder in Odessa* (Vienne, 1881).

² Page 210.

³ DE LAURÈS et BECQUEREL. (*Ann. Soc. hydr. méd. de Paris*, t. I^{er}, 1854-55).

INDEX GÉOGRAPHIQUE

DES SOURCES THERMO-MINÉRALES ¹

A			
	Aix-les-Bains.	110, 137,	Apennins.
	169, 330 .		350
	Akhaltzikh.	378	Apollinaris.
	Alanje.	217	237
	Albano.	166, 361, 363	Appalaches.
	Alet.	168, 313, 320, 475	54, 398
	Algérie.	366	Aputa.
	Alhama d'Almeria.	250	405
	— d'Aragon.	248	Arabie.
	— de Murcia	249	409
	— nueva.	250	Arassan.
	Alhaurin el Grande.	250	385
	Alicun de Ortega.	250	Archangel'sk.
	Alleverd.	200, 329	234
	Alliaz (1').	106	Archena.
	Almolonga.	405	249
	Alora.	250	Archevaleta.
	Alpes.	324	323
	Alvenen.	338	Arcole.
	Amélie-les-Bains.	110, 169,	Ardennes.
	313, 610.		235
	Amphion.	331	Arengo.
	Anaval.	389	409
	Andersdorf.	346	Arenosillo.
	Andover.	93	247
	Angers.	234	Arensbourg.
	Angleterre.	232	617
	Angola.	410	Arez.
	Annam.	391	247
	Anseur-el-louza.	370	Arkewan.
	Anticoli.	363	374
	Antilles.	403	Arlanc.
	Antoville.	235	272
			Arnedillo.
			414
			Arnstadt.
			102
			Arteijo.
			246
			Arzu.
			370
			Asciano.
			361
			Ashby.
			102, 232
			Asie.
			383
			Aspio.
			353
			Assini.
			412
			Astyra.
			206
			Atalanti.
			201
			Ataun et Cegama.
			323
			Atlas.
			366
			Auachapan.
			405
			Áudinac.
			322
			Aulus
			102, 321 , 480

Nous ne donnons ici, pour les sources les plus importantes, que les pages où elles sont l'objet d'une description, ou, au moins, d'une indication bibliographique, en laissant de côté, pour faciliter les recherches, celles où leurs noms sont seulement cités incidemment. Les chiffres gras (**343**) signalent les pages où la source en question est spécialement étudiée.

Evaux. 64, 69, 82, 102, 130, 168, 254, 453, 470, 507	Girgenti. 364	Hamмам Meskoutine. 77, 142, 370, 371.
Evian. 326, 331	Gleissen. 615	— n'Balls. 371
F	Gobbio. 361	— Rira. 370, 372
Faehingen. 239	Godiasco. 353	— Schiba. 371
Fernando de Noronha, 411.	Gocong Api. 393	— Siane. 371
Fez. 371	Gokra. 390	— Sidi Ait. 370
Fideris. 338	Goloprstanj. 234	— Sidi bou Hané- fia. 371
Fidji (iles). 93, 394	Gorze. 48	— Sidi Djaballah, 370
Figuig. 371	Gotschalkowitz. 346	— Sidi Trad. 371
Fischau. 59	Gouhenans. 276	Hapsal. 617
Fonga. 361	Gourniguel (Noir Gurnigel). 350	Harkany. 350, 563
Fontaine-Bonneleau. 235	Grabalos. 248	Haroudj noir. 410
Fontaines-Chaudes. 284	Granara. 364	Harre. 236
Fontana. 363	Grand Proval. 377	Harrison. 399
Fonte Maimonide. 364	Grandrif. 272	Harrowgate. 232
Fordongianus. 366	Graus d'Olette. 202, 309, 313, 314	Harz. 237
Forêt-Noire. 286	Greenbrier. 398	Hassan Kaleh. 387
Forges. 234, 414	Gréoulx. 91, 168, 328	Hauterive. 36, 110, 196, 262, 553.
Formose. 392	Groenland. 411	Hazaribagh. 390
Fornello. 363	Grogardo. 353	Healing. 398
Fortuna. 249	Grodno. 234	Heilbronn. 108
Fourchambault. 269	Grosnji. 377	Helena hot sp. 400
Franzensbad. 290, 305, 615	Guadelupe. 404	Herkules furdö. 349
Franz-Josephbad. 344	Guagno. 168, 366	Hernida. 245
Freiberg. 61, 65, 287	Guanabaeoa. 404	Herverideros del Empera- dor. 247
Friedberg. 239	Guardias Vicjas. 250	Hersten. 231
Friedrichshall. 91, 102, 240	Guatemala. 405	Heucheloup. 276
Fuenealiente. 247	Guarros (los). 250	Heustrich. 106, 335
Fuente Agria de Villa- tuesta. 247	Guillou. 328	Hierapolis. 78, 141, 373
Fuente potrida. 249	Guimaraes. 246	Hindoustan. 388
Fullham. 512	Guitera. 366	Hombourg. 91, 102, 239
Fumades. 481	Gurgitelto. 363	Hong Chan. 386
Furstenfeld. 344	Gurnigel. 106, 585	Hornillos. 405
	II	Hot springs. 399
	Hainan. 386	Huel seton. 66, 232
	Haïtchoung. 385	Hundsruék. 237
	Hakone. 392	Huntershot sp. 399
	Hall. 102, 339, 346	Hunyadi Janos. 350
	Halle. 231	I
	Hallein. 339	Hes Britanniques. 232
	Hallstadt. 339	Ilidja. 387
	Hamasen. 409	Ilkeston. 232
	Hamмам bou Ghara. 371	Iopango. 405
	— bou Hadjar. 370	Inde. 388
	— 372.	Inferno. 361
	— bou Hanèfia. 370	Irapa. 406
	— bou Sellam. 371	Ischia. 71, 361, 363
	— bou Thaleb. 371	Ischl. 339, 616
	— Cheniour. 371	Islande. 411
	— el Beida. 371	Issyk Koul. 429
	— es Salahin. 371	Istrie. 345
	— Gueurgour. 370	
	— Kourbès. 370	
	— Lefzoua. 371	
	— Lif. 370	
	— Melouanc. 371	
Gabian. 273, 313		
Gagnières. 273		
Gallevaje. 361		
Galoengoeng. 393		
Garde (la). 329		
Garm. 385		
Garriga. 247		
Gastein. 115, 202, 208, 339, 607.		
Gaujacq. 91		
Gebangan. 393		
Gédé. 393		
Geilnau. 239		
Geleznovodsk. 52, 141, 377, 450, 478, 483, 504, 559		
Gerjussy. 374		
Gévaudan. 91, 328		
Gimeaux. 74, 141, 259		
Ginoles. 320		

J		Lac Noir.	106	Madruga.	404
Jachal.	406	Lago Zoffereo.	362	Maggiona.	360, 361
Jamaïque.	404	Lamalou. 64, 143, 274, 313,		Magyarad.	349
Japon.	392	504, 520.		Mahagh.	409
Jaude.	196, 259	Lambary.	406	Mainaky.	617
Java.	393	Lampiano.	353	Maizières.	93, 466
Joachimsthal.	186, 287	Lanjaron.	250	Mala (la).	250
Johannisbrun.	346	Lansah.	390	Malacca.	391
Joppé.	206	Larderello.	361	Malvern.	233
Jorullo.	403	Larrauri.	319	Manikam.	390
K		Lavey. 172, 332, 443, 569,		Manitoba.	399
Kalusz.	122, 349	583.		Manitou sp.	402
Kamtchatka.	392	Leamington.	233	Manterous.	410
Karatach Dagh.	387	Lebanon.	398	Maquiling.	392
Karatchi.	390	Lebedos.	373	Marcols.	464
Karategin.	385	Leira.	250	Mariana.	406
Karkar.	394	Lemnos.	373	Marienbad.	65, 108, 301
Karlsbad. 52, 65, 74, 82,		Lenk.	406	Marienbergl.	615
108, 291, 615.		Leon forte.	364	Marlioz.	330
Karlsruhe.	231	Lesbos.	70	Marmolejo.	247
Karnul.	390	Lesson.	394	Maros-Ujvar.	346
Kasbah.	369	Les y Artes.	315	Martigny.	276
Kautenbach.	65	Leuck (Voir Louèche).		Martinique.	404
Kelat.	390	Lexico.	343	Masino.	342
Keloung.	392	Leyte.	392	Matthewssp.	399
Kemmorn-Bousk.	617	Liebenstein.	96, 240	Medesano.	355, 358
Kertsch.	378	Lidja.	373	Mehadia.	106
Khandesh.	389	Limagne.	55	Meinberg.	613
Khingau.	385	Linden.	231	Meiningen.	240
Kiaichan.	392	Lipari.	166	Meira.	246
Kilimandjaro.	409	Lipezk.	385	Mekran.	388
Kisik Kiul.	390	Lipik.	607	Melbourne.	395
Kislovodsk.	377, 565	Lipnik.	350	Mele.	353
Kissingen. 37, 95, 102,		Lipp-springe.	237	Mengka.	392
561.		Lisbonne.	250	Merens.	313, 314
Kolapur.	389	Livourne.	361	Meseta.	244
Kolop.	346	Livry.	522	Mesu Mundu.	366
Kongsberg.	123	Loka.	615, 617	Mételin.	70, 373
Königswart.	305	Lombardie.	341	Methana.	104, 374
Korytnyioza.	348	Lostorf.	406	Meurchin.	168
Krain-Sand.	370	Loudun.	48, 55	Mexique.	403
Krakatau.	394	Louèche.	202, 334	Meyras.	168
Kos.	373	Loujo.	246	Migliano.	361
Kouban.	374	Loutra.	373	Milianah.	66
Kousats.	392	Loutswoun.	385	Milo.	71, 373
Krapina.	344	Lu.	353	Mindanao.	392
Kreuznach. 102, 126,		Lucca.	361	Miravalles.	405
291		Luco.	406	Mitidja.	52
Kummern.	291	Lugo.	246	Mödling.	59
Kund (Suraj, Chandra,		Luhatschowitz.	346	Moïse (fontaine de).	408
Sita).	389	Luiano.	361	Molinar.	323
Kursk.	234	Luisenquelle.	290	Molitg. 110, 169, 313,	314
L		Lusclade.	274	Moluques.	393
Laa.	346	Luxeuil. 102, 169,	283	Momotombo.	405
Laacher see.	237	Luzon.	392	Monchique.	250
Labarthe.	322	M		Mondariz.	246
Labassère.	163	Maccira.	250	Mondorf. 102, 156, 236,	561
Lacaune.	273	Macholles.	156	Mondragone.	361
		Madagascar.	410	Monestier de Briançon. 59,	
				168, 329.	

INDEX GÉOGRAPHIQUE

625

Puertolano.	247	Ruiz.	406	St-Romain.	272, 455
Pullna.	94, 129, 291	Russie.	233	St-Sauveur.	110, 316
Puracé.	406			St-Servan.	234
Puy de la Poix.	93	S		S. Stefano.	345
Puzziello.	365, 366	Sacedon.	248	St-Vallier.	276
Pyrénées.	308	Sadschitz.	291	S. Vicenzo.	342
Pymont.	102, 237	Safa.	408	St-Yorre.	108, 110, 261, 551
Pystjan.	617	Saidschutz.	291, 302		
		Sail-les-Bains.	234, 271	Sakhtessar.	388
Q		Saut-sous-Gonzan.	168, 271	Saky.	617
Quezaltenango.	405	464.		Salada de Chingey.	406
		<i>Saint, San, Santo, etc.</i>		Salah bey.	370
R		S ^a Agueda.	323	Salerno.	364
Rabbi.	343	S. Agustin de Haro.	248	Sales.	353
Radeberg.	615	S ^a Alban.	271	Salies-de-Béarn.	91, 102, 322.
Radokh.	385	S ^a Alyre.	93, 142, 259	Salies du Salat.	322
Ragaz (Voir Pfäfers).		S ^a Amand.	102, 143, 168, 235	Salinelas de Novelda.	249
Rakustal.	385	615, 616.		Salins (Jura).	59, 91, 102, 327
Ramri.	391	S ^o Angelo.	363	Salins-Moutiers.	329
Rapolano.	361	S. Casciano.	360, 361	Salomon.	394
Ras el Aïn.	490	St-Christau.	322	Salso Maggiore.	355, 357
Rebaïa.	370	S ^a Clara.	406	Salt en Donzy.	272
Récoaro.	343	S. Diego.	404	Salt lake city.	402
Reheray.	283	St-Domingue.	404	Saltrange.	388
Reichenhall.	102	S. Fernando.	406	Salvador.	405
Rémé.	237	S. Filippo.	361	Salz (la).	321
Renaïson.	271	St-Galmier.	272, 464	Salzhausen.	231
Rennes-les-Bains.	104, 168, 320.	S. Gemini.	361	Salzquelle.	290
Retorbido.	353	S ^o Genisio.	353	Salzungen.	615
Réunion.	71	St-Gervais.	102, 169, 329, 334, 482.	Samoa.	394
Reykoll.	412	S. Giovanni.	442	Samos.	490
Rheinfeldcn.	102, 337	S. Giuliano.	361	Santenay.	269
Rices spring.	399	S. Gratien.	522	Santorin.	373
Riglio.	357	S ^o Hilario.	247, 312	Sapoetan.	393
Rio.	355	St-Honoré.	59, 102, 168, 268	Saratoga.	398, 400
Riolo.	359	St-Jean-du-Gard.	273, 506	Saravan.	391
Rio Real.	250	S. Juan de Azcoitia.	323	Sardaigne.	366
Rio Vinagre.	406	S. Juan de Carballo.	246	Sardara.	366
Rippoldsau.	95, 286	St-Laurent.	168	Sarolta.	346
Ris.	264	St-Louis (île).	235	Sassenage.	48
Risoul.	168	S. Lucar de Guadiana.	247	Sassuno.	358
Rivanazzano.	353	St-Lucie.	404	Sassuolo.	355, 358
Rohrbach.	48	St-Marguerite.	258	Saucerbrunn.	346, 545
Roma.	361, 363	S. Marino.	360	Sauxillanges.	258
Römerbad.	344	St-Martin (Hongrie).	361, 366.	Savalan.	387
Roncegno.	343	St-Martin (Italie).	348	Saxon.	334
Ronneby.	95, 617	St-Martin-Lantosque.	168, 328.	Scandinavie.	233
Roquebillière.	168, 328	St-Moritz.	91, 338	Scapulas.	405
Rosario.	406	St-Myon.	141, 259	Scarborough.	232
Rosière aux Salines.	276	S ^a Nectaire.	90, 108, 143	Schemnitz.	348
Rouanda.	409	169, 258.		Schimberg.	106
Roucas blanc.	168	S ^o Pancrazio.	342	Schinznach.	175, 337, 465
Roupehou.	390	St-Pardoux.	269	Schlungenbad.	239
Rouzat.	169	St-Paul (île).	71	Schönau.	305
Roy.	231	S. Pedro do Sul.	247	Schwalbach.	239
Royat.	69, 102, 108, 126, 168, 258.	S. Pellegrino.	342	Schwalheim.	239
Rudiay.	540			Sciaccia.	365
				Sedlitz.	129, 291, 302
				Selovitz.	346

INDEX GÉOGRAPHIQUE

627

Vicentin.	313		
Vichnje.	312	W	Wildungen.
Vichy. 63, 93, 108, 110,		Wajang.	237
168, 261, 443, 444, 485		Warasdin.	398
550, 614.		Warnsulphur sp.	330
Villar del Pozo.	217	Warren.	374
Villarosa.	364	Wart.	410
Villavieja de Nales.	249	Washita.	Y
Vinadio.	342	Wattwiller.	Yellowstone park. 141, 400
Virginie.	54	Weilbach.	Yenang ung.
Visakna.	346	Weissenbourg.	391
Visella.	246	Westerwald.	410
Viterbo.	361, 615, 616	Wieliczka.	Yverdon.
Vittel.	276, 481	Wiesbaden.	53
Volcan.	394	Wildbad.	Z
Vosges.	275	Wildbad Gastein (Voir Gas-	Zacatecas.
Vöslau.	59, 231, 347	tein).	403
		Wildegg.	Zaldivar.
		91, 102, 337	323
			Zara.
			408
			Zwickau.
			287

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE. — BUT ET DIVISIONS GÉNÉRALES DE L'OUVRAGE.

LIVRE PREMIER

ÉTUDE GÉOLOGIQUE, CHIMIQUE ET PHYSIQUE DES SOURCES THERMO-MINÉRALES

PREMIÈRE PARTIE

GÉNÉRALITÉS

DÉFINITION DES SOURCES THERMO-MINÉRALES. — LEURS RELATIONS AVEC
LES SOURCES ORDINAIRES. — PROBLÈMES GÉNÉRAUX DE L'HYDROLOGIE
SOUTERRAINE. — HISTORIQUE SOMMAIRE DU SUJET. 1

DEUXIÈME PARTIE

ORIGINE DES EAUX THERMALES

PRÉAMBULE. — EXPOSÉ DES THÉORIES DIVERSES. — ORIGINE ARTÉSIENNE. 9

CHAPITRE PREMIER. — Provenance originelle de l'eau thermale. — Causes
de sa pénétration en profondeur. — Allure présumée des fissures ser-
vant à cette pénétration et à la remontée. — Profondeur maxima pro-
bable des pénétrations hydrothermales et des filons d'incrustation
anciens 18

CHAPITRE II. — Causes de la remontée de l'eau thermale à la surface :
Pression hydrostatique. Force expansive des gaz, etc... — Etude ma-
thématique du problème 35

TROISIÈME PARTIE

DE L'ÉMERGENCE DES SOURCES THERMALES
CAUSES DÉTERMINANTES DE LA POSITION DE LEUR GRIFFON

PRÉAMBULE. — GÉNÉRALITÉS	43
CHAPITRE PREMIER. — Etude de la fissure thermique	48
§ 1. <i>Diaclases ou cassures intérieures des roches.</i>	50
§ 2. <i>Plis des terrains.</i>	52
§ 3. <i>Faïlles</i>	54
§ 4. <i>Contacts de filons, dykes, ou massifs de roches cristallines avec des terrains sédimentaires.</i>	59
§ 5. <i>Filons d'incrustation.</i>	61
CHAPITRE II. — Lignes de moindre pression de la surface topographique.	67
CHAPITRE III. — Variations avec le temps dans le niveau des griffons.	
— Influence de l'érosion superficielle, des dépôts et incrustations, etc.	73
CHAPITRE IV. — Multiplicité des sources dans une même station thermique.	80

QUATRIÈME PARTIE

PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES THERMO-MINÉRALES
ET EXPLICATION DE CES PROPRIÉTÉS

CHAPITRE PREMIER. — Composition chimique des eaux thermo-minérales.	
— Sels en dissolution et gaz	85
§ 1. <i>Éléments chimiques reconnus dans les eaux thermo-minérales.</i>	89
§ 2. <i>Proportion des divers éléments contenus dans les eaux et groupement hypothétique de ces éléments par sels. Classification des eaux thermo-minérales d'après leurs principes chimiques dominants</i>	96
1° Sources ferrugineuses	100
2° Sources salines	101
3° Sources carbonatées.	106
4° Sources sulfurées sodiques.	107
5° Sources indifférentes, indéterminées, ou alpestres (Wildbäder).	114
§ 3. <i>Gaz des eaux thermo-minérales</i>	115
§ 4. <i>Origine des principales substances et des gaz contenus dans les eaux thermo-minérales. Relation de la nature des eaux avec celle des roches au voisinage.</i>	119
1° Eaux salines : chlorurées sodiques, sulfatées calciques, sodiques et magnésiennes, etc	121
2° Sources carbonatées. Origine de l'acide carbonique libre.	130
3° Sources sulfurées sodiques	134
4° Sources alpestres ou indifférentes (Wildbäder, Akrothermen).	137
5° Sources des régions volcaniques.	137

§ 5. Dépôts formés par les sources thermo-minérales. Incrustation des griffons, Boues, etc. Corrosions produites sur les chenaux souterrains.	139
§ 6. Réactions chimiques exercées par les eaux thermo-minérales sur les roches ou les objets en contact. Production de minéraux divers.	145
§ 7. Variations avec le temps dans la composition des eaux. Altérations à l'air	147
CHAPITRE II. — De la température des sources thermales et de son origine.	151
§ 1. Mesure de la température des sources thermales. Variations de la température d'une même source avec le temps, ou suivant les circonstances locales	151
§ 2. Causes de la température des sources thermales.	154
1° Influence de la profondeur atteinte et du degré géothermique au point considéré. Loi d'échauffement théorique d'un circuit hydrothermal	155
2° Influence possible d'une volatilisation.	162
3° Réactions chimiques.	163
4° Influence des infiltrations froides.	163
5° Action de l'air.	164
§ 3. Température des principales sources thermales	164
§ 4. Quantité de chaleur apportée à la surface par les sources thermales..	166
CHAPITRE III. — Débit des sources thermo-minérales	170
§ 1. Mesure du débit.	170
§ 2. Loi mathématique réglant le débit d'une source thermique. Variations de ce débit avec le niveau de captage. Possibilité d'augmenter le débit en abaissant le plan d'eau. Inconvénients. Mélange d'eau froide avec l'eau thermique.	177
§ 3. Variations du débit, tenant à la section de l'orifice d'écoulement. Engorgement des griffons. Cas des nappes artésiennes exploitées par sondages. Influence réciproque de plusieurs sondages voisins. Effets du tubage. Emploi de la dynamite au fond des trous de sonde.	185
§ 4. Influences naturelles amenant des modifications dans le débit d'une source thermique. Action de la pression atmosphérique, du régime météorologique, etc	189
§ 5. Sources intermittentes et geysers.	195
§ 6. Influence des tremblements de terre sur le débit des sources thermales.	199
§ 7. Débit de quelques sources thermales. Leur puissance balnéaire.	202
CHAPITRE IV. — Propriétés physiques diverses des eaux thermo-minérales. — Electricité. — Plantes et animaux. — Présence des microbes, etc.	204

CINQUIÈME PARTIE

RÉPARTITION DES SOURCES THERMALES A LA SURFACE DU GLOBE GRANDES RÉGIONS NATURELLES DE SOURCES THERMALES

CHAPITRE PREMIER. — Relations des sources thermales avec la géologie générale	213
--	-----

§ 1. <i>Généralités. Relations des sources thermales avec les zones de dislocation récentes. Application aux filons métallifères. Possibilité que les faciès caractéristiques des groupes métallifères, observés dans des chaînes d'âges divers, tiennent à la profondeur plus ou moins grande mise à jour par les érosions.</i>	213
§ 2. <i>Classification théorique des dislocations susceptibles de donner naissance à des sources thermales. Leur position par rapport aux chaînes de plissement correspondantes</i>	221
CHAPITRE II. — Sources thermales dans l'Avant-Pays des Alpes : Ardennes, Eifel et Harz ; Meseta Espagnole ; Plateau Central ; Vosges et Forêt-Noire ; Bohême, etc.	231
§ 1. <i>Généralités. Extrême rareté des sources thermales au Nord de l'Europe, dans la chaîne calédonienne (Iles Britanniques, Scandinavie et Plateau russe, etc.). Chaîne avancée de la Bretagne, de l'Ardenne, de l'Eifel et du Harz.</i>	231
§ 2. <i>Espagne et Portugal. La Meseta et la Cordillère bétique.</i>	241
§ 3. <i>Plateau Central français et Morvan (Néris, Evaux, Bourbon, Mont-Dore, Royat, Châtelguyon, Vichy, Bourbon-Lancy, Saint-Honoré, Pougues, Sail-les-Bains, Saint-Galmier, Chaudes-Aigues, Vals, Lamalou, etc.)</i>	251
§ 4. <i>Vosges (Bourbonne, Plombières, Contrexéville, Luxeuil, Bus-sang, etc.)</i>	275
§ 5. <i>Forêt-Noire (Baden, Rippoldsau, Wildbad, Cannstadt...)</i>	286
§ 6. <i>Bohême (Franzensbad, Karlsbad, Marienbad, Pullna, Sedlitz, Seidschut, Teplitz, etc.)</i>	287
CHAPITRE III. — La chaîne alpestre et ses rameaux secondaires : Pyrénées, Alpes, Carpathes, Apennins, Atlas, Caucase, etc.	307
§ 1. <i>Pyrénées</i>	308
1° Sources sulfurées sodiques : Amélie-les-Bains, Ax, Bagnères-de-Luchon, Barèges, Saint-Sauveur, Cauterets, Eaux-Chaudes et Eaux-Bonnes.	308
2° Sources salines : Rennes-les-Bains, Ussat, Aulus, Salies, Bagnères-de-Bigorre, etc.	319
§ 2. <i>Alpes</i>	324
1° Versant français : Uriage, Allevard, Salins-Moutiers, Aix, etc.	324
2° Suisse : Bex, Lavey, Louèche, Heustrich, Baden, Schinznach, Birmenstorff, Pfäfers, Tarasp, etc.	332
3° Tyrol : Ischl, Gastein.	339
4° Versant italien : Lombardie, Vicentin, Istrie, Croatie, Dalmatie.	341
§ 3. <i>Carpathes et plaine hongroise</i>	346
§ 4. <i>Apennins et Sicile. Sources du Piémont. Salses pétrolifères de l'Emilie. Toscane et Campagne romaine. Province de Naples. Sicile. Corse et Sardaigne, etc.</i>	350
§ 5. <i>Algérie (Hamman Meskoutine, etc.)</i>	366
§ 6. <i>Mer Egée</i>	372
§ 7. <i>Caucase. Groupe de Piatigorsk, Essentouky, Geleznovodsk, etc.</i>	374

	633
TABLE DES MATIÈRES	
CHAPITRE IV. — Régions hydrothermales diverses. Districts volcaniques.	378
§ 1. <i>Continent asiatique</i> : Sibérie, Chine, Asie Mineure, Perse, Inde, Indo-Chine	378
§ 2. <i>Cercle éruptif du Pacifique</i> . Portion occidentale : Kamtchatka, Japon, Java, Sumatra, Nouvelle-Zélande, etc.	391
§ 3. <i>Amérique</i> : Amérique boréale et Etats-Unis, Mexique, Antilles, Amérique Centrale, Amérique du Sud.	396
§ 4. <i>Axe d'effondrement syrien et érythréen</i> : Mer Morte — Kilimandjaro et Continent Africain	407
§ 5. <i>Axe éruptif Atlantique</i> : Islande, Açores, etc.	411
Bibliographie des ouvrages généraux relatifs aux sources thermales et à l'hydrologie souterraine : A, historique; B, ouvrages généraux du XIX ^e siècle; C, hydrologie, sources et nappes artésiennes.	414

LIVRE SECOND

CAPTAGE DES EAUX THERMO-MINÉRALES

GÉNÉRALITÉS. — AVANTAGES ET DANGERS DU CAPTAGE. COMPARAISON AVEC L'EXPLOITATION D'UN GITE MÉTALLIFÈRE	421
--	-----

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDES PRÉLIMINAIRES ET RECHERCHE DES SOURCES THERMO-MINÉRALES

§ 1. <i>Exploration géologique du terrain. Détermination du mode d'émergence et du régime des eaux thermales, ainsi que de l'allure des eaux froides superficielles. Choix d'un niveau de captage.</i>	429
§ 2. <i>Choix d'un système de captage. Tableau des divers modes d'émergence des sources thermo-minérales, avec le procédé de captage correspondant.</i>	434

DEUXIÈME PARTIE

MESURES GÉNÉRALES POUR L'EXÉCUTION DE TOUS LES PROCÉDÉS DE CAPTAGE

§ 1. <i>Epuisement dans les travaux de captage.</i>	440
§ 2. <i>Aération.</i>	443
§ 3. <i>Exécution des boisages, muraillements, revêtements en ciment, béton, etc</i>	446

- § 4. *De l'emploi des métaux dans les captages d'eaux thermales.* 451
 § 5. *Protection extérieure des captages. Dangers à prévoir. Législation. Remède aux disparitions de sources thermales produites par des fissures accidentelles.* 454

TROISIÈME PARTIE

DESCRIPTION DES DIVERSES MÉTHODES DE CAPTAGE

- CHAPITRE PREMIER. — **Méthodes de captage, où l'on atteint le griffon.** 461
- § 1. *Captages par fosses, excavations peu profondes, petits puits, courts trous de sonde, etc.* — Exemples de Schinznach, Maizières, Bourbon-l'Archambault, Evaux, Nérès, Châtelguyon, Vals, Alet, Karlsbad, Célestins de Vichy, Pfäfers, Geleznovodsk, Aulus, Vittel, les Fumades, Euzet, Saint-Gervais, etc.. 463
- § 2. *Captages par puits.* — Exemples de Vichy (Allier). 484
- § 3. *Captages par travers-bancs, galeries de mines ou sondages horizontaux.* Exécution des galeries (boisages provisoires, sondages en avant, muraillements). — Exemples de Pfäfers (Suisse), de Piatigorsk, de Causerets (Pyrénées), des sources savonneuses de Plombières (Vosges), d'Uriage (Isère), de Lamalou (Hérault), de Geleznovodsk (Caucase), de Saint-Jean-du-Gard, de Pouzzoles près Naples, etc. 489
- CHAPITRE II. — **Méthodes de captage, où l'on met en jeu les différences de pression sur le griffon et autour du griffon** 509
- § 1. *Cas où la pression autour du griffon est réalisée par une couche de béton.* — Captages antiques de Plombières et de Bourbonne. — Captage de Barèges 512
- § 2. *Cas où la pression autour du griffon est obtenue par une nappe d'eau (Méthode des pressions hydrostatiques réciproques).* — Captages d'Ussat (Ariège), de Lamalou (Hérault), de la Motte (Isère), de Pfäfers (Grisons), d'Enghien (Seine-et-Oise), de Bagnères-de-Luchon (Haute-Garonne) 516
- CHAPITRE III. — **Recherche des sources thermo-minérales par sondages verticaux** 533
- § 1. *Généralités. Cas où l'on emploie les sondages. Application : 1° à la recherche profonde de sources thermales filoniennes, dont on posséderait le griffon naturel à la surface ; 2° au captage de nappes artésiennes. Exemples de sondages pour des sources filoniennes ou artésiennes (la Bourboule, Teplitz, etc.)* 533
- § 2. *Exécution du captage par trou de sonde. Particularités concernant les sondages pour eaux thermales* 540
- § 3. *Tubage des trous de sonde. — Choix de la substance du tube ; protection contre les eaux douces ; captage des eaux thermales ; précautions pour les gaz* 542
- § 4. *Exemples de sondages à Vichy, Saint-Yorre (Allier), Bourbonne (Haute-Marne), Geleznovodsk et Essentouky (Caucase), etc.* 550

CHAPITRE IV. — Parties accessoires du captage. Captage des gaz. Protection contre les infiltrations froides et drainage de celles ci (cas de Lavey)	562
---	-----

QUATRIÈME PARTIE

AMÉNAGEMENT DE LA SOURCE THERMO-MINÉRALE
APRÈS LE CAPTAGE

CHAPITRE PREMIER. — Utilisation en boisson. Pompage. Clarification. Embouteillage	575
CHAPITRE II. — Transport des eaux du griffon à l'établissement balnéaire. Conditions générales du problème.	578
§ 1. Transport d'une eau chaude, mais peu minéralisée, vers un point situé à l'aval.	582
§ 2. Transport d'une eau sulfurée, facilement altérable, avec forte descente	585
§ 3. Transport d'une eau fortement gazeuse vers un point plus bas que son niveau hydrostatique	586
§ 4. Transport d'une eau minéralisée corrosive (chlorurée), avec surélévation par des pompes	590
§ 5. Transport par siphon vers un point situé à l'aval, par-dessus un obstacle intermédiaire	593
§ 6. Transport de l'eau d'une source vers un point plus élevé que son émergence. Pompes.	595
CHAPITRE III. — Réfrigération ou réchauffement. Consommation d'eau d'un établissement thermal.	600
CHAPITRE IV. — Utilisation des sources thermo-minérales sous des formes accessoires. — Eaux pulvérisées; sels évaporés; boues; con-ferves, etc	612
INDEX GÉOGRAPHIQUE	619
TABLE DES MATIÈRES	629

CATALOGUE DE LIVRES
SUR LA
GÉOLOGIE ET LA MINÉRALOGIE

PUBLIÉS PAR
LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET C^{ie}
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue est envoyé franco sur demande.

MINÉRALOGIE ET GÉOLOGIE

Traité de minéralogie.

Traité de minéralogie à l'usage des candidats à la licence ès sciences physiques et des candidats à l'agrégation des sciences naturelles, par WALLERANT, professeur à la Faculté des sciences de Rennes. 1 volume grand in-8°, avec 341 figures dans le texte 12 fr. 50

Minéraux des roches.

Les minéraux des roches. 1° Application des méthodes minéralogiques et chimiques à leur étude microscopique, par A. MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines. 2° Données physiques et optiques, par A. MICHEL LÉVY et LACROIX. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte et une planche en couleur. 12 fr. 50
Le Tableau des biréfringences seul. 1 fr. 50

Tableaux des minéraux des roches.

Tableaux des minéraux des roches. Résumé de leurs propriétés optiques, cristallographiques et chimiques, par MICHEL LÉVY et LACROIX. 1 volume in-4, relié. 6 fr.

Roches éruptives.

Structures et classification des roches éruptives, par A. MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines. 1 volume grand in-8°. 5 fr.

Détermination des feldspaths.

Etude sur la détermination des feldspaths dans les plaques minées, au point de vue de la classification des roches, par A. MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines. 1 volume grand in-8°, avec 13 figures dans le texte et 23 planches en couleur. 15 fr.

Enclaves des roches volcaniques.

Les enclaves des roches volcaniques, par A. LACROIX, professeur de minéralogie au Muséum d'histoire naturelle. 1 volume grand in-8°, avec 8 planches en couleur. 40 fr.

Minéralogie de la France.

Minéralogie de la France et de ses colonies. Description physique et chimique des minéraux, étude des conditions géologiques de leurs gisements, par A. LACROIX.

Tome I^{er}. 1 volume gr. in-8°, avec figures dans le texte 30 fr.
Tome II. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte 30 fr.
Nota. Le tome III et dernier est en préparation.

Méthodes de synthèse en minéralogie.

Les méthodes de synthèse en minéralogie. Les productions spontanées des minéraux contemporains. — Les synthèses accidentelles. — Les synthèses rationnelles : les méthodes de la voie sèche ; les méthodes de la voie mixte ; les méthodes de la voie humide. Cours professé au Muséum d'histoire naturelle, par STANISLAS MEUNIER. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte 12 fr. 50

Traité des gîtes minéraux et métallifères.

Traité des gîtes minéraux et métallifères. Recherche, étude et conditions d'exploitation des minéraux utiles. Description des principales mines connues. Usages et statistique des métaux. Cours de géologie appliquée de l'École supérieure des mines, par ED. FUCHS, ingénieur en chef des mines, professeur à l'École supérieure des mines, et DE LAUNAY, ingénieur des mines, professeur à l'École supérieure des mines. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte et 2 cartes en couleur. Relié. 60 fr.

Etude industrielle des gîtes métallifères.

Etude industrielle des gîtes métallifères. — Classification des gîtes ; formation des fractures et cavités ; remplissage des gîtes ; gîtes sédimentaires ; les minerais ; gîtes caractéristiques ; études minières ; traitement des minerais ; étude économique d'un gîte, par G. MOREAU, ingénieur des mines. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte, relié. 20 fr.

Géologie.

Cours de géologie, par E. NIVON, inspecteur général des mines, membre de la Société nationale d'agriculture de France, professeur à l'École nationale des ponts et chaussées. 2^e édition, 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte 20 fr.

Géologie de la France.

Géologie de la France, par BURAT, ingénieur, professeur à l'École centrale des arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures intercalées dans le texte. 16 fr.

Diamants du Cap.

Les diamants du Cap. Historique, organisation financière et commerciale, géologie, mode d'exploitation et de traitement, comparaison avec les gisements du Brésil, de l'Inde, de Bornéo et d'Australie, par L. DE LAUNAY, ingénieur au corps des mines, professeur à l'École supérieure des mines. 1 volume grand in-8°, avec 49 figures dans le texte, relié 10 fr.

Mines d'or du Transvaal.

Les mines d'or du Transvaal, Etude géographique et historique, organisation des sociétés minières, étude géologique, exploitation des gisements, traitement des minerais, résultats économiques, par L. DE LAUNAY, ingénieur au corps des mines, professeur de l'École supérieure des mines. 1 volume grand in-8°, avec 81 figures dans le texte et 11 planches, relié. 15 fr.

Filons d'or de la Guyane française.

Les filons d'or de la Guyane française. — Formation géologique. — Travaux de recherche. — Conséquence de l'exploitation filonienne, par L. FERNAND VIALA, ingénieur civil des mines, ancien élève de l'École polytechnique. 1 volume in-8°. 5 fr.

Mont-Blanc.

Le massif du Mont-Blanc, étude sur sa constitution géodésique et géologique, sur ses transformations et sur l'état ancien et moderne de ses glaciers, par VIOLETT-LE-DUC. 1 volume in-8°, avec 112 figures dans le texte 10 fr.

Carte du Mont-Blanc.

Carte du massif du Mont-Blanc, dressée au 1/40,000^e, par E. VIOLETT-LE-DUC.
 4 feuilles imprimées en 12 couleurs 10 fr.
 Collée sur toile et en étui 17 fr.
 Collée sur toile, montée sur rouleaux et vernie 20 fr.

Recherches des eaux souterraines.

Sur la recherche des eaux souterraines, par P. F. CHALON, 1 brochure grand in-8^o, avec 25 figures dans le texte. 2 fr. 50

Sources.

L'art de découvrir les sources, par l'abbé PARAMELLE. 1 volume in-8^o, 4^e édition, revue, corrigée et augmentée. 6 fr. 50

Carte géologique de la France au 80 millième.

Carte géologique détaillée de la France à l'échelle du 80 millième publiée par le Ministère des Travaux publics, comprenant 267 feuilles de 94 centimètres sur 72 centimètres.

PRIX DE CHAQUE FEUILLE ACCOMPAGNÉE DE SA NOTICE EXPLICATIVE

En feuilles 6 fr.
 Collée sur toile et pliée. 10 fr.

Carte géologique de la France au 320 millième.

Carte géologique de la France à l'échelle du 320 millième publiée par le Ministère des Travaux publics. Chaque feuille de la carte au 320 000^e comprendra le contenu de 16 feuilles de la carte au 80 000^e.

LISTE DES FEUILLES PARUES AU 1^{er} AVRIL 1898

N^o 9. MÉZIÈRES correspondant aux n^{os} 9, 14, 15, 23, 24 et 25 de la carte au 80 000^e et comprenant en outre : 1^o une grande partie de la Belgique, notamment Bruxelles, Louvain, Mons, Charleroi, Namur, Liège et les Ardennes; 2^o le Luxembourg; 3^o en Allemagne, Aix-la-Chapelle, Düren.

N^o 13. PARIS correspondant aux n^{os} 30, 31, 32, 33, 46, 47, 48, 49, 63, 64, 65, 66, 78, 79, 80, 81 de la carte au 80 000^e

Prix : Collée sur toile et pliée 10 fr.
 En feuille. 6 fr.

Carte géologique de la France au millionième.

Carte géologique de la France à l'échelle du millionième exécutée en utilisant les documents publiés par le service de la carte géologique détaillée de la France par un comité composé de MM. Barrois, Bergeron, Bertrand, Depéret, Fabre, Fontannes, Fouqué, Gosselet, Jacquot, Lecornu, Lory, Michel Lévy, Potier et Vélain, sous la direction de MM. Jacquot, inspecteur général des mines, et MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines, 4 feuilles de 65 centimètres sur 60 centimètres, imprimées en 41 couleurs.

Prix : Collée sur toile et pliée. 15 fr.
 Collée sur toile, montée sur rouleaux et vernie. 20 fr. »
 En feuilles. 9 fr. 50

L'Ardenne.

L'Ardenne, par J. GOSSELET, professeur de géologie à la Faculté des sciences de Lille. 1 volume in-4^o contenant 26 planches en héliogravure tirées en taille-douce, 243 figures intercalées dans le texte et 11 planches de cartes et de coupes géologiques. 50 fr.

Carte géologique des environs de Paris.

Carte géologique des environs de Paris à l'échelle du 40 millième, publiée par le Ministère des Travaux publics, comprenant 4 feuilles de 84 centimètres sur 64 centimètres chacune.

Prix : En feuilles. 15 fr.
 Collée sur toile en 4 feuilles et pliée 25 fr.
 Collée sur toile, montée sur rouleaux et vernie. 30 fr.

Notice sur la carte géologique des environs de Paris.

Notice sur une nouvelle carte géologique des environs de Paris, par GUSTAVE DOLLFUS. 1 volume grand in-8°, avec 2 planches. 7 fr. 50

Carte géologique de l'Algérie au 800 millième.

Carte géologique de l'Algérie à l'échelle du 800 millième, publiée par le Ministère des Travaux Publics, sous la direction de MM. POMEL, directeur de l'École supérieure des sciences d'Alger et POUYANNE, ingénieur en chef des mines. 4 feuilles de 78 centimètres sur 38 centimètres, accompagnées d'un volume grand in-8°.

Prix : Collée sur toile et pliée	21 fr.
Collée sur toile, montée sur rouleau et vernie.	26 fr.
En feuilles	15 fr.

Bulletin de la Carte géologique de la France.

Bulletin des services de la Carte géologique de la France et des Topographies souterraines (Ministère des Travaux publics) publié sous la direction de M. MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines, avec le concours des professeurs, des géologues et des ingénieurs qui collaborent à la Carte géologique détaillée de la France et aux topographies souterraines publiées par le Ministère des Travaux publics.

Ce Bulletin paraît depuis le mois d'août 1889 par fascicules contenant chacun un mémoire complet, dont la réunion forme chaque année un beau volume grand in-8, accompagné d'un grand nombre de planches et avec de nombreuses figures intercalées dans le texte.

Prix de l'abonnement	20 fr.
Prix de l'année parue	20 fr.

Les tomes I à IX (Bulletins n^{os} 1 à 60) sont complets. Le tome X commence avec le Bulletin n^o 61.

Chacun des bulletins se vend séparément.

EXPLOITATION DES MINES

Législation des mines.

Législation des mines française et étrangère, 2^e tirage augmenté d'un Index alphabétique, par Louis AGUILLON, ingénieur en chef, professeur à l'École des mines de Paris. 3 volumes grand in-8° 40 fr.

Codes miniers.

Codes miniers. Recueil des lois relatives à l'industrie des mines dans les divers pays, publié sous la direction du COMITÉ CENTRAL DES HOULLÈRES DE FRANCE.

Russie, 1 volume grand in-8°	15 fr.
Belgique, 1 volume grand in-8°	10 fr.
Les autres pays. <i>En préparation.</i>	

Aide-mémoire du mineur.

Aide-mémoire du mineur. Description des principales matières minérales, programme d'une exploitation minière, sondages, abatage, percement des galeries, forage des puits, ventilation, éclairage, assèchement des mines, transports, extraction, translation des ouvriers, emploi de l'air comprimé, emploi de l'électricité, méthodes d'exploitation, levé des plans de mines, législation des mines, glossaire français-anglais-espagnol, tables et renseignements divers, par PAUL-F. CHALON, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume in-12, relié. 6 fr.

Exploitation des mines.

Exploitation des mines. — Gîtes minéraux. — Minéraux utiles non métallifères. — Minerais. — Eaux souterraines. — Marche générale d'une exploitation, recherches, aménagements. — Transmission de la force dans les mines. — Travaux d'excavation, outillage et procédés de l'abatage. — Sondages. — Puits, galeries, tunnels. — Aérage, éclairage. — Transports souterrains. — Extraction, descente des remblais, translation des ouvriers. — Assèchement des mines. — Méthodes d'exploitation. — Sièges d'exploitation, transports exté-

rieurs, manipulations au jour. — Préparation mécanique des minerais, épuration de la houille. — Accidents, personnel, loi des mines, prix de revient, par E. J. DORION, ingénieur civil, répétiteur à l'École Centrale. 4 volume grand in-8^o, avec figures dans le texte. 25 fr.

Exploitation des mines.

Cours d'exploitation des mines, professé à l'École centrale des arts et manufactures, par BURAT. 4 volume grand in-8^o et 4 atlas in-4^o de 143 planches doubles. 80 fr.

MÉTALLURGIE

Métallurgie du fer.

Manuel théorique et pratique de la métallurgie du fer, par A. LEDEBUR, professeur de métallurgie à l'École des mines de Freiberg (Saxe), traduit de l'allemand par BARBARY DE LANGLADE, ancien élève de l'École polytechnique, ingénieur civil des mines, maître de forges; revu et annoté par F. VALTON, ingénieur civil des mines, ancien chef de service des hauts fourneaux et aciéries de Terre-Noire. 2 volumes grand in-8^o, avec 350 figures dans le texte, reliés. 45 fr.

Métallurgie de l'acier.

La métallurgie de l'acier, par HENRY MARION HOWE, professeur à Boston (États-Unis), traduit par OCTAVE HOCK, ingénieur aux usines à tubes de la Société d'Escaut et Meuse, à Anzin, ancien chef de service des Aciéries d'Isbergues. 1 volume in-4^o, avec de nombreuses figures dans le texte, relié. 75 fr.

Métallurgie : Cuivre, plomb, argent et or.

Traité théorique et pratique de métallurgie : Cuivre, plomb, argent et or, par C. SCHNABEL, professeur de métallurgie et de chimie technologique à l'Académie des mines de Clausthal (Harz), traduit de l'allemand par le Dr L. GAUTIER. 1 volume grand in-8^o, avec 586 figures dans le texte, relié. 40 fr.

Métallurgie zinc, mercure, étain, etc.

Traité théorique et pratique de métallurgie : zinc, cadmium, mercure, bismuth, étain, antimoine, arsenic, nickel, cobalt, platine, aluminium, par C. SCHNABEL, professeur de métallurgie et de chimie technologique à l'Académie des mines de Clausthal (Harz), traduit de l'allemand par le Dr L. GAUTIER. 1 volume grand in-8^o, avec 373 figures dans le texte, relié. 30 fr.

Métallurgie.

Album du cours de métallurgie professé à l'École centrale des arts et manufactures, par JORDAN, ingénieur d'usines métallurgiques, professeur à l'École centrale. 1 atlas de 140 planches in-folio, cotées et à l'échelle, et 1 volume grand in-8^o. 80 fr.

Électrométallurgie.

Traité d'électrométallurgie. Magnésium, lithium, glucinium, sodium, potassium, calcium, aluminium, cerium, lanthane, didyme, cuivre, argent, or, zinc, cadmium, mercure, étain, plomb, bismuth, antimoine, chrome, manganèse, fer, nickel, cobalt, platine, etc., par W. BORCHERS, professeur à l'École de métallurgie de Duisburg, traduit d'après la deuxième édition allemande, par le Dr L. GAUTIER. 1 volume grand in-8^o, avec 198 figures dans le texte. 25 fr.

Voie humide. Cuivre, argent et or.

Extraction de cuivre, de l'argent et de l'or par la voie humide, par CH. DEFRANCE, ingénieur civil. 4 volume in-8^o, avec 22 figures dans le texte, relié. 7 fr. 50

Préparation des minerais.

Traité pratique de la préparation des minerais, manuel à l'usage des praticiens et des ingénieurs des mines, par C. LINKENBACH, ingénieur des usines à plomb argentifère d'Éms, traduit de l'allemand par H. COUTROT, ingénieur des mines. 1 vol. grand in-8°, avec 24 planches. Relié. 30 fr.

Trempe de l'acier.

Théorie et pratique de la trempe de l'acier, par FRIDOLIN REISER, directeur de l'aciérie de Kapfenberg, 2^e édition, traduit de l'allemand par BARBARY DE LANGLADE, ancien élève de l'École polytechnique, ingénieur civil des mines, maître de forges, 1 volume in-8°, relié. 7 fr. 50

Hauts fourneaux.

Construction et conduite des hauts fourneaux et fabrication des diverses fontes, par A. DE VATHAIRE, ancien directeur des hauts fourneaux de Bessèges, Saint-Louis, Marnaval, Forges de Champagne et Balaruc. 1 vol. grand in-8°, et 1 atlas in-4^e de 16 planches. 18 fr.

L'Art du mouleur.

L'art du mouleur. Manuel pratique pour le moulage des pièces devant être coulées en fonte de fer ou en acier, par A. TESSON, ancien chef d'atelier de fonderie, ancien élève des Ecoles nationales d'arts et métiers. 1 volume grand in-8°, avec 286 figures dans le texte, relié. 20 fr.

1359





ORIENTAÇÕES PARA O USO

Esta é uma cópia digital de um documento (ou parte dele) que pertence a um dos acervos que fazem parte da Biblioteca Digital de Obras Raras e Especiais da USP. Trata-se de uma referência a um documento original. Neste sentido, procuramos manter a integridade e a autenticidade da fonte, não realizando alterações no ambiente digital – com exceção de ajustes de cor, contraste e definição.

1. Você apenas deve utilizar esta obra para fins não comerciais. Os livros, textos e imagens que publicamos na Biblioteca Digital de Obras Raras e Especiais da USP são de domínio público, no entanto, é proibido o uso comercial das nossas imagens.

2. Atribuição. Quando utilizar este documento em outro contexto, você deve dar crédito ao autor (ou autores), à Biblioteca Digital de Obras Raras e Especiais da USP e ao acervo original, da forma como aparece na ficha catalográfica (metadados) do repositório digital. Pedimos que você não republique este conteúdo na rede mundial de computadores (internet) sem a nossa expressa autorização.

3. Direitos do autor. No Brasil, os direitos do autor são regulados pela Lei n.º 9.610, de 19 de Fevereiro de 1998. Os direitos do autor estão também respaldados na Convenção de Berna, de 1971. Sabemos das dificuldades existentes para a verificação se uma obra realmente encontra-se em domínio público. Neste sentido, se você acreditar que algum documento publicado na Biblioteca Digital de Obras Raras e Especiais da USP esteja violando direitos autorais de tradução, versão, exibição, reprodução ou quaisquer outros, solicitamos que nos informe imediatamente (dtsibi@usp.br).