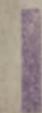


WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



626

L. inw.

CALON

EAUX SOUTERRAINES
RECHERCHE
CAPTAGE ET PURIFICATION

PARIS & LIÈGE
CH. BÉRANGER EDITEUR

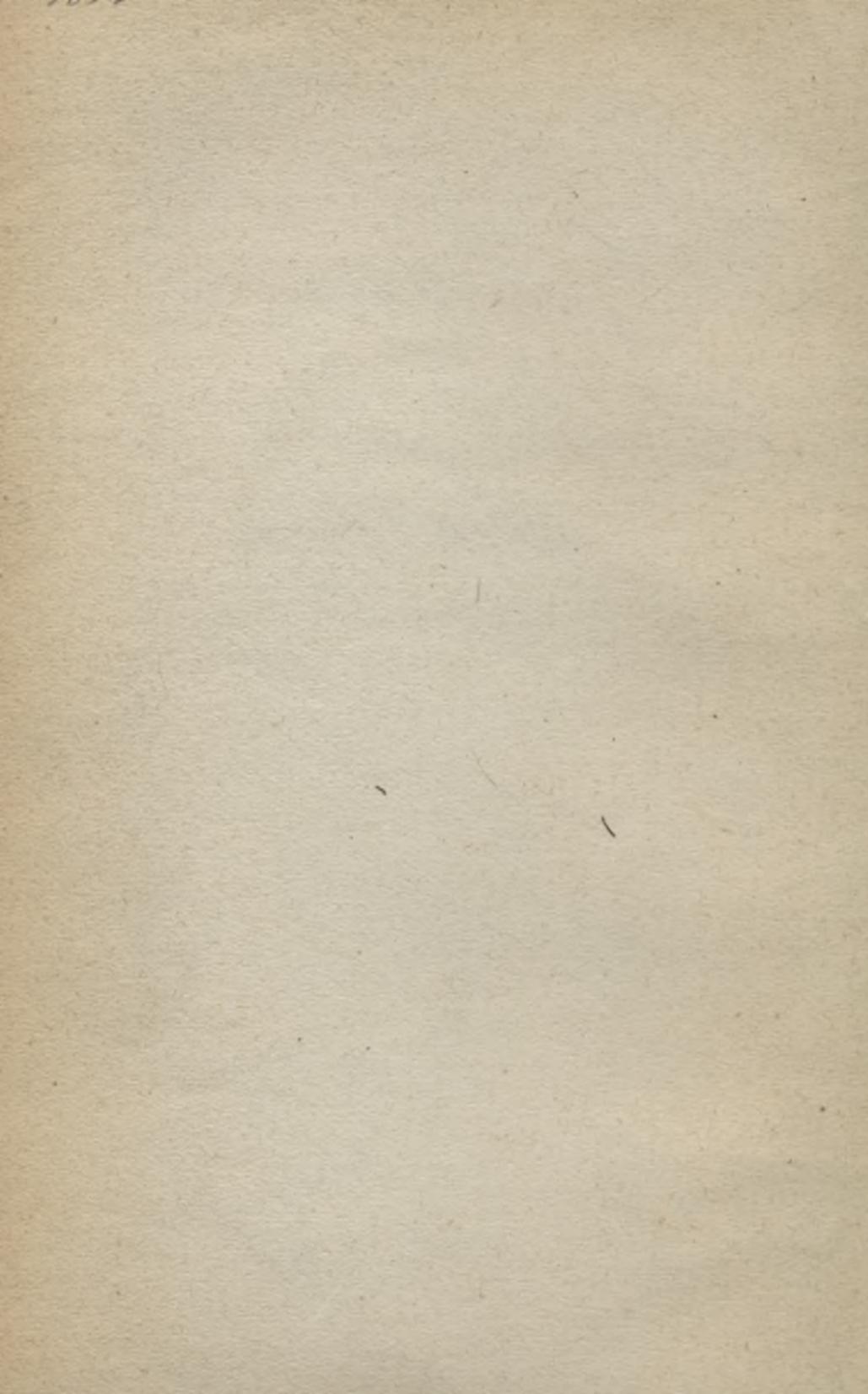
Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000296209



Königl. Ministerium
der
Öffentlichen Arbeiten
Bibliothek



LES
EAUX SOUTERRAINES



838
156

x
727

LES
EAUX SOUTERRAINES

RECHERCHE
CAPTAGE ET PURIFICATION

PAR

PAUL-F. CHALON
Ingénieur-Conseil des Mines,
Chevalier de la Légion d'honneur.

TROISIÈME ÉDITION, ENTIÈREMENT REFONDUE

Avec 86 figures dans le texte.

7230595



PARIS ET LIÈGE

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, CH. BÉRANGER, ÉDITEUR
PARIS, 45, RUE DES SAINTS-PÈRES, 45
LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE, 21

1913

Tous droits réservés.

538
156



I 626

Ak. Nr. 2499/50

EAUX SOUTERRAINES

INTRODUCTION

L'hydrologie souterraine est l'étude des eaux qui circulent à l'intérieur du globe. C'est une science encore peu connue, qui manque de règles claires et suffisamment pratiques, et qu'il n'est pas possible de définir rigoureusement par un ensemble de lois précises.

Cependant son utilité est incontestable, car elle s'applique non seulement à la recherche des eaux destinés à l'alimentation et aux usages industriels, mais encore aux travaux agricoles, aux études de distribution d'eau et à l'assèchement des mines. Elle explique certaines formations naturelles, les phénomènes de minéralisation, etc. Elle montre, en un mot, le rôle capital

des eaux dans l'économie générale du globe, ainsi que leur influence sur la santé de l'homme et l'hygiène des agglomérations urbaines.

Jusqu'au milieu du siècle dernier, la profession de *sourcier* ou de *fontainier* était accaparée par quelques empiriques, gens le plus souvent dénués d'instruction, mais qu'une sérieuse pratique guidait dans la recherche des sources par l'observation de certains signes extérieurs dénonçant le voisinage des eaux. Il y avait aussi, et il y a encore, les *bacillogyres* qui opèrent avec une baguette fourchue dont les deux branches, serrées dans les mains, se mettent en mouvement lorsqu'on la tient au-dessus d'une eau souterraine *courante*.

L'application de la *baguette divinatoire* à la recherche des eaux remonte au commencement du xvii^e siècle ; ses premiers adeptes furent des moines Bénédictins. Plus tard, les pères Jésuites la préconisèrent en France et en Allemagne, tout en attribuant une origine *diabolique* à des effets qu'ils constataient sans pouvoir les expliquer.

C'est qu'en effet on n'a jamais su donner de raisons précises à ces singuliers mouvements. Successivement on les a attribués à une certaine

prédisposition nerveuse ou à une sensibilité spéciale de l'opérateur, à des effluves magnétiques ou électriques, et enfin à la radio-activité des eaux qui circulent dans le sous-sol.

En 1914, il s'est constitué en Allemagne une société dont le but est l'élucidation de ce troublant problème ; c'est la *Verband zur Klärung der Wunschelrutenfrage*. Cette association contrôle les opérations des bacillogyres et en recueille avec soin toutes les particularités afin d'arriver à les codifier autant que possible.

On peut donc espérer que la rabdomancie sortira quelque jour de cette vague *sorcellerie* à laquelle de bons esprits persistent à la rattacher, et deviendra une science expérimentale avec des règles et des lois simples.

Déjà on a pu constater que le pouvoir divinatoire des bacillogyres ne réside pas dans la nature de la baguette elle-même et que celle-ci peut être indifféremment en bois, corne, baleine, celluloïd, fer ou acier. C'est donc l'opérateur qui se trouverait personnellement influencé ou *sensibilisé* par une sorte d'effluves émanant des eaux souterraines en mouvement.

Toutefois la baguette de bois a eu longtemps la préférence des sourciers, ou *sorciers* comme

on les appelait ; ceux-ci conseillaient l'emploi d'un bois souple, léger et poreux comme le noisetier. Les maîtres-bacillogyres faisaient usage d'une fourche dont les branches, écartées de 30 à 50 degrés et mesurant 50 à 60 centimètres de longueur et 5 à 8 millimètres de diamètre, se raccordent à une tige de 6 à 8 centimètres.

Le bois doit être assez souple pour se recourber sans se casser dans les mains qui l'enserrent, et son écorce ne doit présenter aucune solution de continuité.

De nos jours, les bacillogyres allemands préfèrent opérer avec une fourche en fer ou en acier de 3 millimètres de diamètre.

Le chercheur de sources, serrant sa baguette horizontalement à la hauteur des coudes, les paumes des mains en dessous, s'avance lentement et observe les impressions de son instrument qui se dresse ou s'abaisse selon les cas.

Il semble que la tige de la fourche jouerait un rôle analogue à celui des pointes en électricité et recueillerait, pour les faire passer dans le corps de l'opérateur, certaines effluves émanant des eaux en mouvement. S'il en était ainsi, il y aurait avantage à aiguiser cette tige, ou encore à la coiffer d'un léger cône métallique ou autre,

afin d'augmenter encore sa puissance réceptive et, par suite, l'effet exercé sur l'organisme sensible du bacillogyre.

L'abbé Paramelle qui, le premier, appliqua les connaissances scientifiques de la stratigraphie à la recherche des sources, a fait une enquête statistique sur les travaux des bacillogyres de son temps. Dans la préface de la première édition de son ouvrage « *L'art de découvrir les sources* », publiée en 1856¹, il affirme que, sur plus de six mille sources indiquées par lui, il ne s'en est trouvé qu'un très petit nombre concordant avec les dires des *joueurs de baguette* qu'il mettait en concurrence, et il en conclut² :

« 1° La baguette tourne spontanément entre les mains de certains individus doués d'un tempérament propre à produire cet effet.

« 2° Ce mouvement est déterminé par des fluides qui ne peuvent tomber sous nos sens, tels que l'électricité, le magnétisme, etc.

« 3° Elle tourne indifféremment sur les

¹ L'abbé Paramelle (1790-1875) avait présenté en 1827, au Conseil général du Lot, un mémoire sur l'art de découvrir les sources ; c'est le développement de ce mémoire qui constitua, en 1856, la première édition de son fameux ouvrage.

² M. l'abbé Paramelle. *L'art de découvrir les sources*. Préface. p. III. Paris, 1856.

endroits où il n'y a pas le moindre filet d'eau souterrain, comme sur ceux où il y en a et, par conséquent, elle ne peut servir à rien dans l'indication des sources. »

C'est, comme on le voit, une constatation du mouvement de la baguette et, en même temps, une affirmation de son impuissance à préciser les recherches des sources.

Déjà, avant l'abbé Paramelle, l'illustre chimiste Chevreul avait nettement anathématisé les *joueurs de baguette*. Dans une lettre à Ampère, publiée en 1833 par la *Revue des Deux Mondes*, il rendait compte des expériences qu'il fit en 1812 « pour savoir s'il est vrai qu'un pendule lourd oscille lorsqu'on le tient à la main au-dessus de certains corps, quoique le bras soit immobile. »

Puis, passant aux opérations des bacillogyres, Chevreul ajoutait en matière de conclusion :

« Je conçois très bien qu'un homme de bonne foi, dont l'attention tout entière est fixée sur le mouvement qu'une baguette qu'il tient entre ses mains peut prendre par une cause qui lui est inconnue, pourra recevoir, de la moindre circonstance, la tendance au mouvement nécessaire pour amener la manifestation du phénomène qui l'occupe.

« Par exemple, si cet homme cherche une source et qu'il n'ait pas les yeux bandés, la vue d'un gazon vert abondant sur lequel il marche pourra déterminer en lui, à son insu, le mouvement musculaire capable de déranger la baguette, par la liaison établie entre l'idée de la végétation active et celle de l'eau ».

Mes expériences prouvent, dit encore Chevreul, « combien il est facile de prendre des illusions pour des réalités toutes les fois que nous nous occupons d'un phénomène où nos organes (musculaires et visuels) ont quelque part, et cela dans des circonstances qui n'ont pas été analysées suffisamment ».

C'est ce que l'on pourrait résumer en cette pensée de Pasteur : « *Le plus grand dérèglement de l'esprit est de croire aux choses parce qu'on veut qu'elles soient.* »

Mais quoi qu'il en soit de l'opinion et de l'affirmation des savants, il n'en est pas moins certain que les bacillogyres arrivent à rendre de très réels services ; à la suite d'une longue pratique, ils acquièrent cette perspicacité et ce savoir-faire que les sourciers et les aquilèges romains pouvaient dans une observation raisonnée des signes extérieurs.

C'est pourquoi la découverte des eaux par l'énigmatique baguette restera longtemps encore le privilège d'un petit nombre d'élus, joignant à une certaine sensibilité pathologique une longue pratique du métier et, ce qui ne leur nuit pas, des connaissances empiriques d'hydrologie.

Dernièrement, on a proposé de recourir aux ondes électriques pour déceler la présence des eaux souterraines. On sait que les roches possédant toutes, lorsqu'elles sont à l'état sec, la même conductibilité électrique et la même constante diélectrique, sont facilement traversées par le courant électrique. Mais lorsqu'elles sont imbibées d'eau, celle-ci agit comme un écran, arrête les ondes et les réfléchit.

Si donc on dirige les ondes à l'intérieur du sol avec un appareil *émetteur*, elles sont arrêtées et renvoyées lorsqu'elles battent contre une roche mouillée ou une nappe d'eau ; on peut, dès lors, les recueillir sur un *récepteur*.

La présence des eaux pourrait donc être décelée par le retour des ondes ; mais cet effet résulte aussi de diverses autres causes, la rencontre des ondes avec un gisement métallifère, par exemple.

C'est pourquoi le procédé est d'ordre purement théorique.

Je citerai encore une tentative, de nature différente il est vrai, faite en 1908 par M. Diénert, ingénieur du Service des eaux de la ville de Paris, pour distinguer, au bruit, le mouvement des eaux souterraines¹. Il se sert dans ce but d'un appareil acoustique spécial, l'**acoustelle Daguin**.

Cet appareil paraît être en état de contrôler par le son tout passage d'eau qui circule souterrainement en ruisselant, ou même de simples infiltrations accidentelles dans les canalisations ; mais il ne saurait indiquer la présence des eaux qui imbibent les terrains perméables et cheminent lentement et sans bruit.

Les anciens peuples, pour lesquels la culture de la terre répondait au premier des besoins, ne s'en remettaient pas au hasard dans la recherche et l'utilisation des eaux et se transmettaient, de génération en génération, les règles empiriques nées de l'observation et de l'expérience.

Les *aquilèges* romains avaient codifié, pour ainsi dire, toutes les indications suggérées par les signes extérieurs et trouvaient en certains ouvrages tels que les livres d'agriculture

¹ Communication de MM. Diénert, Guillerd et Marrec. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1908, n° 22.

du Carthaginois Magon traduits en latin par Decius Silanus, l'*Architecture de Vitruve*, l'*Histoire naturelle de Pline*, etc., de véritables traités qui les guidaient dans leurs études et la pratique de leur profession.

On sait la merveilleuse transformation qu'ils ont faite de l'Afrique romaine. Cette région stérile et presque désertique finit par devenir le grenier de Rome, tant leurs recherches d'eau et leurs irrigations furent habilement conduites.

Il est même curieux de constater que, jusqu'au XIX^e siècle, la science hydrologique n'a guère connu d'autres formules et pratiques que celles des aquilèges anciens.

C'est à l'abbé Paramelle qu'il faut attribuer l'honneur d'avoir, le premier, tenté d'appliquer, d'une manière rationnelle, la connaissance stratigraphique des terrains à l'étude de l'hydrologie et aux recherches d'eau.

Dans son remarquable ouvrage de 1856, il indique les moyens propres à étudier la circulation des eaux souterraines, et cite, à l'appui de ses théories, les nombreuses sources qu'il a découvertes en divers points de la France.

Depuis l'année 1856, beaucoup de progrès ont été réalisés dans cette voie, particulièrement par

le savant ingénieur Belgrand qui a étudié avec tant de soin les eaux du bassin de la Seine, mais il n'en reste pas moins indéniable que les travaux du célèbre abbé ont servi à établir les bases principales de l'hydrologie souterraine, et ont contribué dans une large mesure à en faire une science expérimentale relevant de la géologie en général et de la stratigraphie en particulier.

Les travaux d'Elie de Beaumont et de Dufrénoy, et plus tard ceux de Delesse, Burat, B. von Cotta, Dana, Daubrée, A. von Groddeck, Lyell, Phillips, Posepny, de Launay, etc., ont jeté une vive lumière sur la question des formations géologiques et ont ainsi facilité l'étude et la recherche scientifique des eaux souterraines. A la vérité, les études de ces savants ingénieurs et géologues ont principalement eu pour objet la genèse et la reconnaissance des gisements métallifères et minéraux, mais la corrélation de ceux-ci avec les eaux minéralisées, ascendantes ou descendantes, est si grande et, j'ajouterai, si incontestable, que l'étude des uns procède presque toujours de l'étude des autres.

En ces derniers temps, les publications du **Geological Survey**, aux États-Unis, ont puissam-

ment contribué à la diffusion des connaissances hydrologiques. La générosité avec laquelle cette célèbre institution distribue, dans le monde entier, les études professionnelles de ses membres, me fait un devoir de lui témoigner ici ma reconnaissance personnelle.

Les publications relatives aux eaux sont classées dans les séries suivantes :

Série I. Irrigations.

— J. Captage des eaux.

— L. Qualités des eaux.

— M. Recherches générales sur l'hydrographie.

— O. Eaux souterraines.

— P. Rapports sur les progrès de l'hydrographie.

En particulier, il convient de citer le remarquable ouvrage de M. Clarke qui fait partie de la **série E (Chimie et Physique)** et qui étudie, au point de vue géochimique, l'atmosphère, les eaux et les roches¹.

¹ *The Data of Geochemistry, by Frank Wigglesworth Clarke, Chief-chemist of the United States geological Survey, Washington, 1908.*

PREMIÈRE PARTIE

**RECHERCHE ET CAPTAGE
DES EAUX SOUTERRAINES**

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS DE GÉOLOGIE ET DE STRATIGRAPHIE APPLICABLES AUX RECHERCHES HYDROLOGIQUES

I

LES ROCHES

La stratigraphie est cette branche de la géologie générale¹ qui étudie les reliefs du sol et la superposition des terrains, elle est l'auxiliaire indispensable de toute recherche hydrologique.

On désigne sous le nom de *roches* les forma-

¹ Le célèbre géologue américain James D. Dana divise la géologie en quatre parties :

1° *La géologie physiographique* qui passe en revue les traits généraux de la surface terrestre.

2° *La géologie lithologique* qui s'occupe de la constitution des roches.

3° *La géologie historique ou stratigraphie* qui étudie le sol et l'arrangement de ses strates.

4° *La géologie dynamique* qui traite des causes et de l'origine des événements de la géologie historique.

tions naturelles, *compactes* ou *non compactes*, ces dernières étant représentées par les sables, les graviers, les terres meubles, les éboulis, etc.

Au point de vue de leur origine, on les classe en :

Roches éruptives, à structures granitoïde, schistoïde, porphyroïde ;

Roches ignées ou volcaniques ;

Roches sédimentaires.

1° ROCHES ÉRUPTIVES

Les roches éruptives sont d'origine profonde et hydropâteuse, leur texture¹ est cristalline ou amorphe ; elles affectent principalement des structures granitoïde, porphyroïde et schistoïde.

On les rencontre en amas, bancs et dykes.

En s'altérant à l'air, les roches éruptives, aussi bien que les roches volcaniques, donnent

¹ La *texture* ou *grain* d'une roche est cristalline, amorphe, euritique, aphanatique, vitreuse, etc., elle caractérise la forme de ses éléments.

La *structure* est la disposition d'ensemble des divers éléments ou la manière d'être des roches : granitoïde, porphyroïde, schistoïde, stratifiée, laminaire, fibreuse, feuilletée, fluidale, etc.

naissance à de nouvelles roches très importantes. Ainsi :

Par *serpentinisation*, les roches vertes (péridotites, diabases, diorites, gabbros, etc.) se transforment en produits serpentineux vulgairement désignés sous le nom de *serpentes*.

Par *chloritisation*, les roches vertes feldspathiques (diorites, diabases et gabbros) donnent des produits chloritiques.

Par *ouralitisation*, les roches à pyroxène deviennent des roches amphiboliques ; en particulier, les roches augitiques, en s'ouralitisant, perdent leur fer et une partie de leur silice.

La *latérisation* altère les diabases par oxydation, hydratation et élimination de certains éléments ; elle les transforme en *latérites*, roches rougeâtres, riches en fer, ou en roches riches en hydrate d'alumine comme la bauxite.

ROCHES GRANITOÏDES. — Leur type est le **granite** qui est constitué par trois éléments minéraux : *feldspath*, *quartz* et *mica*, et dont les principales familles sont :

Les **syénites**, roches de couleur gris, gris foncé, rouge. Ce sont des granites à feldspath et hornblende, avec peu ou point de quartz ou de mica.

Les **diorites**, composées de feldspath avec amphibole vert foncé ou noir et dont la couleur varie du gris au vert foncé.

Les **diabases** et **gabbros**, roches vertes à feldspath et pyroxène augite ou diallage.

ROCHES PORPHYROÏDES. — Ces roches ont pour type le **porphyre**, composé d'une pâte feldspathique homogène dans laquelle sont englobés des cristaux clairs de feldspath qui se détachent sur la pâte généralement plus colorée.

Parmi les roches porphyriques, on peut citer :

Les **porphyres quartzifères**, dont la pâte est parsemée de cristaux de quartz. Leur couleur varie du gris clair au rouge et leur cassure est esquilleuse (*eurite* ou *pétrosilex*, *felsite*).

Les **porphyres feldspathiques**, à pâte rouge, qui, par décomposition, se transforment en grès rouge et donnent une *roche euritique* quand les cristaux disparaissent.

Les **porphyres amphiboliques**, roches verdâtres dont la pâte englobe des cristaux de feldspath et d'amphibole ; lorsqu'ils tendent à prendre la texture granitique, ils passent à la **diorite** et aux **ophites verts et bruns**.

Le **porphyre pyroxénique** ou **mélaphyre**, com-

posé d'une pâte de pyroxène augite et labrador avec de petits cristaux de labrador. Sa couleur est vert foncé, quelquefois noire.

Les **trapps**, à grains très fins confondus dans la pâte, avec biotite ou mica noir. Leur couleur est noire, brune ou vert foncé : on les désigne, dans les charbonnages, sous le nom de *roches noires*.

Les **péridotites** sont des roches vertes sans feldspath dont l'élément principal, le *péridot* ou *olivine*, est associé à un pyroxène ou à la biotite ; on les trouve localisées dans les gneiss et les schistes cristallins en dykes ou en masses lenticulaires.

La **serpentine** est une roche éruptive fréquemment associée aux diorites, diabases, gabbros et péridotites.

Les **roches serpentineuses**, vulgairement appelées *serpentes*, sont des produits d'altération des péridotites, gabbros, diabases et dolérites. Ces roches sont amorphes, hydratées, à pâte grenue traversée par des veines de calcite, de couleur généralement verte, quelquefois brune ou rouge.

ROCHES SCHISTOÏDES. — Ce sont les **gneiss** et

les **schistes cristallins** qui constituent le substratum des formations sédimentaires.

Elles sont cristallines et d'apparence schisteuse.

2^o ROCHES VOLCANIQUES

Ce sont des roches éruptives ignées, jeunes ou modernes, dont la texture compacte, cellulaire ou vitreuse indique une fusion ignée.

Elles comprennent :

Les **trachytes**, composés d'une pâte feldspathique vitreuse avec cristaux fins de sanidine (*variété d'orthose*) et de microlite (*variété de plagioclase*). Ces roches sont blanches ou grises, quelquefois teintées en brun par des oxydés de fer.

Les **obsidiennes**, ou trachytes noirs, qui ont l'éclat et la fragilité du verre, avec une cassure conchoïdale analogue.

Les **ponces**, variétés d'obsidienne spongieuse et légère, de teinte blanc grisâtre.

Les **laves**, les **wackes**.

Les **basaltes** que caractérisent leur couleur noire, une grande dureté et une cassure prismatique ou sphéroïdale.

Le basalte est l'équivalent jeune de la diabase à olivine et des mélaphyres anciens. Il abonde dans les régions volcaniques en coulées de prismes accolés et formant des filons, des dômes ou des nappes à division colonnaire; il date de l'époque tertiaire et se rencontre dans le crétacé.

3° ROCHES SÉDIMENTAIRES

Les terrains sédimentaires, qui intéressent particulièrement l'hydrologue, sont tous *stratiformes*. Ce sont des dépôts formés au sein des eaux par des apports provenant de la désagrégation des roches anciennes. Ils comprennent :

Des roches siliceuses : sables, graviers, grès, silex, poudingues.

Des roches argileuses : argiles, marnes, schistes argileux.

Des roches calcaires : pierres calcaires, dolomie, marbres, albâtres, gypses, conglomérats.

Les roches éruptives et volcaniques sont des produits d'émanation directe, des roches *primaires*; tandis que les roches sédimentaires sont d'ordre *secondaire* et procèdent des roches primaires par remaniement ou altération.

Les terrains sédimentaires sont classés géologiquement d'après leur âge, leurs caractères stratigraphiques, leur mode d'alternance et certains fossiles spéciaux, en groupes ou époques, systèmes ou périodes, âges ou étages et sous-étages.

II

STRATES ET TERRAINS STRATIFIÉS

Quand la croûte solide du globe a commencé à se former, elle s'est trouvée en butte aux attaques des agents extérieurs et aux dislocations et ruptures résultant de mouvements séismiques. Ces agents et effets ont produit, par dénudation et désagrégation, des dépôts ou *sédiments*, origine des terrains sédimentaires.

Les roches siliceuses ont fourni des galets, des graviers et des sables, les roches feldspathiques des boues argileuses, les gneiss du sable fin, etc., et il s'est produit, au sein des eaux, des sédiments de vase qui sont devenus les **schistes**, des sédiments de sable qui ont donné naissance aux **grès**, des sédiments de cailloux,

origine des brèches, poudingues et conglomérats¹.

Ce mode de formations explique l'ordre et la superposition des dépôts sédimentaires en couches alternées ou *strates* que l'on désigne, d'après leur puissance et leur conformation, par les noms caractéristiques de *feuillets, lits, bancs, couches, amas, massifs*.

Tous ces matériaux de sédiment ont été déposés horizontalement au fond des eaux; puis ils se sont consolidés peu à peu ou se sont agglomérés sous pression au moyen de ciments spéciaux, comme :

La *silice*, le plus puissant de tous, qui unit les matières pulvérulentes de grès pour former les quartzites;

Les *oxydes de fer et de manganèse cristallisés*, tels que la magnétite, l'hématite, la pyrolusite;

Le *carbonate de chaux, cristallisé ou non*;

Les *oxydes de fer et de manganèse et le calcaire amorphes*;

Les *argiles ferrugineuses*;

Et enfin les *argiles kaoliniques*, qui sont les ciments les moins énergiques.

¹ Le poudingue est formé de cailloux siliceux, le conglomérat de fragments calcaires.

Les terrains sédimentaires ne sont pas exclusivement d'origine lacustre ou marine, quelques-uns proviennent de dépôts végétaux, comme les tourbes. D'autres ont une origine animale : craies, farines fossiles, etc. Quelques-uns sont des dépôts chimiques : gypse, meulière, argile réfractaire, etc.

En général, les surfaces qui séparent des strates superposées sont parallèles, quoique présentant des inégalités ou même des sillons. Mais leur composition peut varier ; elle change parfois d'une strate à l'autre par modification des éléments constituants ou prédominance subite de l'un d'eux, ou encore par l'introduction d'un nouvel élément, ou enfin par suite d'une transformation d'ordre physique : un grès, par exemple, passant par effritement au sable et par métamorphisme au quartzite.

Il convient ici de rappeler qu'il existe des roches d'apparence schisteuse qui ne sont pas stratifiées. Ainsi l'apparente schistosité des gneiss, des schistes cristallins, etc., est due à l'accumulation en couches plus ou moins régulières et ondulées, d'un ou de plusieurs de leurs éléments constitutifs. C'est le mica, par exemple, dont les paillettes se sont rassemblées en feuillets

ou en lits, qui donne aux micaschistes leur arrangement schistoïde.

Il est à remarquer d'ailleurs que, dans ces cas spéciaux, les fausses strates sont très irrégulières d'épaisseur; de plus, elles sont ondulées, plissées, ridées, effilées, concrétionnées, etc.

Les strates ont le plus souvent perdu leur position originelle d'horizontalité; elles sont inclinées, courbées, pliées, fracturées, ou dénudées. On les définit par leur *inclinaison*¹, ou ligne de plus grande pente, et par leur *direction* qui est celle d'une ligne horizontale contenue dans leur plan et perpendiculaire à l'inclinaison.

Une strate horizontale peut se relever ensuite et même reprendre son inclinaison primitive. Quand elle se relève ou s'abaisse brusquement, il y a formation d'un pli dit *monoclinal*.

Si, en une région quelconque, il y a affaissement d'une strate, la partie rentrante constitue un *ploiement synclinal*; si au contraire elle se relève en voûte, elle est *anticlinale*.

Par analogie, une vallée est dite *synclinale* quand les strates qui la limitent sont relevées, *anticlinale* lorsqu'elles sont au contraire plon-

¹ On dit aussi *plongement* ou *pendage*.

geantes et **monoclinale** si elle ne comporte qu'un seul versant.

La fréquente répétition de ces mouvements donne lieu à une stratification d'apparence ondulée ou en *zigzag*.

Quelquefois une strate est pliée sous un angle

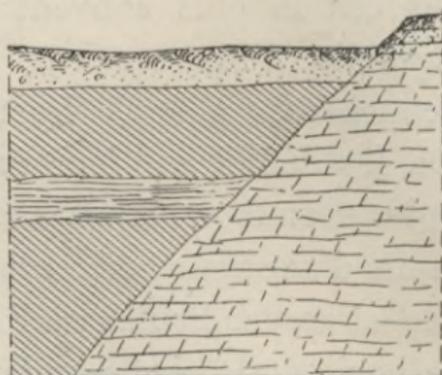


Fig. 4. — Exemple de stratification transgressive.

tellement aigu qu'une de ses ailes est renversée sur l'autre ; on dit alors que le pli est *isoclinal* ou *couché*.

Sous l'influence d'une poussée nouvelle, un anticlinal peut être disloqué, couché et même charrié à distance ; il peut ainsi être amené à recouvrir un terrain plus récent. Ce phénomène de transport constitue une anomalie qui peut induire en erreur dans la reconnaissance de strates superposées ; il convient donc de vérifier

avec soin ce qui n'est qu'un *mort-terrain* ou une *nappe de charriage*, pour employer l'expression de M. Marcel Bertrand.

Lorsque plusieurs strates se superposent parallèlement, la stratification est *concordante* ; elle est *transgressive* ou *discordante* dans le cas

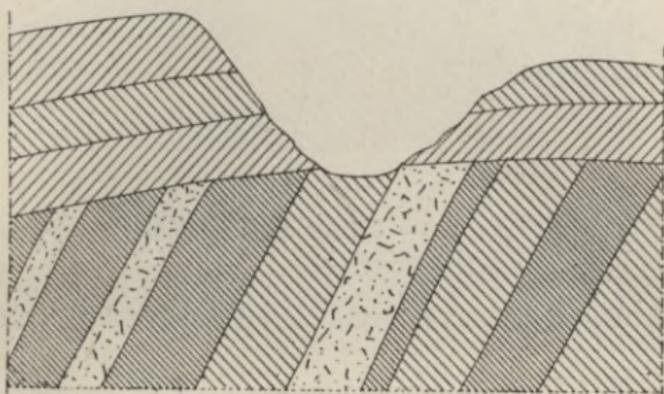


Fig. 2. — Exemple de stratification discordante.

contraire : *transgressive*, si l'un des systèmes repose sur une seule strate de l'autre (fig. 1), *discordante* s'il repose sur plusieurs strates (fig. 2).

Les terrains sédimentaires sont disloqués par de nombreuses fractures ou *failles* qui ont été remplies de matériaux meubles ou rocheux et qui ont fini par modifier considérablement le relief des terrains ; il en résulte, pour le géologue, de grandes difficultés à la reconnaissance et à l'étude des strates.

C'est ainsi qu'une cassure superficielle *aab* (fig. 3) résultant d'un soulèvement ou même

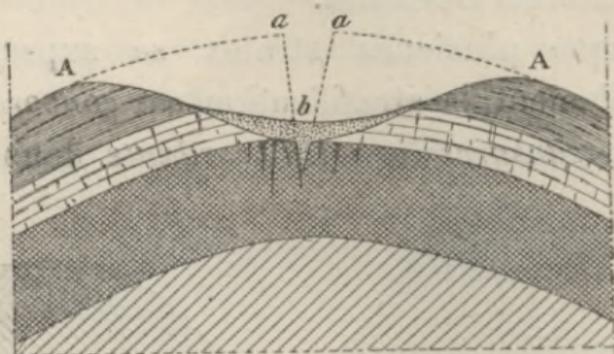


Fig. 3. — Vallée anticlinale.

d'un simple mouvement séismique a provoqué,

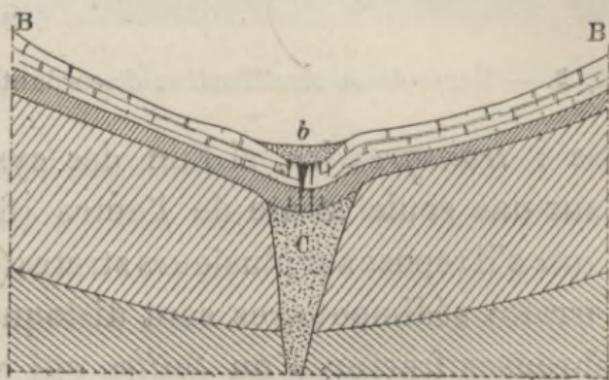


Fig. 4. — Vallée synclinale avec affaissement.

par dénudations successives, la formation d'une vallée anticlinale *AbA* sur un synclinal géologique.

Un affaissement de terrain peut également donner naissance à une vallée du même genre qui sera, suivant les cas, *monoclinale* ou même *synclinale*. La figure 4 montre une vallée synclinale au fond de laquelle s'est produit un affais-

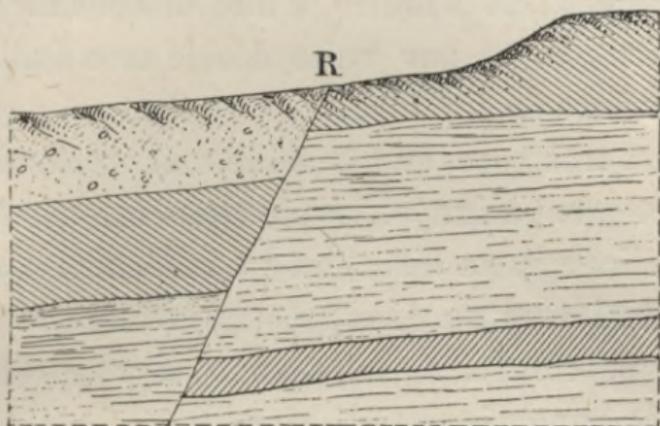


Fig. 5.

sement *b* résultant d'une fracture C du sous-sol. Cette fracture est souvent dénoncée par la présence de ces entonnoirs souterrains absorbants qui sont connus sous les noms divers de **bétoires**, **boit-tout**, **béthunes**, etc.

Le plus généralement le terrain fracturé s'est affaissé d'un côté de la faille (fig. 5), puis à la suite de désagrégations et d'apports terreux, la solution de continuité est devenue invisible; toutefois, une observation attentive permet

presque toujours de reconnaître une crête rocheuse R qui dénonce la fracture.

C'est surtout dans les ravins et les falaises que l'on retrouve facilement les failles.

Quelquefois un dépôt de conglomérats ou de poudingues est l'indice d'une discordance de stratification et par suite décèle une faille ou une surface de fracture.

Il est très rare que la faille soit verticale ou correctement alignée. Le plus généralement elle est inclinée et sa direction est infléchie; d'autre part, ses lèvres ou *épointes* sont très écartées ou bien, au contraire, elles sont si rapprochées qu'elles apparaissent jointives.

La recherche des failles présente la plus grande importance en hydrologie, car elles jouent un rôle important dans la distribution des eaux souterraines en facilitant le passage et l'infiltration de l'eau météorique; d'autre part, les solutions de continuité et les rejets qu'elles occasionnent dans l'allure des strates rompent l'équilibre des couches aquifères en mouvement.

La faille, comme toutes les autres fractures superficielles du sol, est comblée par des apports de terres et de fragments pierreux empruntés aux

roches encaissantes. Quelquefois elle a favorisé l'intrusion d'un dyke éruptif qui s'est ensuite épanché sur le sol en une masse rocheuse ; d'autres fois, elle comporte un remplissage de filon métallifère ou d'une veine minéralisée de baryte, quartz, quartzite, calcite, fluorine, etc.

Les failles et, en général, les fractures affectent non seulement les strates mais encore les roches éruptives qui traversent les terrains sédimentaires. Il arrive même qu'elles modifient la nature des strates traversées en les *métamorphosant* ; ainsi les calcaires sont transformés en marbres, les grès en quartzites, les schistes en phyllades et phyllites, etc.

Enfin les failles, au lieu de constituer un accident simple et isolé, peuvent être multiples et, dans ce cas, elles modifient considérablement l'allure du sous-sol.

La figure 6 donne une idée d'une semblable perturbation ; c'est la coupe verticale du terrain jurassique, entre Larocheport et Meursault (Côte-d'Or). Sur une longueur de 8 kilomètres, sept failles consécutives ont opéré un bouleversement complet, en déplaçant les couches superficielles dans le sens de la verticale.

A la surface du sol, la faille 2 se distingue

nettement ; elle sépare des marnes et des calcaires et ceux-ci, par leur versant raide, contrastent visiblement avec les versants doux qui signalent les marnes.

Les autres failles sont moins caractérisées ;



Fig. 6.

aussi sont-elles peu reconnaissables quand elles ne sont pas, comme la faille 7, entièrement dissimulées ou cachées sous une grande épaisseur d'alluvions.

Entre les failles 1 et 2 apparaît la roche éruptive à peu de distance du sol, sous les marnes du lias.

Mais ce ne sont pas seulement les cassures qui modifient l'aspect des strates, d'autres causes jouent un rôle analogue. Ainsi la figure 7 montre, dans une coupe de plateau, un amas lenticulaire de sable A, accusé par la sonde P, entre un banc de calcaire et une strate imper-

méable. Le calcaire est très fissuré et on reconnaît, avec un peu d'attention, qu'il s'est affaissé latéralement. Ce fait indique qu'il existait primitivement (fig. 8) une strate *aa* de sable dont

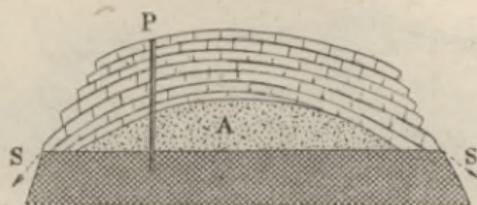


Fig. 7.

les deux affleurements ont disparu peu à peu par entraînement, à la faveur des eaux affluant du calcaire, et que les bords de celui-ci se sont



Fig. 8.

lentement affaissés jusqu'à rejoindre le sol imperméable.

Dans d'autres circonstances, les ravinements ont découvert une saillie des dykes éruptifs en désagrégeant les roches moins dures qui les

encaissent ; ils ont ainsi déterminé la formation de petits vallonnets (fig. 9).

Dans ce même ordre d'idées, les falaises présentent des exemples typiques de l'usure des

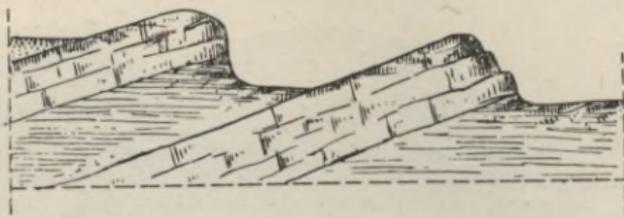


Fig. 9.

roches, de duretés différentes, par la mer, les sables et les vents. C'est ainsi que s'expliquent ces formations si curieuses et si pittoresques de

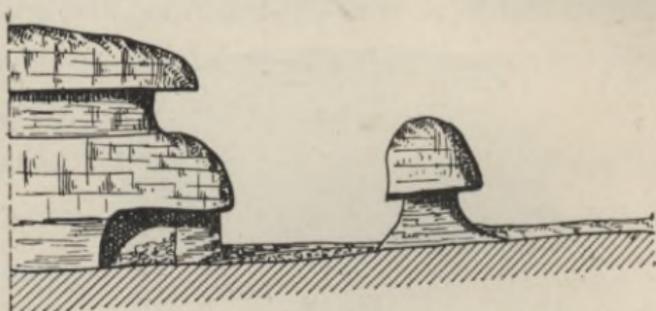


Fig. 10.

corniches, grottes, blocs isolés, qu'on observe sur les littoraux (fig. 10).

Au point de vue topographique, le relief du sol comprend des *plains*, des *plateaux*, des

vallées, des *collines* et des *montagnes* ; ces dernières formant des *chaînes* et des *massifs montagneux*.

Les chaînes sont composées de chaînons séparés par des vallées longitudinales, et de contreforts donnant naissance à des vallées transversales.

C'est surtout par des effets d'érosion¹ et de transports que se sont façonnées les vallées ainsi que leurs versants et les sommets. Mais leur état actuel d'équilibre n'est pas définitif, car l'action des eaux pluviales et des cours d'eau continue à s'exercer en connexité avec le travail des hommes, l'activité de la végétation et les effets destructifs des divers agents atmosphériques.

Dans les grandes vallées, les cours d'eau actuels n'agissent plus guère par érosion, mais plutôt par comblement ; les inondations et les crues amènent des apports alluvionnaires qui se déposent en rehaussant les lits. Lorsque la pente est douce, la vitesse est faible et la rivière dévie facilement au gré des atterrissements ; elle forme des méandres et affouille les rives. Si la

¹ L'érosion est un phénomène d'ordre physique ou mécanique, la corrosion est d'ordre chimique.

rivière est torrentielle, ses apports sont considérables et finissent par former obstacle au passage des eaux ; celles-ci sortent alors de leur lit et s'en frayent un nouveau pour l'abandonner à son tour à la première crue.

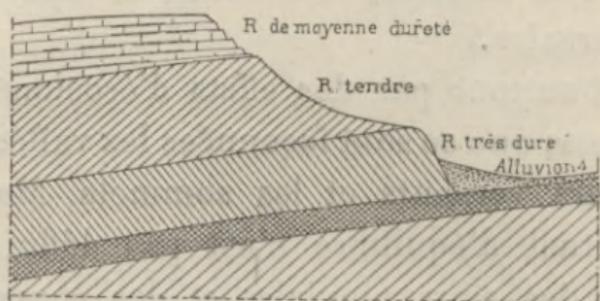


Fig. 11.

Les règles de stratigraphie les plus usuelles pour l'étude de l'hydrologie peuvent être résumées ainsi :

1° Une strate quelconque est plus ancienne que celle sur laquelle elle repose et plus récente que celle qui la recouvre.

Il n'y a d'exception que dans les rares cas de renversement de stratification ou de superposition de morts-terrains et de nappes de charriage.

2° Deux strates de même nature, dans la même région, appartiennent à la même époque géolo-

gique, quand elles renferment des fossiles identiques et correspondent aux mêmes alternances de terrains similaires¹.

3° La pente d'un versant est en rapport avec la résistance des roches à la désagrégation et varie, sur le même versant, avec la dureté des diverses strates qui le composent (fig. 11).

4° Lorsqu'une vallée est normale à la direction des strates, ses deux versants ont généralement la même conformation physique et des profils analogues.

5° Lorsqu'une vallée est parallèle à la direction des strates, son profil transversal est dissymétrique si la vallée est monoclinale, et tantôt symétrique ou dissymétrique quand elle est anticlinale ou synclinale. Lorsqu'il y a dissymétrie, les strates du versant raide plongent du côté opposé à la vallée ; et si les deux versants sont à pente douce, c'est que les strates sont horizontales ou convergent de côté et d'autre vers le thalweg de la vallée.

¹ La similitude des fossiles ne suffit pas pour identifier deux strates, car le même type de fossiles peut se rencontrer dans des formations différentes. Ainsi l'espèce des *ammonitidés* qui commence dans le *permien* se montre abondante dans le *trias* et le *jurassique* et se retrouve encore, quoique plus rare, dans le *crétacé*.

6° *Un versant raide, en terrains stratifiés, suppose généralement des strates plongeant du côté opposé à la vallée et des eaux s'écoulant en dehors de la vallée.*

7° *Les cours d'eau creusent leurs lits dans les strates plus tendres et sont, le plus souvent, limités, soit latéralement, soit en profondeur, par des strates dures.*

8° *Les terrains stratifiés sont déposés dans un ordre immuable, correspondant aux divers étages géologiques ; toutefois il convient de rappeler que les étages et sous-étages classiques présentent souvent des lacunes et que l'un d'eux et même plusieurs peuvent manquer.*

III

CLASSIFICATION DES TERRAINS STRATIFIÉS

Pour faciliter l'étude de la stratigraphie et de la géologie en général, les divers terrains qui forment la croûte terrestre ont été classés sur des bases communes en tous pays ; mais les divisions en étages et sous-étages sont régio-

GRUPE	SYSTEMES OU PERIODES	ÉTAGES OU AGES	TERRAINS CARACTÉRISTIQUES	FOSSILES CARACTÉRISTIQUES
QUATERNAIRE	ACTUEL . . .	»	Alluvions modernes. Formations actuelles; dépôts marins, madrépores, tourbes, produits volcaniques, etc.	Débris de l'homme et d'animaux contemporains.
		»	Cailloux roulés et sables. Roches de transport.	Ossements des cavernes. Débris de grands animaux. Coquilles d'eau douce.
OU CÉNOZOÏQUE	PLIOCÈNE . . .	Subapennin.	Sables, marnes, dépôts lacustres et marins, dépôts coquilliers, pebbles phosphatés de la Floride.	Coquilles d'eau douce. Buccinum prismaticum. Grands mammifères.
		Falanien.	Sables, faluns, molasses. Calcaires d'eau douce, sables et lignites, gypse, marnes.	Coquilles d'eau douce. Végétaux. Grands mammifères.
		Aquitanien.	Meulière de la Beauce.	Coquilles d'eau douce.
		Tongrien.	Calcaire et meulière de la Brie, sables et grès de Fontainebleau. Lignites, marnes.	Coquilles d'eau douce. Débris de coquilles marines.

GRUPE	SYSTEMES OU PERIODES	ÉTAGES OU AGES	TERRAINS CARACTÉRISTIQUES	FOSSILES CARACTÉRISTIQUES
TERTIAIRE	ÉOCÈNE . . .	Parisien.	Terrains à nummulites. Marnes et dépôts gypsifères. Calt. lacustre de Saint-Ouen. Sables et grès de Beauchamps. Calcaire grossier.	Coquilles d'eau douce; planorbis, lymnées, characérites, miliolites. Nummulites, foraminifères, cérites.
		Suessonien.	Argile avec lignites et pyrites. Sables marins. Calcaires lacustres et marins. Phosphates algériens et marines, souvent avec gypse et silice.	Mammifères placentaires, pachydermes, etc. Coquilles d'eau douce. Nummulites, échinodermes. Foraminifères.
SECONDAIRE OU MÉSOZOÏQUE	CRÉTACE . . .	Danien.	Craie jaune, calc. pisolithique.	Baculites et scaphites. Dinosaures.
		Sénonien.	Calcaires à ostrea. Craie blanche, à silice noirâtres. Marnes grises, sables. Grès jaunâtres, très friables.	Micrasters, sphérolites et inocerames, hippurites. Belemnites, baculites.
		Turonien.	Craie marneuse à silice jaunes. Craie tuffau. Marnes blanches, grès friables.	Inoceramus labiatus. Rhynchonella Cuvieri. Hypurites; nombreux foraminifères.
		Cénomaniens.	Craie verte ou glauconienne. Argile feuilletée foncée avec lits charbonneux, grès. Poudingues dits tourtia.	Flore très variée, faune d'eau douce. Exogyres sinuée ostrea, lima. Scaphites, turritiles. Ammonites rotomagensis.

GRUPE	SYSTÈMES OU PÉRIODES	ÉTAGES OU AGES	TERRAINS CARACTÉRISTIQUES	FOSSILES CARACTÉRISTIQUES
DU MÉSOSÉNIQUE	CRÉTACÉ . . .	Albien.	Grès verts supérieurs. Sables verts, argile gault. Phosphates du Boulonnais et des Ardennes.	Ammonites mamillaires. Hamites, turritos.
		Aptien.	Argile à plicatules. Calcaire blanc. Calcaire d'Orgon (Apt).	Plicatula placunea, réquié- nies.
		Néocomien.	Grès vert inférieur, calcaires jaunes. Calcaire wealdien d'eau douce. Grès et sables ferrugineux à lignites et nodules de phos- phate.	Coquilles d'eau douce. Ammonites déronlées. Belemnites dilatées. Guanodons.
		Portlandien (JUR. SUPÉRIEUR).	Calc. compact de Portland et du Barois. Calc. fissurés.	Ammonites gigas. Reptiles ailés. Grands sau- riens.
		Kiméridgien (JUR. SUPÉRIEUR).	Argile de Kimeridge. Calcaires à astartes. Dolo- mies.	Exogyre virgule. Ostrea deltoidea. Astarte minima. Reptiles et sauriens.

GRUPE	SYSTÈMES OU PÉRIODES	ÉTAGES OU AGES	TERRAINS CARACTÉRISTIQUES	FOSSILES CARACTÉRISTIQUES
SECONDAIRE	JURASSIQUE . . .	Corallien (JUR. SUPÉRIEUR).	Calc. à polyptiers. Coral-rag. Calc. à nérinées.	Astartes et nérinées. Reptiles et sauriens.
		Oxfordien. (JUR. SUPÉRIEUR).	Marne dite Oxford-Clay. Calc. à chaux hydraulique et à ciment.	Ostrea Marshii, griphea dilata- ta, trigonites, pholadomites. Ammonite Jason. Belemnites hastatus.
		Bathonien (JUR. MOYEN).	Calc. et argiles schistoïdes en bancs minces, marbres co- quilliers (cornbrash, forest- marble, Bradfort-Clay), pierres plates et dolomies. Calc. à grains fins (grande oolithe).	Térébratules, pholadomies. Ammonites humphresianus. Ammonites margaritatus. Ecrines, polyptiers.
		Bajocien (JUR. MOYEN).	Calc. à entroques et rognons ferrugineux. Calc. oolith. ferrugineux. Terre à foulon.	Ammonites, térébratules, belemnites, spirifers, pho- ladomies.
		Toarcién (LIAS SUPÉRIEUR).	Marnes et calcaires ferrugin. Marnes à posidonies. Fer oolithique de Lorraine.	Ammonites, belemnites, po- sidonies, grands sauriens.
		Liasien.	Calcaires sableux très durs. Minerais de fer. Sables marnoux micacés.	Gryphea cymbium. Ammonites et belemnites.
		Sinemurien (LIAS INFÉRIEUR).	Calcaire marnoux à gryphées. Marnes et argiles bleuâtres.	Gryphées arquées. Lima gigantesque.

SYSTÈMES ou PÉRIODES	ÉTAGES ou AGES	TERRAINS CARACTÉRISTIQUES	FOSSILES CARACTÉRISTIQUES
JURASSIQUE	Hettangien (LIAS INFÉRIEUR)	Grès infraliasiques. Calcaire blanc ou lias blanc. Argiles à petites gryphées.	Ammonites planorbis. Pectens.
	Rhétien (LIAS INFÉRIEUR)	Grès, arkoses, psammites. Calcaire à avicula.	Avicula concordia.
	Keuper.	Dolomies, psammites. Argile schistoïde. Marnes irisées avec sel gemme, gypse, et quelquefois houille maigre pyriteuse.	Végétaux nombreux. Mollusques rares. Débris de poissons et de sau- riens.
	Franconien.	Calcaire coquillier ou mus- chelkalk, dolomie caver- neuse.	Ammonites nodosus, téré- bratule vulgaire, coprolites.
TRIAS . . .	Vosgien.	Grès bigarré. Grès des Vosges.	Peu de fossiles; posidonia minuta. Premiers animaux sauriens et mammifères.
	Permien ou	Calcaire dit zechstein. Schiste cuivreux. Dolomie, gypse, sel gemme, marne.	Spirifer undulatus. Productus horridus.

SECONDAIRE OU MÉSZOZOÏQUE

CARBONIFÈRE.	DYAS.	Grès blancs, jaunes, rouges. Conglomérat, rotliegendes, glaises.	Flore houillère réduite.
	Houiller.	Grès et psammites. Schistes noirs, argiles. Houilles, anthracites. Grès quartzeux dit Millstone grit.	Foraminifères, polypiers, mollusques, articulés, ver- tébrés et flore nombreuse.
	Anthracifère.	Calc. gris, noirs, veinés de calcite. Schistes à posidonies. Calcaire carbonifère (petit granite). Calc. gris, noir, veiné de cal- cite. Calc. métallifère.	Posidonies. Divers productus et spirifers. Poissons, crustacés.
	Famennien.	Calc. noir, calc. oolitique. Calc. marmoréens. Calc. siliceux.	Fossiles rares.
DÉVONIEN . . .	Eifélien.	Vieux grès rouge (schistes, grès et conglomérats, grau- wakes).	Fossiles rares.
	Rhénan (ARIEGEAIS).	Calc. bleus, veinés de calcite. Calc. marmoréens (griotte). Calcaires schistoïdes (calc- schistes). Schistes noirs et verts avec veines de calcites.	Fossiles rares.

PRIMAIRE OU PALÉOZOÏQUE

GRUPE	SYSTÈMES OU PÉRIODES	ÉTAGES OU AGES	TERRAINS CARACTÉRISTIQUES	FOSSILES CARACTÉRISTIQUES
PRIMAIRE OU PALEOZOIQUE	SILURIEN . . .	Bohémien.	Grès, argiles et calcaires. Schistes noirs.	Très riches en fossiles. Calymènes (trilobites). Bilobites. Orthocères.
		Armoricaïn.	Grès armoricaïn à bilobites. Schistes à calymènes et schistes ardoisiers.	Trilobites, encrines. Paradoxides.
ARCHEEN	(NON STRATIFIÉ STRATIFIÉ . . .	Scandinaviaïn.	Schistes noirâtres à dalles. Schistes ardoisiers. Grès rouges et gris.	Fossiles extrêmement rares. Vers et annélides.
		Ardennien.	Grès, grauwackes, quartzites. Phyllades à ardoises. Schistes noirs pyriteux et charbonneux. Schistes verdâtres.	Pas de fossiles.

CHAPITRE II

CARTES TOPOGRAPHIQUES ET GÉOLOGIQUES. — CARTES DE LA FRANCE

La presque totalité des terrains géologiques classés est représentée sur le sol de la France ; on y trouve, en effet, les terrains stratifiés des périodes quaternaire, tertiaire, secondaire et primaire, ainsi que les roches éruptives anciennes (*pré-tertiaires*) et récentes (*tertiaires* et *post-tertiaires*).

Les divisions en étages et sous-étages ne sont pas partout les mêmes. Celles qui sont signalées dans la classification géologique du chapitre précédent s'appliquent exclusivement à la France.

Sur les 528.435 kilomètres carrés du sol français, les principaux terrains y sont répartis approximativement de la façon suivante :

1° Terrains stratifiés.	}	Période tertiaire, environ	120.000	kq.
		— crétacée, —	65.000	—
		— jurassique, —	110.000	—
		— triasique, —	30.000	—
		— primaire, —	60.000	—

2° Roches éruptives et volcaniques.

Sans doute, beaucoup de ces terrains sont recouverts par des matériaux ou des dépôts récents ; mais les accidents du sol permettent presque toujours de les identifier. Cette reconnaissance est d'ailleurs facilitée, en tous pays, par des *cartes topographiques* qui précisent l'orographie du sol, et des *cartes géologiques* qui indiquent les formations stratigraphiques auxquelles est intimement lié le régime des eaux souterraines.

La plus ancienne carte topographique est la carte de France, dite de *Cassini*, au 86.400^e, qui fut entreprise en 1733 sous la direction de *Cassini de Thury*, *Camus* et *Montigny*.

La carte au 80.000^e, connue sous le nom de **Carte de l'État-Major**, fut prescrite par ordre royal du 6 août 1817, mais ne fut entièrement livrée au public qu'en 1880. Elle était destinée à remplacer la carte de Cassini, devenue insuffisante.

Cette carte, soumise à des revisions périodiques sur le terrain, est constamment tenue à jour. Elle comprend 274 feuilles en noir, mesurant 0,80 × 0,50 m.

La dernière édition, celle de 1889, est d'une

lecture très facile ; elle est publiée par quarts de feuille dont chacun porte une désignation spéciale, un numéro et un nom de ville, avec l'indication des quatre feuilles qui l'encadrent.

Une carte en noir encore plus récente, au 50.000^e, est l'amplification photographique héliogravée sur zinc de la carte précédente et chacune de ses feuilles correspond au quart de feuille de l'édition de 1889.

La Nouvelle carte de la France, au 50.000^e, est plus détaillée ; elle est en couleurs et tirée par héliogravure sur zinc. Le terrain est représenté par des courbes de niveau qui sont rehaussées par un double estompage exécuté dans les deux hypothèses de la lumière verticale (*teinte bistre*) et de la lumière oblique (*teinte grise*).

La carte entière, qui n'était pas encore terminée en 1913, comprendra 1.100 feuilles.

Une carte plus spéciale, dite **Carte des environs de Paris**, au 20.000^e, en couleurs comme la précédente, comprend le département de la Seine, une notable partie du département de Seine-et-Oise et la portion occidentale du département de Seine-et-Marne.

Ces diverses cartes ont été dressées par les

soins du *Service géographique de l'armée*, ainsi que plusieurs cartes coloniales.

La carte de l'Algérie et de la Tunisie, au 50.000^e, a été exécutée en sept couleurs ; elle donne toute la région du Tell. Commencée en 1883, elle est actuellement presque terminée.

La carte générale de l'Algérie et de la Tunisie, au 200.000^e, est à quatre couleurs seulement. Elle comprendra 200 feuilles dont 80 feuilles étaient déjà, en 1913, à la disposition du public.

Enfin la **Carte de la Tunisie** au 100.000^e, en six couleurs, qui a été commencée en 1835, est en cours d'exécution ; une soixantaine de feuilles, sur 126, ont déjà paru.

Dans les cartes en couleurs, le *bleu* représente les eaux, le *rouge* ou *rose* les routes et habitations, le *vert* les bois, le *bistre* les coupes horizontales de niveau, le *vert clair* les cultures.

Pour les cartes en noir, comme celles de l'État-Major, des signes conventionnels indiquent les routes, chemins et sentiers, les habitations, les limites, les chemins de fer, les rivières, marais, dunes et mers, les montagnes, bois et terres cultivées, les points trigonométriques utilisés pour la triangulation, etc.

Les courbes de niveau sont équidistantes et

repérées par des cotes d'altitude assez nombreuses ; elles permettent de déterminer, en un point quelconque, la pente d'un terrain, c'est-à-dire le rapport de l'équidistance des deux courbes voisines à leur écartement mesurée en projection sur la carte.

L'aspect des courbes de niveau donne d'une façon saisissante l'impression des reliefs du sol, surtout lorsque la pente est accentuée ; l'effet est encore plus sensible sur les cartes où l'on a combiné les courbes et les teintes dégradées.

Sur les cartes en noir, les teintes sont remplacées par des hachures perpendiculaires aux courbes et arrêtées à chacune de celles-ci ; elles produisent une sorte d'ombre sur les pentes et versants et comme elles sont d'autant plus serrées que la pente est plus forte, elles accentuent très convenablement les reliefs du sol. Ce genre de dessin a permis de supprimer complètement le tracé des lignes de niveau, celles-ci se trouvant suffisamment indiquées par les solutions de continuité qui limitent les diverses séries des hachures.

Pour faciliter l'exécution des cartes, on a supprimé les hachures pour les pentes égales ou supérieures à $\frac{1}{1}$ en les remplaçant par le

signe conventionnel *d'escarpement* ; on les a également supprimées pour les pentes inférieures à $\frac{1}{64}$.

La carte topographique signale toutes les impressions du terrain : hauteurs, dépressions, versants, vallées, vallons et vallonets, lignes de thalwegs, plis monoclinaux, synclinaux et anticlinaux, failles, etc. ; elle délimite nettement les bassins de réception et d'alimentation des eaux, les cônes de déjection, etc. Bref, elle permet d'étudier l'hydrologie complète d'une région.

On peut y lire également, d'un seul coup d'œil, la nature générale du sol superficiel, car les terrains perméables ne comportent que des cours d'eau très espacés tandis que les terrains imperméables sont sillonnés de rivières, ruisseaux, lacs, étangs et marécages.

Quand il y a lieu de faire une étude plus spéciale, on agrandit la feuille topographique. Dans ce but, on la recouvre au crayon d'un quadrillage serré dont toutes les lignes sont soigneusement numérotées à leurs deux extrémités ; puis on trace sur papier blanc un quadrillage dont les espacements plus écartés correspondent à l'agrandissement désiré. Chacun des détails

du premier quadrillage est reporté dans le second et ainsi, par repérages successifs, on reproduit à une plus grande échelle toute la région que l'on étudie.

On opère plus rapidement en faisant usage du *pantographe*, petit instrument très simple formé par quatre règles en bois, articulées en parallélogramme. L'un des sommets est muni d'une pointe sèche que l'on promène sur les traits de la carte tandis qu'à l'angle opposé une pointe de crayon trace les mêmes traits, mais à une échelle agrandie, sur un papier blanc.

Sur la nouvelle carte ainsi obtenue on fait figurer, en couleurs, les délimitations exactes des terrains sédimentaires et éruptifs, si l'on possède suffisamment de connaissances géologiques ; à cet effet, on utilise les coupes que procurent les tranchées de routes et de voies ferrées, les berges escarpées, les failles dénudées, les puits et galeries de mines, les carrières, les escarpements de tous genres, etc. Tous les niveaux et affleurements sédimentaires observés sont repérés, et leur inscription sur la carte permet de reconstituer les terrains stratifiés ainsi que les roches éruptives qui les traversent ou les limitent.

En France et dans les colonies françaises, le travail est simple, car il consiste à vérifier et compléter, au besoin, nos cartes géologiques. Nous possédons en effet des relevés géologiques fragmentaires dans un grand nombre de départements et même d'arrondissements. En outre, la carte topographique de l'État-Major a servi de base pour la confection d'une grande carte géologique, au 80.000^e, éditée par les soins du ministère des Travaux publics.

Elle comprend 267 feuilles de 0,94 \times 0,72 m., complétées chacune par des mémoires descriptifs et explicatifs ainsi que par des monographies régionales et locales insérées dans le *Bulletin de la carte géologique de France*.

Il existe en outre une carte générale à l'échelle de 1.000.000^e.

Pour l'Algérie et la Tunisie, on trouve une carte au 320.000^e en cinq feuilles ; une nouvelle carte au 50.000^e est en voie d'exécution.

Les cartes géologiques font généralement abstraction de la couche de terre végétale superficielle, ainsi que des sols alluvionnaires abondants et des dépôts de matériaux meubles, pour n'indiquer que les roches du sous-sol, stratifiées et éruptives.

La lecture de ces cartes est facilitée par l'identification de chaque période géologique au moyen de couleurs spéciales, de signes conventionnels et d'annotations.

Les terrains d'origine éruptive sont teints en *rouge*, le jurassique est *bleu*, le crétacé *vert*.

Le tertiaire est figuré par des teintes *jaunes*, etc. Dans la carte générale de la France, chaque terrain porte une initiale et un numéro.

Ainsi, les teintes jaunes du tertiaire sont numérotées :

2 pour le pliocène *p* ;

3 pour le miocène *m* ;

4 pour l'oligocène ;

5 pour l'éocène *e*.

Le crétacé *c* porte les n^{os} 6 et 7, le jurassique *j* les n^{os} 8, 9, 10 et 11, etc.

Les chiffres portés en indice supérieur, c^1 , c^2 par exemple, indiquent l'âge décroissant des divers terrains crétacés, j^1 , j^2 , j^3 ... les séries jurassiques, etc.

Une annotation telle que c^{1-3} ou $c^1 j^3$, par exemple, indique une superficie qu'il n'a pas été possible de préciser exactement ou qui représente à la fois la série des terrains c^1 , c^2 et c^3 , ou la succession des subdivisions c^1 , c^2 , c^3 ... j^1 , j^2 et j^3 .

Dans les cartes détaillées, les subdivisions locales sont ponctuées par un second indice supérieur; ainsi j^{ib} représente la subdivision b du terrain j^i .

Les commentaires et explications concernant les couleurs, le numérotage et autres particularités des terrains sont inscrits en marge des cartes. Leur lecture en est facile.

Les teintes favorisent l'étude d'ensemble, d'autant mieux que leurs lignes limites suivent à peu près les lignes de niveau pour les terrains stratifiés; de même la diversité des couleurs différencie les plateaux des vallées.

Une faille est mise en évidence par une ligne entre deux couleurs différentes.

En somme, la carte géologique, avec l'aide de cartes topographiques, permet d'établir, par des coupes verticales, la situation des terrains perméables, la direction, l'inclinaison et l'affleurement des strates. Au besoin on les complète sur place, les unes et les autres; les renseignements qu'elles fournissent suffisent pour permettre à l'hydrologue de reconnaître et de délimiter les bassins de réception des eaux, les vallées hydrographiques et les régions susceptibles d'être parcourues par les eaux souterraines.

Le cas échéant, on vérifie toutes ces données par des sondages rapides au moyen desquels on établit une coupe géologique précisant l'allure des terrains en profondeur, leurs épaisseurs et leur ordre de superposition. C'est surtout lorsqu'il existe des failles que ces coupes sont utiles.

OUVRAGES A CONSULTER

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — Mémoires pour servir à l'explication de la carte géologique détaillée de la France.

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — Publications du service des topographies souterraines.

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS. — Bulletin de la carte géologique de la France (un volume annuel).

BURAT. — Géologie de la France, Paris, 1872.

L. DE LAUNAY. — Géologie pratique, Paris, 1901.

A. GEIKIE. — Éléments de géologie sur le terrain. Traduit de l'anglais par O. Chemin, Paris, 1903.

A. DE LAPPARENT. — Traité de géologie, Paris, 1905.



CHAPITRE III

ORIGINE DES EAUX SOUTERRAINES ET LEUR ACTION SUR LES ROCHES ET LES SOLS

I

ORIGINE DES EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines jouent un rôle capital dans la vie de l'homme ; elles donnent naissance aux sources, alimentent les rivières, entretiennent la fraîcheur du sol et favorisent la végétation.

Cependant leur genèse et l'explication de leur renouvellement continu ont été l'objet de nombreuses controverses jusqu'à l'époque actuelle. Tous les savants, y compris Descartes, n'ont guère fait que disserter sur l'opinion émise par Lucrèce, au premier siècle avant Jésus-Christ, dans son admirable livre *De naturâ rerum*.

Pour Lucrèce, la terre est un corps poreux ¹.

¹ Lucrèce. *De la nature des choses*. Traduction de Lagrange, t. II, liv. VI. Librairie de la Bibliothèque nationale.

« Comme elle environne de tous côtés la mer qui lui est contiguë, la mer ne peut recevoir les eaux de la terre sans que celle-ci reçoive à son tour celles de la mer qui se filtrent en effet dans le sein du globe, se replient sur elles-mêmes, se rassemblent à la source des fleuves et, ainsi purifiées, coulent sur la terre à l'endroit où sa surface entr'ouverte facilite la trace liquide de leurs pas. »

Dix-huit siècles plus tard, Descartes expliquait l'origine des sources dans des termes presque identiques, en son livre des *Principes de la philosophie*. On ne se doutait pas, au temps de Descartes, de la quantité prodigieuse d'eau qui, s'évaporant à la surface des terres et des mers, retourne dans l'atmosphère; et cette vérité, banale aujourd'hui, que les cours d'eau superficiels et les couches aquifères souterraines sont exclusivement alimentés par des condensations atmosphériques, a été discutée jusqu'au XIX^e siècle¹.

¹ Il convient cependant de signaler que Bernard de Palissy (1510-1589) avait timidement suggéré cette opinion dans son *Traité des eaux et fontaines*.

Au siècle suivant, Mariotte (1620-1684) la fit sienne et chercha à en donner quelques preuves dans le *Traité du mouvement des eaux*.

Je n'en ai trouvé la première mention nettement affirmative que dans l'ouvrage de M. J. Degousée, *Guide du sondeur*, dont la première édition a été publiée en 1847.

« En résumé, dit M. Degousée¹, la quantité d'eau qui, élevée par l'évaporation dans l'atmosphère, retombe sous forme de pluie, de neige, de grêle, de rosée et de brouillards, sur les continents, est plus que suffisante pour alimenter les cours d'eau qui circulent à leur surface ou dans les cavités intérieures.

« Cette conclusion, si simple et si féconde, rapprochée des systèmes pénibles et compliqués qu'a successivement produits l'ancienne physique, présente une de ces leçons par lesquelles l'histoire des sciences humilie si souvent l'orgueil de notre esprit, et lui apprend qu'il ne peut rien savoir par lui-même des plans de la création ; que, livré à ses seules ressources, il n'a nul accès vers la réalité ; et qu'enfin, pour connaître la nature, il doit se résoudre à l'interroger en recueillant par l'observation ce qu'elle-même veut bien nous laisser voir à travers ses voiles. »

Ainsi donc, les eaux et l'humidité atmosphé-

¹ *Guide du sondeur*, p. 409. Langlois et Leclercq, éditeurs. Paris, 1847.

rique qui tombent à la surface du sol se renouvellent constamment. Une grande partie retourne à l'atmosphère sous forme de vapeur, une autre portion s'écoule le long des pentes et versants pour alimenter les cours d'eau, et le reste pénètre dans les sols meubles et les roches perméables.

Il est difficile d'évaluer exactement la quantité d'eau qui tombe annuellement sur la surface du globe. En tenant compte des observations recueillies à ce sujet, on calcule que l'évaporation enlève à l'océan, dans les régions torrides, une couche d'eau annuelle d'environ 3 mètres de hauteur.

En moyenne, on admet qu'il tombe annuellement sur les continents de 700 à 750 millimètres d'eau ¹.

Les pluies sont plus abondantes dans le Midi. Ainsi, les grandes pluies d'orage, sur la région parisienne, n'ont jamais donné plus de 92 millimètres d'eau en une heure (Saint-Denis, 13 juillet 1901), tandis qu'on en a constaté 315 pendant un orage d'une heure et demie à Mollitg-les-

¹ Dans le Midi de la France, d'après les expériences de M. Salles, l'évaporation est en moyenne de 1,20 m. par an, soit 3,5 mm. par jour. Sur les côtes égyptiennes de la Mer Rouge, elle est de 10 millimètres.

Bains (Pyrénées-Orientales) le 30 mars 1868.

Exceptionnellement, certains orages donnent des pluies colossales. On cite une série d'orages, dans les monts de Jasia, au Queensland (Australie), qui déversèrent 2,59 m. d'eau du 12 au 15 juin 1876¹. Dans la même région, l'orage du 3 février 1893 donna, en vingt-quatre heures, plus de 2 mètres de hauteur d'eau. Citons encore une averse qui dura quatre jours, du 14 au 17 juillet 1911, aux îles Philippines, et qui déversa 2.238 millimètres d'eau.

En admettant une moyenne annuelle de 700 millimètres sur les continents (superficie, 145 millions de kilomètres carrés), on arrive au chiffre de 100.000.000 milliards de mètres cubes par an. Ce qui représente, pour les continents, une chute d'eau pluviale de 2 millimètres de hauteur, ou 2 litres par mètre superficiel et par jour, ou encore 7.300 mètres cubes par hectare et par an.

¹ *Nature*, n° 48. London, 1877.

II

INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION

En arrivant au contact des sols meubles, les eaux les traversent en s'insinuant le long des racines des plantes, et celles-ci les utilisent, en partie, pour puiser dans le sous-sol les principes nécessaires à leur nutrition : chaux, potasse, acide phosphorique, etc. L'excès d'eau, l'eau qui n'est pas utilisée pour la sève, continue à descendre lentement en filets capillaires et en suintements jusqu'à ce qu'elle rencontre une surface imperméable qui l'arrête et l'oblige à s'écouler en suivant ses variations de pentes, pour s'échapper finalement en sources sur des versants ou couler en nappes aquifères au-dessus d'un thalweg.

Si les racines sont nombreuses et importantes, il se produit une sorte de débit lent et continu ; et il en résulte un régime d'eaux souterraines lent et régulier. Ce système donne naissance aux *sources perpétuelles* ou *pérennes*.

Si, au contraire, les racines sont grêles, rares, — et c'est le cas d'une friche — les eaux filtrent plus rapidement jusqu'au sol imperméable ; elles

arrivent à produire des *sources accidentelles* ou *intermittentes* et, d'une manière générale, une sorte de régime torrentiel. De plus, leur action fréquente dénude peu à peu le terrain qu'elles ravinent par l'entraînement des terres végétales.

Dans les sous-bois, l'eau pluviale est encore retenue par une *couverte* de feuilles, de mousses et de sphaignes. Un expérimentateur bavarois, M. Ebermayer, a calculé qu'un mètre cube de feuilles mortes de hêtre absorbe jusqu'à huit fois son poids d'eau¹.

On sait aussi que l'humidité persiste longtemps sous les arbres ; c'est pourquoi la condensation des nuages se fait plus aisément au-dessus de la forêt que sur la plaine, et M. Fautrat² estime que la forêt reçoit 43 p. 100 plus d'eau que la plaine nue.

Ainsi donc, la couverture forestiale réduit la quantité des eaux ruisselantes et favorise les infiltrations dans le sous-sol.

Lorsque la forêt reçoit 100 parties d'eaux pluviales, par exemple, elle conserve ces 100 parties, tandis que la plaine dénudée en retient 77

¹ P. Buffault. La forêt et les inondations. *Revue générale des Sciences*, 15 nov. 1910, Paris.

² P. Buffault, *Op. cit.*

au plus ; la répartition se fait de la manière suivante ¹ :

	100 p. sur terrain boisé.	77 p. sur terrain dénudé.
Eau évaporée	10,5 p.	52,6 p.
— arrêtée par les arbres .	20,0 —	»
— arrêtée par la couverture.	25,0 —	»
— infiltrée dans le sol . .	44,5 —	24,4 —

Les notions qui précèdent font comprendre comment le déboisement peut amener, dans une région, la stérilité et un changement de régime des eaux de surface. C'est qu'en effet les forêts sont de véritables régulateurs de l'humidité, puisqu'elles retiennent par leurs tiges, leurs racines, leurs feuilles et leur couverture, les eaux et les neiges sur le sol. Elles prolongent ainsi la durée de l'évaporation, en même temps qu'elles ralentissent l'écoulement des eaux superficielles et les infiltrations ; elles ont encore un effet non moins important, que j'indiquerai plus loin, celui de préserver l'eau des pollutions microbiennes si fréquentes dans les sols dénudés.

Il n'est plus permis de douter, aujourd'hui, que le déboisement en montagne diminue les

¹ P. Buffault. *Op. cit.*

pluies et accentue les crues des rivières. C'est là une vérité sur laquelle il me semble nécessaire d'insister.

En tombant sur un versant déboisé, les eaux fluviales déterminent des ravinements et entraînent, dans les vallées et les rivières, des terres, des sables, des graviers et des pierres. Peu à peu, le versant se creuse, se sillonne et se dénude. Dès lors, les eaux ne peuvent plus pénétrer dans le sol et dévalent torrentiellement; des atterrissements nuisibles aux cultures se forment dans la plaine et la descente trop rapide de l'eau provoque les crues et les inondations.

Mais la conséquence la plus fâcheuse, c'est que les ressources d'eaux souterraines s'atténuent et finissent même par disparaître.

Le déboisement en montagne provient souvent comme dans les Alpes et les Pyrénées françaises, des abus du pâturage. Il a pour conséquence inévitable des catastrophes souvent terribles, sans parler des inondations dans la plaine, de l'ensablement des cours d'eau, des arrêts forcés de la navigation et enfin de la diminution de ces approvisionnements et chutes d'eau qu'on a si justement appelés, au même titre que les glaciers, des gisements de *houille blanche*.

Dans d'autres régions, les motifs du déboisement sont différents ; ce sont les coupes de bois mal coordonnées, pour l'industrie et le chauffage, les défrichements, les incendies, etc.

Accidentellement, le ravinement est dû à la persistance des pluies ; les terrains perméables, imbibés à saturation, ne peuvent plus absorber les eaux pluviales et celles-ci s'écoulent superficiellement en détruisant la végétation et dénudant le sol.

Bref, et je le répète encore, il convient de vulgariser la notion si utile de la conservation des forêts et du reboisement¹, ou tout au moins du revêtement des pentes et des versants par des

¹ Les principes généraux du reboisement ont été fixés en 1912, par le Congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences et par le Congrès de l'Arbre et de l'Eau, dans les termes suivants :

« Il convient de faire concourir la disposition des bois, leur aménagement et leur mode d'exploitation à contrarier le ruissellement sur les pentes et la propagation des vents tourbillonnaires dans les plaines.

« Il est recommandable à cet effet :

« 1^o De créer sur les pentes des ceintures boisées, ou tout au moins des bandes boisées suivant les lignes de niveau et disposées en damier quand elle comporteront des interruptions ;

« 2^o De couper les plaines par des bandes boisées perpendiculaires à la direction des vents dominants et d'augmenter le taux de boisement sur les sols sablonneux exposés à la transformation désertique ;

« 3^o D'aménager les bois en futaie plutôt qu'en taillis simple,

arbres, des plantes vivaces ou des sphaignes ; on parvient ainsi à entretenir le régime des eaux souterraines et à maintenir le niveau hydrostatique plus rapproché du sol.

III

ACTION DES EAUX SUR LES ROCHES

Les eaux pluviales qui s'infiltrent dans le sol produisent encore d'autres effets que je vais passer en revue.

Observons d'abord qu'en traversant l'atmosphère, elles absorbent des gaz avec lesquels elles forment de véritables combinaisons, acides ou basiques. Le coefficient d'absorption varie avec la température ; il est plus considérable pour la neige que pour la pluie, comme on le voit par les chiffres suivants établis par Bunsen :

d'y conserver leur couverture morte et d'allonger la durée des révolutions sylvestres ;

« 4^e D'exploiter les bois de montagne par jardinage, les bois de côteau par parcelles consécutives le long des lignes de niveau, les bois de plaine par parcelles consécutives perpendiculaires à la direction des vents dominants et de généraliser le gemmage des résineux. »

COEFFICIENTS D'ABSORPTION DES GAZ
DANS UN LITRE D'EAU
RAMENÉ A 0° ET 760 mm. (BUNSEN)

Gaz absorbés	A la température de 0° en litres.	A la température de 15° en litres.
Air atmosphérique.	0,025	0,018
Oxygène	0,041	0,030
Hydrogène	0,019	0,019
Acide carbonique	1,797	1,002
Oxyde de carbone	0,033	0,024
Protoxyde d'azote	1,305	0,778
Hydrogène sulfuré.	4,370	3,230
Chlore	1,43	2,50
Acide sulfureux	80,00	47,00
Ammoniaque	1.050,00	727,00

Lorsqu'elles arrivent au contact du sol, les eaux ont donc déjà emprunté à l'atmosphère des éléments variés, tels que l'oxygène, l'acide carbonique, l'ammoniaque, l'acide nitrique et d'autres encore que décèle l'analyse.

Voici, d'après M. Villon ¹, une analyse moyenne des eaux météoriques suivant les saisons :

¹ *Dictionnaire de Chimie industrielle*, par MM. Villon et Guichard. Fascicule 15. Art. *Eau*. Bernard Tignol, éditeur. Paris, 1897.

COMPOSITION DES EAUX MÉTÉORIQUES (VILLON)

Matières contenues	Pluie (suivant les saisons) en cent. cubes.	Neige en cent. cubes.
	—	—
Oxygène.	8,52 à 7,75	»
Azote	16,40 à 16,80	»
Acide carbonique. . .	0,42 à 0,60	»
Ammoniaque.	0,004 à 0,016	0,00017
Acide nitrique	0,001 à 0,0003	
Carbonate d'ammo- niaque	0,00174	0,00129
Nitrate d'ammoniaque.	0,00189	0,00145
Chlorure de sodium. .	»	0,01704
Sulfate —	0,0107	0,01563
— de calcium	0,00087	0,00088
Matières organiques. .	0,02486	0,02385

Tous ces éléments donnent à l'eau un grand pouvoir oxydant et dissolvant, qui s'accroît encore lorsqu'elle absorbe, en circulant dans le sol, l'acide carbonique dégagé par la respiration des racines et les combustions lentes de matières organiques.

Il n'est donc pas étonnant qu'en pénétrant dans les terres arables, elle soit en mesure de leur emprunter, par échange ou par action chimique, des acides organiques : *carbonique, oxalique, malique, citrique*, etc., des acides inorganiques : *sulfurique, chlorhydrique, phos-*

phorique, nitrique, iodhydrique, et des matières diverses comme les *oxydes de fer et de manganèse, l'alumine, des alcalis*, etc.

On conçoit que, dans ces conditions, les eaux infiltrées soient efficacement préparées pour attaquer les roches. Il se produit des oxydations, des dissolutions, des échanges divers. Les eaux se minéralisent ; elles deviennent *calcaires, magnésiennes, potassiques, sodiques, ferrugineuses*, ou encore *sulfatées, chlorurées, carbonatées, nitriques*, etc.

Ainsi, en traversant les fissures d'une roche calcaire, l'eau abandonne ses éléments ferrugineux et alumineux, elle prend de l'acide carbonique et peut alors dissoudre les carbonates.

De même, au contact des roches feldspathiques, les eaux dissolvent la potasse à l'état de carbonate ; la silice et l'alumine libres sont hydratées et forment une combinaison de *kaolin*, silicate d'aluminium pur qui est la base des argiles. Puis, l'action des eaux continuant, ces matières sont entraînées et vont former des dépôts sédimentaires argileux.

Il est évident que, plus le contact est profond et prolongé, plus l'eau se minéralise, surtout lorsqu'elle contient de l'acide carbonique qui

favorise la dissolution du calcaire. C'est la raison pour laquelle on trouve beaucoup de matières minérales dans les eaux artésiennes, un peu moins dans les sources phréatiques et moins encore dans les eaux courantes. Ici, je laisse de côté la question des eaux thermominérales dont l'origine est différente et qui fera d'ailleurs l'objet d'un chapitre spécial.

C'est encore l'action des eaux et de l'air qui produit ces modifications désignées par les géologues sous les noms de **serpentinisation**, **kaolinisation**, **ouralitisation**, **latérisation**, etc., et qui se traduisent par une transformation chimique et un gonflement des roches affectées.

Certains cas particuliers intéressants peuvent se présenter. Ainsi, lorsque l'eau d'infiltration se trouve en contact avec des matières organiques en décomposition, il y a dégagement d'acide sulfhydrique, et l'oxyde de fer qu'elle entraînait est transformé en pyrite. Ce fait explique la présence si fréquente des pyrites en rognons, veines et veinules dans un grand nombre de terrains : calcaires, schistes, houilles, lignites, tourbes, sables.

Inversement, si les eaux infiltrées rencontrent de la pyrite, elles se chargent d'acide

sulfurique. Leur action subséquente sur les roches devient alors des plus énergiques. C'est ainsi qu'en arrivant au contact d'un chlorure, l'eau met en liberté l'acide chlorhydrique, s'acidifie et devient apte à décomposer les roches siliceuses et silicatées; elle peut même dissoudre la silice et c'est de cette façon que se sont formés les dépôts de silice concrétionnée, cellulaire et en rognons.

BASES	ACIDES	GAZ	MATIÈRES ORGANIQUES
Sodium.	Carbonique.	Oxygène.	Nombreuses.
Calcium.	Sulfurique.	Azote.	
Magnésium.	Chlorhydrique.	Acide carbonique.	
Fer.	Silicique.	Acide sulfhydrique.	
Potassium.	Sulfhydrique.		
Ammonium.	Sulfureux.		
Lithium.	Borique.		
Baryum.	Nitrique.		
Strontium.	Fluorhydrique.		
Aluminium.	Iodhydrique.		
Cerium.	Bromhydrique.		
Manganèse.	Phosphorique.		
Zinc.	Arsénique.		
Cobalt.			
Nickel.			
Plomb.			
Cuivre.			
Antimoine.			
Titane.			
Rubidium.			
Thallium.			

On peut se faire une idée de la variété extra-

ordinaire de substances dissoutes dans les eaux par l'examen du tableau ci-dessus des corps reconnus dans les couches aquifères des terrains secondaires du Portugal (trias, jurassique et crétacé) par M. Paul Choffat.

Les matières minérales dont se chargent les eaux se retrouvent dans les végétaux alimentaires et contribuent à la constitution des organismes des êtres vivants; ainsi les os leur prennent des phosphates et du calcaire, les tissus vivants leur empruntent des matières albuminoïdes, du phosphore, de la chaux, de la potasse, du fer, du carbone, de l'oxygène, de l'hydrogène, etc.

La circulation d'eaux souterraines chargées d'éléments minéraux explique également la formation de certains filons métallifères par dépôts dans des fentes ou crevasses rocheuses.

Les matières des filons affectent généralement un état différent de celui sous lequel elles existaient en dissolution; mais c'est là un phénomène d'ordre spécial et qui est dû à divers effets chimiques, calorifiques et électrolytiques, se manifestant sous l'influence d'une pression plus ou moins considérable.

Il semble résulter, de tout ce qui précède, que

les eaux souterraines, outre les gaz et les sels qu'elles tiennent en dissolution, sont chargées d'une foule d'impuretés. Or il n'en est rien, car par une longue circulation dans les sables, dans les cailloux et dans les terres mélangées d'argiles, les matières solides qu'elles entraînent sont arrêtées, tandis que les substances d'origine organique sont oxydées par l'oxygène de l'air qui remplit les vides de tous ces matériaux. On sait en outre que cette oxydation agit efficacement pour détruire les organismes vivants ou morts; et les hygiénistes ont établi que les eaux sont purifiées de la plus grande partie des matières organiques et des germes pathogènes entraînés lorsqu'elles ont traversé 2 à 3 mètres de sable fin et homogène.

C'est le phénomène de la *nitrification naturelle*, qui a été si bien étudiée par Berthelot.

Mais ce filtrage *nitrifiant*, s'il est vrai qu'il détruit les éléments malsains au point de vue pathologique, ne diminue en rien la teneur minérale des eaux dont l'action chimique continue à s'exercer sur les roches, quelle que soit l'épaisseur des sables filtrants. D'ailleurs, cette action n'est pas la seule qu'elles produisent; il faut encore tenir compte des effets particuliers

d'hydratation qui peuvent même devenir énergiques en certains cas, quoiqu'ils soient assez lents en général.

Il arrive, en effet, qu'en traversant les fissures d'une roche l'eau en ronge les parois; puis la porosité augmentant peu à peu, l'hydratation gagne de proche en proche. En outre, il se produit des gonflements et, par suite, des fendillements nouveaux qui se prêtent à l'activité toujours croissante du travail des eaux.

C'est ainsi qu'une roche finit par se transformer complètement; l'*anhydrite*, par exemple, qui est un sulfate de chaux anhydre, est transformée en *gypse* ou sulfate de chaux hydraté, et comme la densité du second (2,33) est moindre que celle du premier (2,98), la modification de la roche amène en même temps une augmentation importante de son volume et, par suite, des effets mécaniques qui favorisent de plus en plus le passage des eaux à travers la croûte terrestre.

Si la roche n'est pas totalement transformée sans changement notable, elle peut subir une modification partielle; c'est ce qui arrive quand les eaux hydratent quelques-uns seulement des éléments variés qui la composent. C'est le cas du *feldspath* transformé en *kaolin*; là encore il

y a des mouvements et des dislocations provoqués par une augmentation de volume ; la densité du kaolin étant 2,20, tandis que celle du feldspath est 2,60.

C'est aussi le cas de ces phénomènes de serpentinisation, d'ouralitisation, etc., que j'ai déjà signalés.

Enfin, il peut y avoir attaque ou dissolution d'un ou plusieurs éléments d'une roche composée. Ainsi, lorsqu'un calcaire contient du fer ou du manganèse, ces métaux sont peu à peu attaqués par les eaux chargées de matières acides ou alcalines ; il en résulte un accroissement considérable de la porosité, et la roche est lentement transformée en une matière jaunâtre, molle et pulvérulente.

Un calcaire très compact, le calcaire bleu du terrain dévonien, par exemple, qui ne s'altère pas à l'air et se recouvre seulement d'une légère patine grise, est peu à peu attaqué quand il est recouvert d'une épaisseur de quelques mètres de terres arables ; les eaux pluviales, en traversant ces terres, deviennent alcalines et attaquent le calcaire qui, à la longue, se transforme en une matière ayant la couleur et l'aspect du bois pourri.

De même encore, les roches à mica noir, à hornblende, à pyroxène, etc., se détruisent rapidement, car l'eau peroxyde les oxydes de fer qu'elles renferment.

Les affleurements de filons et gîtes métallifères sont complètement modifiés par l'action des eaux météoriques ; il y a successivement désagrégation, hydratation et oxydation. Les matières des filons deviennent poreuses, friables et, par suite, de plus en plus pénétrables à l'humidité, et l'altération gagne lentement en profondeur. C'est ainsi que se forme ce dépôt terreux, de couleur jaunâtre, si connu des mineurs sous le nom de *chapeau de fer* (*Eisenhut* des Allemands, *gossan* des Anglais).

IV

NIVEAU HYDROSTATIQUE

L'effet de la décomposition des terrains superficiels par les eaux qui les pénètrent est forcément limité en profondeur, car, en perdant leur oxygène au contact des premières couches qu'elles rencontrent, les eaux deviennent de moins en moins actives ; puis, à partir d'une

certaine limite, leur action oxydante ne se produit pour ainsi dire plus.

Au-dessous de cette zone d'oxydations, de dissolutions, d'hydratations et de réactions chimiques, les eaux continuent à descendre dans le sens vertical, à travers les strates perméables qu'elles imbibent; finalement elles forment une couche mouillée interrompue dont les particules,



Fig. 12. — Dunes landaises (d'après M. Raulin).

gouttes et filets liquides, s'écoulent lentement au-dessus d'un lit imperméable qui constitue leur *niveau de drainage*.

La nappe ou surface supérieure de ce gisement aquifère, à partir de laquelle les eaux sont drainées en écoulement libre, constitue ce que l'on est convenu d'appeler le **niveau hydrostatique**. C'est la rencontre de ce niveau qui signale aux sondeurs la présence d'eaux souterraines en mouvement, d'un bassin aquifère à écoulement.

Le niveau hydrostatique ne suit pas exactement les mouvements du sol, mais il en profile

les principales sinuosités, comme on peut le voir sur la figure 12. Celle-ci est une représentation graphique par M. Raulin¹, sur une longueur de 4.500 mètres, des dunes landaises, au sud d'Arcachon, près de l'étang de Cazau. La nappe

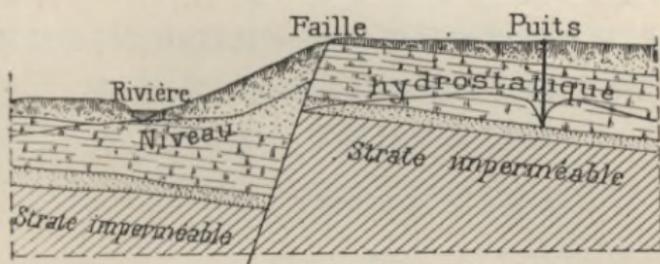


Fig. 13. — Sinuosités accidentelles du niveau hydrostatique.

supérieure de la couche aquifère, alimentée par les eaux de pluie et d'étangs, suit les accidents principaux du terrain ; l'eau d'écoulement point au niveau de la mer en sources potables.

En thèse générale, le niveau hydrostatique s'enfonce le long des failles, autour des puits à usage journalier, dans les sols secs et arides ; il remonte, au contraire, dans les collines, sous le lit des cours d'eau et jusqu'à leur contact, dans les régions cultivées et maintenues

¹ A. Daubrée. *Les eaux souterraines à l'heure actuelle.* t. I, p. 53.

humides. Il varie également suivant les saisons.

La figure 13 indique les allures variées d'un niveau hydrostatique qui se relève sous une rivière, plonge autour d'un puits et subit une interruption par l'effet d'une faille.

CHAPITRE IV

CONDITIONS DE PERMÉABILITÉ OU D'IMPERMÉABILITÉ DES TERRAINS

I

TERRAINS PERMÉABLES

Les eaux pluviales qui pénètrent dans le sol commencent par imbiber les terres meubles, puis se glissent dans les vides et descendent jusqu'à ce qu'elles rencontrent une surface impénétrable, une roche *imperméable*. Là elles se réunissent et subissent une sorte de régime qui présente une certaine analogie avec celui des eaux de surface, sans toutefois lui ressembler.

Ces terrains meubles proviennent de la désagrégation et de la décomposition des roches par l'effet des infiltrations liquides que j'ai déjà

signalées et avec le concours d'agents parfois très actifs, comme la chaleur, la gelée, le brouillard, le vent, les alternances de sécheresse et d'humidité, la poussée des plantes et des racines, etc.

C'est ainsi que les **roches siliceuses** : quartz, quartzites, schistes silicieux, grès, silice concrétionnée et cellulaire, se transforment en sables siliceux, graviers et galets.

Les **roches feldspatiques** : granites, gneiss, micaschistes, porphyres, trachytes, syénites, diorites, diabases, ophites, etc., etc., produisent des sables et des terres kaoliniques et argileuses riches en potasse.

Les **schistes** fournissent des terres argileuses et siliceuses.

Les **calcaires**, en s'émiettant, donnent des terres et des sables riches en chaux.

Cette désagrégation n'est pas seulement superficielle, elle s'exerce également à l'intérieur des roches, quand celles-ci sont fendillées et lorsqu'elles sont traversées de veines et veinules de matières moins résistantes. Les roches sont alors partagées en blocs qui restent en place, comme des témoins de leur forme primitive, ou qui s'écroulent sur les versants en se frag-

mentant en blocs plus petits et en cailloux.

Tous ces matériaux meubles, terres, sables et débris de roches, dévalent sur les pentes où ils forment parfois des terrasses étagées et s'accumulent dans les plaines et au fond des vallées.

Là, sous l'action des eaux de ruissellement, ils subissent un double effet de triage et de transport. C'est ce que décrit si bien l'illustre Cuvier dans une de ses plus belles pages¹ :

« A la fonte des neiges, dit Cuvier, ou lorsqu'il survient un orage, le volume des eaux de montagne, subitement augmenté, se précipite avec une vitesse proportionnée aux pentes ; elles vont heurter avec violence les croupes de débris qui couvrent les flancs de toutes les hautes vallées ; elles entraînent avec elles les fragments déjà arrondis qui les composent, elles les émoussent, les polissent encore par le frottement. Mais, à mesure qu'elles arrivent à des vallées plus unies où leur chute diminue, ou dans des bassins plus larges où il leur est permis de s'épandre, elles jettent sur la plage les plus grosses de ces pierres qu'elles roulaient ; les débris plus petits sont déposés plus bas et il

¹ G. Cuvier. *Discours sur la révolution du globe*, édit. 1875, p. 81. Paris.

n'arrive guère au grand canal de la rivière que les parcelles les plus menues ou le limon le plus imperceptible.

« Souvent même, le cours de ces eaux, avant de former le grand fleuve inférieur, est obligé de traverser un lac vaste et profond, où leur limon se dépose et d'où elles remontent limpides.

« Mais les fleuves inférieurs et tous les ruisseaux qui naissent des montagnes plus basses ou des collines produisent aussi, dans les terrains qu'ils parcourent, des effets plus ou moins analogues à ceux des torrents des hautes montagnes. Lorsqu'ils sont gonflés par de grandes pluies, ils attaquent le pied des collines terreuses ou sableuses qu'ils rencontrent dans leur cours et en portent les débris sur les terrains bas qu'ils inondent et que chaque inondation surélève.

« Enfin, lorsque les fleuves arrivent aux grands lacs ou à la mer et que cette rapidité qui entraînait les parcelles de limon vient à cesser tout à fait, ces parcelles se déposent aux côtés de l'embouchure et finissent par y former des terrains qui prolongent la côte. »

Les terrains alluvionnaires ainsi formés cons-

tituent à la longue des couches épaisses que consolide la végétation et qui se laissent facilement pénétrer par l'humidité.

L'absorption de l'eau par les sols perméables s'effectue de trois manières différentes :

1° Par imbibition dans les terres et dans les roches poreuses ; c'est la *perméabilité intérieure*.

2° Par remplissage des vides dans les sables et les roches fragmentaires ; c'est la *perméabilité extérieure*.

3° Par pénétration dans les fentes et cassures des roches fissurées ou diaclasiques ; c'est un autre genre de *perméabilité extérieure*.

1° POUVOIR ABSORBANT PAR IMBIBITION. — Les terres et les roches poreuses retiennent l'eau par imbibition et cet effet, variable selon la nature des substances, est dû à la porosité et à la capillarité.

En principe, toutes les roches sont plus ou moins poreuses et l'eau les traverse avec d'autant plus de facilité que leurs pores sont plus étroits.

L'expérience le démontre aisément. Ainsi, l'eau montera par capillarité de 30 millimètres dans un tube en verre de 1 millimètre de dia-

mètre et de 300 millimètres dans un tube de diamètre dix fois plus petit.

Dans une colonne remplie d'argile et de terre finement divisées, l'eau peut s'élever à 1,50 m. et même 2 mètres ; elle ne monte pas à plus de 0,30 m. dans une couche de sable de moyenne grosseur.

Mais du fait que les terrains sont tous poreux, il n'en résulte pas nécessairement qu'ils sont tous perméables et leur pénétration par l'eau dépend de leur perméabilité ou de leur imperméabilité ; ainsi, l'eau mouille les marnes par capillarité, mais elle ne les traverse pas parce qu'elles sont imperméables.

D'autre part, les roches internes qui se trouvent à l'abri de l'air atmosphérique et qui, par suite, ne sont pas exposées à l'évaporation, contiennent toujours, lors même qu'elles ne sont ni traversées, ni baignées par des couches aquifères, une certaine quantité d'eau dite **d'hydratation et de constitution** et dont je parlerai bientôt plus longuement ; c'est, pour les matériaux de construction, ce qu'on appelle l'eau de carrière.

Mais, lorsqu'elles sont susceptibles d'être pénétrées par les liquides, elles s'imbibent par porosité et capillarité.

L'imbibition n'a pas de limite minima; elle en a une maxima, c'est la *saturation*. Au delà de cette limite, l'excès d'eau s'écoule.

Il est aisé de déterminer expérimentalement le pouvoir absorbant maximum des terres par imbibition. On sait, par exemple, qu'après dessiccation :

100 kg.	de terre tourbeuse	peuvent retenir	85 kg.	d'eau.
—	—	argileuse	—	70 —
—	—	argilosiliceuse	—	50 —
—	—	calcaire	—	45 —

Quand il s'agit de roches, cette détermination est plus difficile; elle varie d'ailleurs suivant leur fragmentation.

Ainsi, à l'état compact, dans les circonstances les plus favorables :

1 m ³	de tuf volcanique	absorbe	30 p.	100	d'eau en poids.
1 —	de craie	—	20	—	—
1 —	de grès	—	5 à 10	—	—
1 —	de calcaire	—	0,5 à 10	—	—
1 —	de granite	absorbe	0,25 à 0,50	—	—

Ces chiffres diffèrent notablement de ceux que l'on obtient lorsqu'on opère sur des fragments ou des poussières. Voici quelques résultats

empruntés à une étude de M. Delesse¹, sur les eaux de carrière et d'imbibition des matériaux de construction :

SUBSTANCES	PEUVENT ABSORBER	
	En fragments.	En poudre.
100 p. de craie	24.00 p.	41 p. d'eau.
100 — schiste noirâtre . . .	2,85 —	36 —
100 — gypse	2,20 —	26 —
100 — grès quartzeux fin . .	0,66 —	»
100 — schiste ardoisier . . .	0,19 —	31 —
100 — marbre gris	0,08 —	17 —
100 — granite amphibolique.	0,06 —	27 —

2° POUVOIR ABSORBANT PAR REMPLISSAGE DES VIDES. — Les sables, les galets, les pierres, les roches fragmentées retiennent les eaux, par imbibition d'abord, mais surtout par remplissage des vides entre leurs éléments.

Voici les résultats d'expériences que j'ai entreprises avec un certain nombre de matériaux, préalablement desséchés par exposition à l'air. On en remplissait jusqu'aux bords un baril de 110 litres, puis on versait de l'eau litre par litre,

¹ *Recherches sur l'eau dans l'intérieur de la terre*, par M. Delesse (*Bulletin géologique de France*, 2^e série, t. XIX. Paris, 1861).

jusqu'à ce qu'il y eût un commencement d'écoulement par le haut.

L'eau retenue dans les vides était, par mètre cube de matériaux :

- 0,200 m³ en sable très fin homogène.
- 0,300 — — fin ordinaire.
- 0,350 — en petit gravier, jusqu'à 8 ou 10 mm.
- 0,400 — en gravier, jusqu'à 25 mm.
- 0,450 — en cailloux roulés et galets jusqu'à 60 mm.
- 0,450 à 0,500 — en gros cailloux, jusqu'à 100 mm.
- 0,500 m³ en pierres de 100 à 200 mm.

Comme on le voit, la capacité d'absorption est d'autant plus grande que les éléments sont moins fins, c'est-à-dire que les vides entre les grains de sable ou les pierres sont plus importants.

Au delà de ces proportions-limites, l'eau circule entre les sables et peut les mettre en mouvement s'ils ne sont retenus convenablement entre des parois imperméables ou bien encore si celles-ci, rongées ou minées, se creusent, se fragmentent ou se délitent par excès d'eau.

C'est un phénomène de ce genre qui produit les chutes si fréquentes de roches, les glissements de montagnes et les affaissements de terrains.

Les imbibitions de terres et de sables se font

avec lenteur, comme on peut s'en faire une idée par le résultat des expériences qui sont relatées plus loin (voir p. 101) ; aussi s'explique-t-on que les eaux pluviales, particulièrement pendant la saison chaude, n'aient pas le temps de s'insinuer profondément dans le sol et retournent en majeure partie dans l'atmosphère sous forme de vapeurs.

3° POUVOIR ABSORBANT DES ROCHES DIACLASIQUES.

— Les roches sédimentaires provenant de sédiments de vases : *marnes*, *schistes*, *phyllades*, de dépôts de sables fins : *grès*, *grauwackes*, de sables grossiers, galets et débris de roches : *conglomérats*, *poudingues*, etc., et en général toutes les roches à structure schisteuse et laminée ont un pouvoir d'imbibition très limité, mais, par contre, elles sont souvent très perméables en raison des fentes et fissures dont elles sont sillonnées.

Il en est de même de certaines roches massives telles que les gneiss, les basaltes, les serpentes, les trapps, les craies, les calcaires et en général les roches à structure granulaire dont le degré de pénétration par imbibition est faible, comme on le voit par le tableau indiqué précédemment (p. 89).

Ces roches sont criblées de cassures ou *diaclasses* qui sont quelquefois à peine visibles, mais dont les lèvres peuvent s'écarter jusqu'à former des fentes ou crevasses que remplissent peu à peu les terres et les sables de la surface. Ces cassures n'ont causé aucun mouvement, aucun déplacement de terrain ; elles se différencient ainsi des *failles* ou *paraclases* qui se manifestent sur de grandes étendues et produisent des dislocations et même des rejets ou déplacements des divers terrains latéraux et subjacents.

Les diaclasses forment souvent un réseau de lignes parallèles ou croisées présentant une certaine apparence de régularité. Elles donnent lieu généralement à deux directions de fissures, perpendiculaires ou légèrement obliques sur les strates, par lesquelles les eaux de surface pénètrent et produisent peu à peu des érosions, des cavités même qu'elles remplissent par une circulation continue.

Ces cassures s'observent bien par leurs commissures à la surface de certaines roches comme les calcaires et les grès, lorsque celle-ci vient d'être fraîchement déblayée des terres ou sables qui la recouvraient ; on les voit encore dans les tranchées, dans les éboulements, etc. Elles sont

d'une grande aide au carrier dans son travail d'abatage et de débitage en blocs, car elles lui fournissent des plans de rupture quelquefois très nets.

Les failles ou paraclases, qui sont des acci-

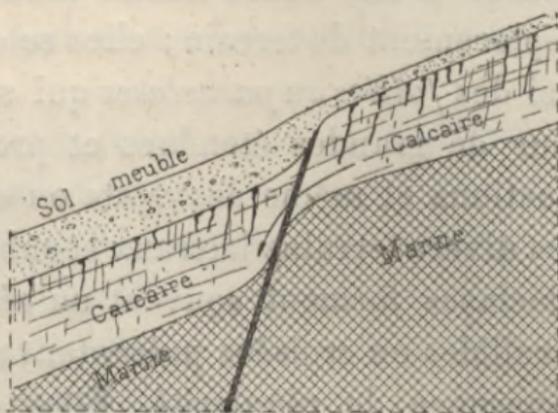


Fig. 14.

dents géologiques¹, résultant le plus souvent d'affaissements, interrompent la ligne de continuité des terrains mais non la circulation des eaux, car les matières qui les remplissent deviennent perméables jusqu'à la hauteur du niveau hydrostatique, et les eaux d'infiltration les traversent et passent d'un côté à l'autre (fig. 14) du terrain perméable.

¹ Par définition, les failles sont des cassures qui ont déplacé les terrains, de part et d'autre, dans le sens vertical.

Si le rejet est assez grand pour séparer complètement les deux portions d'un banc de calcaire fendillé, les eaux descendront sur la couche du terrain imperméable, en passant de l'autre côté de la faille (fig. 15) ; à moins que les strates

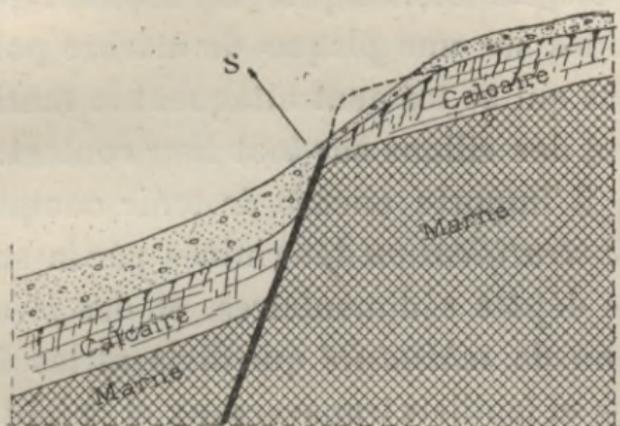


Fig. 15.

ne soient dirigées dans le sens opposé à la pente de la faille (fig. 13).

En outre des lithoclasses ordinaires, *fissures et failles*, les roches peuvent présenter des cassures produites par la pénétration des racines et des plantes lesquelles, agissant mécaniquement et physiquement à la fois, déterminent des cassures et des dislocations.

On connaît l'énorme expansion des racines et la facilité avec laquelle elles se fraient passage

dans la roche ; mais ce que l'on connaît moins, c'est leur activité chimique. Elles émettent, en effet, des sucs assez acides pour attaquer la matière des roches.

L'expérience suivante, due au chimiste anglais Sachs, est caractéristique. En laissant germer des graines sur une plaque de marbre poli, les radicelles qui se forment attaquent le marbre et y gravent des sillons sur tout leur contact.

Enfin il importe encore de tenir compte des *joints de stratification* déterminés par la succession des dépôts sédimentaires, et des *joints de clivage* ou de *schistosité* qui divisent les dépôts en lames et feuillets transversaux et créent ainsi autant de minces canaux de circulation pour les liquides. Les roches éruptives elles-mêmes présentent souvent des diaclases, ou plutôt des plans de fracture qui tendent à les diviser en fragments parallélipipédiques (*ophites, basaltes, etc.*), et qui sont le résultat soit de contractions survenues à la suite du refroidissement, soit de compressions déterminées par des mouvements dynamiques de la croûte terrestre.

En résumé, tandis que les terres, les sables et les matériaux détritiques livrent passage aux eaux météoriques par imbibition, porosité et

capillarité entre leurs divers éléments, les roches diaclasiques deviennent perméables grâce à des fissures de diverses natures qui tendent à se développer de plus en plus à mesure que les liquides les pénètrent. Dans le premier cas, la circulation des eaux est *continue* ; dans le second, elle est *irrégulière* et peut même être *interrompue* si les fentes, poches et couloirs à eau se déversent les uns dans les autres.

Les calcaires proprement dits sont les plus caractérisés parmi les roches diaclasiques. Ensuite viennent les craies blanches et marneuses, la craie tuffau, les basaltes, les grès et quelquefois les granites.

Parmi les grès, certains d'entre eux, comme ceux des Vosges à grains grossiers, sont assez poreux ; ceux de Fontainebleau, de Rambouillet, de Chevreuse, etc., à grains très fins, sont plus poreux et leur fissilité est plus grande.

D'autres facteurs influent encore sur le coefficient de perméabilité ; ainsi l'absorption de l'eau est plus aisée dans une strate horizontale que dans une strate inclinée. De plus, elle est favorisée par un état préalable de sécheresse prolongée des roches ou encore par une pente plus rapide d'un niveau de drainage.

Ajoutons, pour montrer le degré variable de la perméabilité proprement dite des roches, que les *calcaires tertiaires* sont généralement très perméables; ceux du *crétacé*, du *jurassique* et du *triasique* le sont moins, mais plus que ceux du *carbonifère*. Enfin les calcaires des terrains *dévonien* et *silurien* sont à peu près imperméables, sauf lorsqu'ils présentent des failles ou des fentes de dislocation de largeur appréciable, car leurs diaclases sont généralement très jointives et laissent difficilement suinter l'eau.

II

TERRAINS IMPERMÉABLES

Après avoir traversé les terrains meubles et les roches fendillées, les eaux pluviales finissent par rencontrer une roche imperméable qui les arrête et sur laquelle elles cheminent par gravité.

Il est rare que cette descente à travers le sol perméable atteigne une grande profondeur, car les terrains imperméables sont fréquents et alternent avec les strates perméables; c'est donc presque toujours à peu de distance du sol que

l'on doit rencontrer les premiers écoulements souterrains.

Les sols imperméables sont les **marnes** et les **roches compactes et massives**.

Les marnes sont des argiles intimement mélangées avec des terres ou des sables calcaires. Suivant que l'argile ou le calcaire prédomine, on les dit *argileuses* ou *calcaires*. Leur texture est généralement compacte ou terreuse; on trouve aussi des marnes feuilletées, comme les *schistes bitumineux* ou les *schistes cuivreux*. Elles présentent de grandes variations de couleur : blanc, vert, gris, brun, rougeâtre et noir.

Toutes les marnes ne sont pas également imperméables. Les *marnes argileuses*, qui contiennent de 50 à 75 p. 100 d'argile et 25 à 40 p. 100 de calcaire, sont à peu près imperméables; il en est de même des *marnes calcaires* qui renferment 20 à 30 p. 100 d'argile et 50 à 70 p. 100 de calcaires. Les premières sont d'une couleur foncée, les autres sont grisâtres. Elles se divisent et s'émiettent en se séchant, mais l'eau les gonfle et ressoude rapidement leurs éléments fissurés ou fragmentés.

Une autre variété, la *marne magnésienne*, de couleur verdâtre, qui contient de 13 à 30 p. 100

de carbonatè de magnésie, est également imperméable ; et, particularité à signaler, les eaux qui séjournent à sa surface prennent une teinte blanche laiteuse.

Mais les marnes dites *sablonneuses*, qui sont des marnes calcaires mélangées d'une forte proportion de sable, 25 à 70 p. 100, retiennent moins bien l'eau.

Les terrains argileux sont souvent désignés comme imperméables. C'est une erreur, au point de vue absolu. Les argiles s'imbibent très lentement, il est vrai, particulièrement lorsqu'elles sont pures, mais elles absorbent rapidement l'eau quand elles sont mélangées de sables siliceux ou calcaires, d'oxydes de fer ou autres impurétés.

Dans une note présentée en 1883 à l'Académie des Sciences, sur l'aptitude des terres à retenir l'eau¹, M.-P. Pichard, directeur de la station agronomique de Vaucluse, relate une série d'expériences ayant pour but de reconnaître la résistance des sols au passage de l'eau et montrant, en même temps, avec quelle lenteur relative les

¹ *Aptitude des terres à retenir l'eau; application à la submersion des vignes.* Note de M. P. Pichard. *Comptes rendus*, t. XCVII, p. 304; 2^e sem. 1883.

eaux pluviales traversent les terres arables argileuses.

Voici quelques-uns des chiffres qu'il a trouvés en opérant sur des couches de terre préparées, de diverses natures, sous une épaisseur de 0,50 m.

Composition des terres.		Durée de l'imbibition totale.
I.	Argile grasse de Bollèvre.	55 jours.
II.	{ Argile. 30 Sable calcaire palpable. 70 }	45 —
III.	{ Argile 20 Calcaire palpable 80 }	42 —
IV.	{ Argile 30 Calcaire impalpable 15 Calcaire palpable 55 }	36 —
V.	{ Argile. 20 Calcaire impalpable 25 Calcaire palpable 55 }	20 —
VI.	{ Argile. 30 Silex impalpable. 15 Silex palpable 55 }	16 —
VII.	{ Argile 20 Silex impalpable. 30 Silex palpable. 50 }	8 —
VIII.	{ Argile 10 Silex impalpable. 40 Silex palpable. 50 }	5 —
IX.	{ Argile 10 Calcaire impalpable 90 }	6 —
X.	{ Argile 10 Silex impalpable. 90 }	28 heures.

Les terres II, III, IV et V sont assimilables, comme composition, aux marnes calcaires ; elles sont très peu perméables. Les terres VI, VII et VIII sont analogues aux marnes sablonneuses, elles sont plus perméables.

De ces intéressantes expériences, M. Pichard conclut :

« En ne tenant compte que de l'argile et des éléments impalpables qui jouent le principal rôle au point de vue de l'étanchéité, et en négligeant la perte d'eau due à l'évaporation, on peut, en se référant aux indications du tableau, estimer qu'un terrain, sol ou sous-sol, dans les conditions ordinaires, peu caillouteux ou pierreux, est propre à la submersion et retiendra l'eau sans renouvellement pendant cinquante jours, lorsqu'il renferme un des éléments ou mélange d'éléments suivants :

1	Argile pure	30 p. 100
2	{ Argile	20 —
	{ Calcaire impalpable	20 —
3	{ Argile	20 —
	{ Silex impalpable	30 —
4	{ Argile	10 —
	{ Silex impalpable	60 —
5	{ Argile	10 —
	{ Calcaire impalpable	45 —

Ainsi donc, on ne doit pas considérer les argiles plus ou moins pures comme des terres imperméables ; il faut cependant faire une exception pour la *glaise*, variété d'argile contenant de la chaux et de l'oxyde de fer.

Mais il convient de remarquer que l'imperméabilité existe en fait quand il s'agit de couches argileuses superficielles ayant au moins 50 à 60 centimètres d'épaisseur, car l'eau pluviale, dans les circonstances ordinaires, n'a pas le temps de les pénétrer et trouve plus de facilités à retourner dans l'atmosphère sous forme de vapeur ; on peut en dire autant des bancs argileux du sous-sol lorsque leur épaisseur atteint plusieurs mètres.

Toutefois, il arrive que ces bancs argileux, si épais qu'ils soient, ne sont imperméables qu'en apparence, car ils sont fréquemment traversés par des bandes perméables de sable ou de gravier qui constituent autant de canaux d'écoulement.

Enfin la perméabilité devient manifeste en certaines circonstances anormales, lorsque, par exemple, la saison pluviale se prolonge outre mesure. Dans ce cas, il y a successivement imbibition et saturation des terrains argileux,

puis écoulement de l'excès d'eau qui provoque des déplacements de roches et des catastrophes comme celles que l'on a quelquefois à déplorer à la suite de pluies persistantes.

Les éboulements de terrains et les glissements de roches ne sont cependant pas toujours provoqués par un effet direct des eaux. Le professeur Uzielli de Florence a récemment indiqué et vérifié¹ qu'une semblable rupture d'équilibre est due, dans quelques cas, à la pression de l'air qui a pénétré dans les espaces capillaires des terrains et s'est accumulé à la base. S'il en est ainsi, le plan de glissement coïncidant avec celui de la stratification, on conçoit qu'aucun mur de soutènement ne pourrait arrêter le mouvement d'une colline ; le meilleur remède serait de chercher à recouper la couche argileuse de drainage par une tranchée verticale pour en expulser l'air accumulé, ou encore de perforer l'argile dans la direction de sa plus grande poussée.

En résumé, les roches massives ou compactes considérées comme **imperméables** sont : la plupart des *granites* et des *porphyres*, les *roches*

¹ D. Sangiorgi. Sur la variation de volume des solides baignés dans les liquides et sur les expériences du professeur Uzielli. *Giornale de geologia pratica*, 1905.

granitiques et granitoïdes (syénites, prologines, diorites, gneiss, etc.), les *schistes cristallins et métamorphiques*, certains grès à grains très fins, la *craie verte ou glauconienne*, les *dolomies liasiques et permienes*, les *quartz et quartzites*, les *calcaires très compacts*, les *marnes et argiles marneuses*, certaines *roches sédimentaires* dont la stratification est horizontale ou peu inclinée, et, en général, toutes les roches non fissurées ou fendillées, celles que j'appellerai les *roches adiaclasiques*.

A proprement parler, il n'y a pas de roches absolument imperméables, mais celles que je viens d'énumérer : *roches massives ou compactes non fendillées*, *roches cristallines*, *schistes argileux*, *argiles et marnes*, sont considérées par l'hydrologue comme *imperméables*, parce qu'elles s'opposent à une pénétration *profonde* des eaux souterraines.

CHAPITRE V

LOIS GÉNÉRALES DE L'HYDROLOGIE SOUTERRAINE DÉDUITES DE LA CON- FIGURATION PHYSIQUE DU SOL

Au point de vue hydrologique et conformément aux considérations qui précèdent, les terrains présentent deux caractères bien tranchés : ils sont perméables ou imperméables.

Or, leur aspect physique permet de les classer assez facilement, à première vue, dans l'une ou l'autre catégorie.

I

RECONNAISSANCE DES TERRAINS IMPERMÉABLES

Les sols granitiques se silhouettent par des sommets arrondis et de formes basses, dénudés

et presque toujours stériles ; ils sont découpés par un grand nombre de petites vallées.

Quant aux massifs de granite, on les voit saillir en gibbosités au-dessus des schistes cristallins ou de transition qu'ils traversent.

Les terres et sables provenant de leur désagrégation s'amoncellent au pied des versants et forment des sols légers très perméables ; ce sont des terres à *seigle*, *avoine*, *sarrasin*, *millet*, *pommes de terre*. On y trouve les arborescences spéciales dites *silicicoles* : *châtaignier*, *chêne-liège*, *pin maritime*, etc., et comme plantes de friches : le *genêt à balai*, l'*ajonc*, la *bruyère*, l'*arnica de montagne*, la *digitale pourprée*, le *myrtillier*, la *fougère aigle*, l'*anémone jaune*, etc.

Les sables salés produisent les *soudes*, l'*arundo arenaria*, le *convolvulus soldanella*, l'*elymus arenarius*, etc.

Si la couche perméable de recouvrement est mince, les eaux de pluie circulent difficilement et il se forme des tourbières et des marais.

Les trachytes s'élancent en massifs de montagnes coniques dont les cimes sont quelquefois très élevées (*Chimborazo*, 6.350 mètres).

Les schistes anciens et cristallins, les quartzites affectent des formes plus aiguës avec des

arêtes saillantes. Ils donnent des sables fins, analogues aux précédents, mais qui forment des sols généralement très siliceux et peu propres à la culture. Les roches, particulièrement, se dénoncent par leur stérilité.

Les porphyres présentent des formes aiguës, des lignes crénelées. Les épanchements et les dykes porphyriques abondent dans les périodes carbonifère et permienne; ils sont plus rares aux époques plus anciennes.

Les terrains argileux et marneux, qui sont plus ou moins imperméables, sont manifestés par des formes molles, des pentes douces et surtout par la présence fréquente d'eaux stagnantes : lacs, marais, étangs. Sur les sols simplement humides, on trouve des *joncs*, des *carex*, des *prêles*, etc.; quand ils deviennent tourbeux, ils sont caractérisés par une plante spéciale, la *houque laineuse*.

Les terres argileuses dites *fortes* sont favorables aux essences calcicoles lorsqu'elles renferment une certaine quantité de calcaire. Cependant quelques plantes leurs sont spéciales : *peuplier*, *frêne*, *orme*, *aulne*, *aubépine*, *coudrier* ou *noisetier*, etc. Elles conviennent également au *sureau-yèble*, au *tussilage pas-d'âne*, au *thlaspi*,

à la *gesse tubéreuse*, à l'*ortie jaune*, à la *renoncule à tête d'or*, à la *chicorée sauvage*, etc.

II

RECONNAISSANCE DES TERRAINS PERMÉABLES

Les roches calcaires, qui sont extrêmement répandues, sont faciles à reconnaître. D'abord tout calcaire et quelle que soit sa couleur : blanche, grise, jaune, bleuâtre ou noire, donne invariablement une rayure blanche à la pointe du couteau.

Les roches se terminent par des crêtes plus ou moins alignées dans lesquelles on distingue des cassures et des surplombs.

Les versants affectent souvent la disposition en gradins, qui correspondent à des ruptures de strates en affleurement.

Les anfractuosités et les cavernes s'y rencontrent fréquemment.

Au contraire des terrains imperméables, les terrains calcaires sont creusés par de rares mais profondes vallées, et les plateaux y sont importants.

Toutefois ces caractères perdent leur netteté quand les roches calcaires alternent avec des schistes, des argiles ou des sables ; ces éléments modifient le relief général et, par superposition, adoucissent les crêtes et les versants.

Les essences dites **calcicoles** qui se plaisent de préférence dans les terrains calcaires sont : le *buis*, l'*olivier*, le *chêne ordinaire*, le *pin d'Alep*, le *hêtre*, le *tilleul*, le *cytise faux-ébénier*, le *cornouiller mâle*, le *cerisier de Sainte-Lucie*, le *mahonia à feuilles de houx*, l'*épine-vinette*, etc., et certaines plantes de friches telles que les *chardons*, les *muscaris*, la *gentiane*, l'*ellébore fétide*, le *pied-d'alouette*, les *coquelicots*, la *digitale jaune ou lutea*, la *germandrée à fleurs roses*, la *carotte sauvage*, l'*ail jaune*, etc.

Les sols provenant de la désagrégation des calcaires sont riches en chaux et souvent en acide phosphorique ; aussi sont-ils très fertiles.

Les grès présentent des formes arrondies et, comme particularité, des parties saillantes en forme de colonnes ou de cônes isolés, analogues à ces pierres dites *mégalithiques* avec lesquelles on les confond quelquefois. Mais ces saillies, de formes bizarres, ne sont pas dues au travail

NATURE DES CHAM- PIGNONS	EN TERRES ARGILEUSES ¹	EN TERRES SILICEUSES	EN TERRES CALCAIRES
Comes- tibles.	Morille co- mestible. Helvelle élas- tique. Clitocybe géotrope. Hypholome de Candolle.	Lycoperdon ou Vesce de loup. Russule ver- doyante. Lépiote éle- vée.	Oronge comestible. Amanite solitaire. Champignons de couche. Trichonome rus- sule. Russule sans lait. Bolet raboteux. Craterelle corne d'abondance. Clavaire jaune. Hydre bosselé (et truffes).
Vénéneux.	Entonome li- vide. Russule fé- tide.	Fausse oron- ge. Oronge ci- trine. Scléroderme verruqueux.	Oronge verte. Oronge blanche. Amanite panthère. Lactaire à fossettes. Lactaire zoné. Russule rouge. Bolet sanguin. Bolet satan.
Très vénéneux.	»	Amanite vi- treuse.	»
Suspects.	Pleurote ter- restre. Hypholome pleureur. Lactaire à toison. Lactaire sans zones.	Lactaire plombé. Bolet bleuis- sant. Bolet velouté.	Lactaire visqueux. Lactaire pâle. Russule dorée. Russule striée. Clavaire dorée.

¹ Au point de vue de la culture, les terres sont argileuses, siliceuses ou calcaires. — Les terres argileuses (fortes, froides, gréseuses) contiennent au moins 50 p. 100 d'argile, les terres siliceuses (légères, chaudes) renferment au moins 60 p. 100 de sable siliceux et les terres calcaires (calcaires proprement dits, argilo-calcaires, silico-calcaires) ont plus de 50 p. 100 de calcaire.

de l'homme comme les *cromlechs* et les *alignements de pierres* ; elles sont le résultat de dégradations et de dénudations produites par les agents atmosphériques.

Les sols d'origine gréseuse sont caractérisés par des essences siliceuses.

Comme on le voit, la végétation dénonce la nature de la couche superficielle du sol.

Un savant mycologue français, M. Boudier, a été plus loin encore. Il a montré que chaque terrain est caractérisé par des champignons spéciaux, comme il résulte du curieux tableau ci-contre.

Ainsi donc la végétation, par son aspect et les particularités de la flore, décèle les terrains perméables et les sols mouillés. Elle présente encore un autre avantage appréciable, celui de dénoncer immédiatement, par des indices spéciaux, la nature particulière des eaux les plus rapprochées du sol et l'utilisation auxquelles celles-ci peuvent se prêter.

Ainsi, lorsque les petites herbes, les mousses et les sphaignes sont malingres et recouvertes de taches grisâtres sablonneuses au toucher, c'est que l'eau qui les alimente est très chargée de matières calcaires et magnésiennes ; c'est l'indice

d'une eau *dure*, impropre à la boisson et souvent même aux lavages.

Si le terrain est maculé de taches rouilleuses avec des mousses de couleur jaunâtre, les herbes y poussent mal. C'est l'indication que les eaux sont ferrugineuses et l'on peut être assuré que leurs dépôts ocreux finiront par colmater le terrain et le rendre imperméable.

Les eaux *croupissantes, odorantes, puantes, tourbeuses, pétrifiantes, séléniteuses, acides, etc.*, sont impropres à l'alimentation des êtres et des plantes.

D'autre part, la végétation est serrée, fraîche et bien verdoyante lorsque les racines se nourrissent dans de bonnes eaux et plus elle est vigoureuse et d'allure grasse, plus les eaux souterraines sont rapprochées du sol.

Ces divers indices, qu'on pourrait encore multiplier, sont caractéristiques et bien connus des bacillogyres et des sourciers.

En résumé, les accidents topographiques, l'orographie et la végétation du sol, indiquent à première vue si celui-ci est perméable ou non.

Lorsque le terrain est plat, peu accidenté et montre peu de ruisseaux, c'est l'indice qu'il est *perméable*, parce que les eaux pluviales n'y

séjournent pas et le traversent rapidement.

Si, au contraire, le sol est sillonné de vallons, de ravins et parsemé de nombreux cours d'eau, c'est qu'il est *imperméable*. Les eaux séjournent à la surface, forment des lacs et des étangs, puis s'écoulent en ravinant les versants.

Cette classification si simple des terrains par leurs caractères physiques a une grande importance, au point de vue hydrologique, pour celui qui projette d'étudier une recherche d'eaux souterraines. En effet, dans le premier cas, il peut immédiatement conclure que les eaux d'infiltration se rencontreront à une faible profondeur, à la base de la couche perméable superficielle. Dans le second, au contraire, on ne pourra les atteindre qu'après avoir traversé toute la couche imperméable; au-dessous de celle-ci on aura des chances de rencontrer un nouveau terrain imperméable, mais précédé d'un banc perméable imbibé par ses affleurements ou par des cassures accidentelles de la couche imperméable de recouvrement et parcouru par une nappe aquifère.

III

LOIS GÉNÉRALES

On peut formuler, comme conséquence de tout ce qui précède, les règles suivantes :

1° *En un point quelconque du sol, on rencontrera des eaux souterraines pourvu que l'on creuse à une profondeur suffisante ;*

2° *Dans les régions où les ruisseaux et les eaux stagnantes sont rares, il existe dans le sous-sol des sources nombreuses, abondantes et peu profondes ;*

3° *Dans les régions sillonnées par de nombreux cours d'eau et couvertes d'étangs et de marais, les eaux souterraines sont rares et, en tout cas, ne peuvent être rencontrées qu'à une profondeur assez grande.*

Telles sont les premières lois scientifiques de l'hydrologie souterraine, comme elles résultent de la *configuration* physique du sol et des indications générales fournies par la stratigraphie.

CHAPITRE VI

RÉGIME DES EAUX SOUTERRAINES ET DES SOURCES

I

ORIGINE DES SOURCES

On a toujours une tendance à se figurer que les eaux souterraines sont amoncelées dans des bassins ou réservoirs naturels dont le trop-plein s'écoule entre des berges en donnant naissance aux sources.

L'abbé Paramelle lui-même dit que les infiltrations se réunissent peu à peu « *pour former des cours d'eau souterrains dont le volume augmente à mesure qu'ils s'éloignent de leur lieu d'origine*¹ ».

M. Daubrée a fait justice de ces erreurs :

¹ *L'Art de découvrir les sources*. 4^e édition, p. 126. Paris, 1896.

« Les sources¹, dit-il, sont alimentées par des courants souterrains qui circulent dans les fissures et dans les interstices des roches, et qui reçoivent généralement le nom de nappes souterraines.

« Les noms de nappes d'eau et de niveaux d'eau ont donné souvent lieu à des erreurs. Il ne s'agit pas d'une véritable nappe d'eau qui serait interposée entre des roches solides, mais d'eau logée dans les interstices des roches solides dont elle ne représente qu'une faible portion du volume total.

« Dans le cas où une telle nappe d'eau imprègne des roches poreuses, telles que les sables ou les graviers, elle est en général continue. Il n'en est pas de même quand l'eau n'occupe que des fissures ou des cavités plus ou moins espacées. »

En effet, la pratique constante montre qu'en réalité les fleuves et ruisseaux souterrains, aussi bien que les bassins d'eaux stagnantes, sont des exceptions, et qu'en général, il existe une circulation liquide continue, sous forme de filets,

¹ *Les eaux souterraines à l'époque actuelle, leur régime, leur température, leur composition, au point de vue du rôle qui leur revient dans l'économie de l'écorce terrestre*, par A. Daubrée. Paris, 1887, t. I, p. 18.

veinules, suintements et écoulements capillaires à travers les sables et les roches perméables, qui forment ce que j'appellerai des **couches ou gisements aquifères**¹.

Les infiltrations pluviales pénètrent dans le terrain perméable qu'elles commencent par imbiber et saturer complètement; puis, leurs apports continuant, l'excès d'eau se déplace lentement au-dessus de la roche imperméable sous-jacente; la descente est limitée en profondeur par cette surface impénétrable qui constitue un *niveau de drainage*.

On conçoit qu'il puisse exister plusieurs niveaux de drainage, c'est-à-dire plusieurs couches aquifères superposées et contenues entre des bancs imperméables. Mais je considérerai plus spécialement les couches les plus rapprochées du sol, celles dont les eaux alimentent les puits ordinaires et qu'on désigne sous le nom d'**eaux phréatiques** (de φρεαζς, puits),

¹ J'emploie intentionnellement ces deux expressions qui seraient plus correctes que celle de **nappes d'eau**; mais comme cette dernière est entrée dans le langage courant, je m'en servirai également, concurremment avec les autres, dans le cours de cet ouvrage.

Une nappe ou couche aquifère se trouve limitée entre la surface qui constitue le *niveau hydrostatique* et son lit imperméable ou *niveau de drainage*.

par opposition aux eaux très profondes dites **eaux artésiennes**. Les premières circulent généralement à moins de 50 ou 60 mètres de profondeur.

L'eau chemine donc dans le milieu perméable, retenue sur un lit imperméable; et, lorsque ce dernier, pour une cause ou une autre, vient

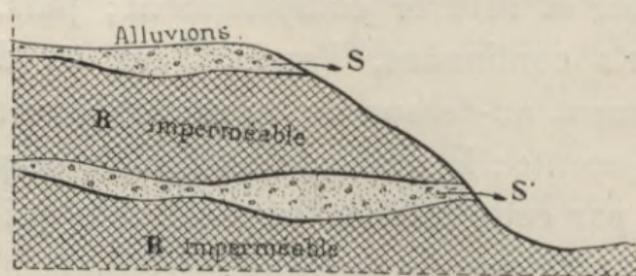


Fig. 16.

affleurer au sol, elle s'échappe à l'extérieur en formant des sources (fig. 16).

L'affleurement peut se produire sur un versant, dans une vallée d'érosion, par exemple, c'est le cas indiqué par la figure 16 où les sources se manifestent aux points S et S'; ou encore dans une plaine ou un vallon où les eaux peuvent arriver à sourdre à l'extérieur par un effet de syphonement en S (fig. 17), analogue à celui qui détermine la formation des eaux artésiennes.

Tant que le cheminement à travers le banc perméable est effectif, la source point; mais

lorsque, à la suite d'une longue sécheresse, l'apport des eaux pluviales vient à cesser, la couche aquifère s'amoin-drit, le niveau hydrostatique s'abaisse et la source diminue si même elle ne tarit.

Le phénomène inverse se produit lorsque les pluies recommencent, la couche aquifère se gonfle, la source reparaît et reprend son débit normal.

En général, la descente des eaux météoriques jusqu'à la couche aquifère et leur déplacement ne s'effectuent que très lentement; c'est pourquoi l'effet d'une sécheresse prolongée tarde souvent à se manifester au point d'émergence des sources, mais il n'en est pas moins certain que celles-ci sont soumises à des variations de débit.

Le débit moyen ou normal est celui dont il

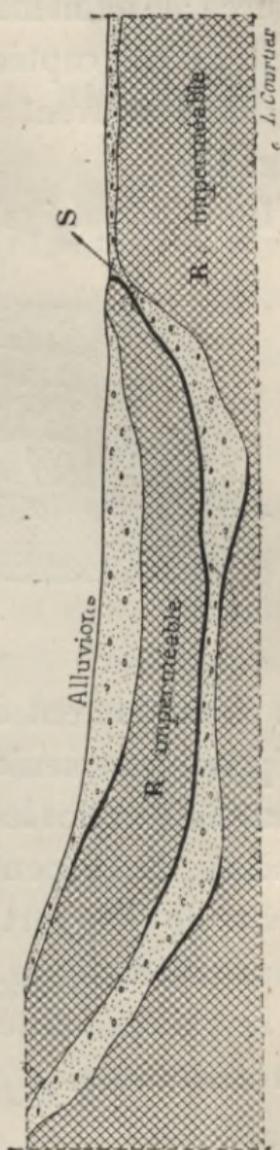


Fig. 17.

faut tenir compte dans toute évaluation de source ; le **débit maximum** sert au calcul des conduites d'eau captée, enfin le **débit minimum** correspond souvent au tarissement de la source (fig. 18).

Le débit est également influencé par la vitesse

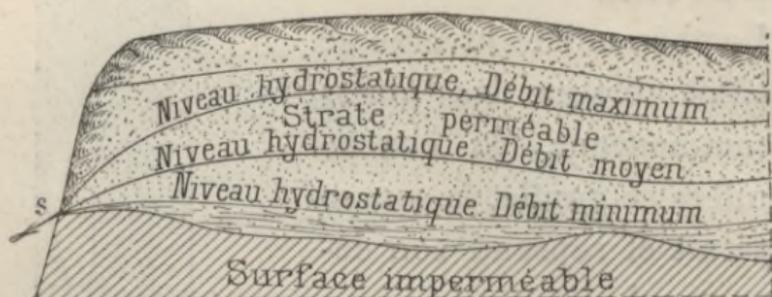


Fig. 18.

de cheminement des eaux souterraines. Celle-ci dépend non seulement de la nature du banc perméable dans lequel se fait l'écoulement, mais encore de la pente du niveau de drainage et enfin de l'apport plus ou moins abondant des eaux météoriques.

Je vais examiner successivement ces diverses circonstances.

II

INFLUENCE DU MILIEU PERMÉABLE

Il est certain que plus les vides de remplissage des sables et graviers sont grands, plus rapide est la circulation. De même, plus les fissures des roches perméables sont développées, plus vite elles sont traversées par les filets liquides.

On peut se rendre compte, avec une certaine approximation, de la variation des vitesses, sous l'influence du milieu, en les comparant à celles que doivent prendre les eaux courantes pour imprimer un mouvement d'entraînement aux sables et pierres qui recouvrent leur lit.

Le tableau suivant indique les vitesses maxima qui permettent aux eaux de s'écouler sur un lit de matériaux divers sans que ceux-ci se déplacent.

Nature des matériaux.	Vitesse maxima par seconde.	
Terre détrempée, boue, limon.	0,075 m.	} Cours d'eau lents.
Terre argileuse, sable très fin.	0,15 —	
Sable, jusqu'à 4 mm	0,20 —	
Sable ou petit gravier, jus- qu'à 8 mm	0,30 —	

Nature des matériaux.	Vitesse maxima par seconde.	
Gravier, jusqu'à 25 mm.	0,60 m	} Cours réguliers.
Cailloux, de 20 à 50 mm	0,90 —	
Roches fragmentaires	1,20 —	} Cours rapides et crues.
— schisteuses tendres	1,40 —	
— feuilletées à tranches dénudées.	1,80 —	
Roches dures	3,00 —	Torrents.

Dès que ces vitesses sont dépassées, les matériaux se mettent en mouvement.

Les chiffres qui précèdent ont été calculés au moyen de la formule :

$$V = \sqrt{\frac{40}{3} l}$$

établie par le professeur Uzielli¹, pour déterminer la vitesse d'un torrent d'après le plus grand diamètre l des matériaux entraînés sous forme de galets ou corps discoïdes.

V qui représente la vitesse de fond est liée à la vitesse v de surface par la relation :

$$V = K v.$$

Le coefficient K varie avec la hauteur d'eau

¹ Note sur une formule permettant de calculer la vitesse d'un torrent par la grosseur des matériaux entraînés, par M. Charlon, *Génie civil*, t. XVII, p. 170.

et la nature du lit ; celui-ci pouvant être terreux, sableux, caillouteux ou rocheux.

Pour une hauteur d'eau inférieure à 2 mètres et un lit rugueux, K varie de $0^m,60$ à $0^m,85$.

III

INFLUENCE DES DÉNIVELLATIONS DU PLAN DE DRAINAGE

Le niveau de drainage n'est jamais régulier ; il est accidenté par des pentes, des dépressions, des reliefs qui constituent parfois de véritables barrages et interrompent la régularité de l'écoulement. Mais, tant que les apports sont continus, le mouvement se poursuit ; si le banc perméable s'épanouit, la couche aquifère prend de l'extension. Il n'y a pas stagnation dans les bas-fonds, en B ou D, par exemple (fig. 19), car les échanges d'eau sont continus et se succèdent les uns aux autres, d'amont en aval, c'est-à-dire dans le sens du pendage des terrains ou de la gravité.

Si le banc ABCD est une couche de sable ou de gravier contenue entre deux surfaces imperméables, l'imbibition d'eau est la même partout,

et les filets liquides s'écoulent en toute la section avec la même vitesse. Un accroissement de vitesse en un point quelconque supposerait un déplacement du sable, une modification de l'équilibre général, ce qui ne se produit qu'accidentellement.

Dans la couche alluvionnaire ou détritique

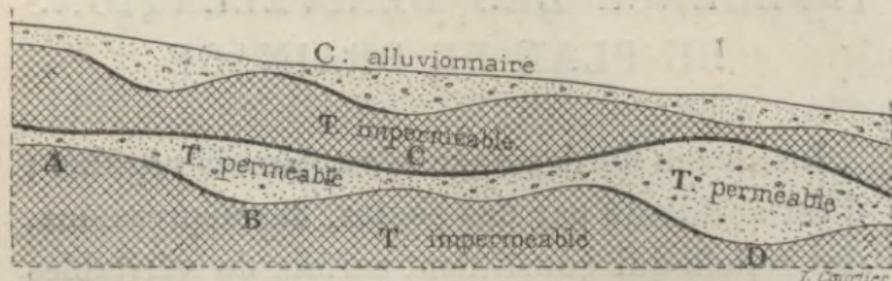


Fig. 19.

formant le sol proprement dit, il est évident que la circulation est différente, en raison des influences atmosphériques qui s'exercent directement à sa partie supérieure. Dans ce cas, la couche aquifère de saturation est limitée à une certaine épaisseur, variable avec l'état d'évaporation et la chaleur extérieure ; elle est alors assimilable à un cours d'eau qui s'écoulerait sur le terrain imperméable formant son lit, ou plus exactement sa limite inférieure dont elle suit les déclivités. On comprend que, dans ces strates

perméables superficielles, les puits doivent donner d'autant plus d'eau qu'ils sont plus profonds et plus rapprochés du terrain imperméable.

Si la strate perméable est une roche fendillée, le plan de drainage joue un rôle plus important, car il limite en profondeur l'action destructive des eaux et leur fournit une base d'écoulement peu ou pas altérable. Ces eaux, en effet, traversent les vides, les fentes et les crevasses ; peu à peu, elles usent les parois sur leur passage et, par effet chimique aussi bien que par effet mécanique, elles élargissent les fentes, disloquent la roche et provoquent des ruptures et des chutes de blocs (fig. 20) entre lesquels s'insinue le liquide dont l'action destructive augmente ainsi de plus en plus. Peu à peu la roche se désagrège, et le sable formé aussi bien que les terres filtrées de la surface finissent par combler tous les vides, de sorte qu'au bout d'un certain temps, la nappe liquide est remplacée par une couche aquifère remplissant les interstices d'un banc de sable ABCD (fig. 20), comme dans le cas cité plus haut.

Cet effet remarquable est facile à observer, dans le grès par exemple. Ainsi, l'abatage des blocs de grès fin et blanc, à la carrière des Maré-

chaux, dans la vallée de Chevreuse, blocs dont on débite des pavés pour les rues de Paris, découvre des couches de sables aquifères (fig. 21)

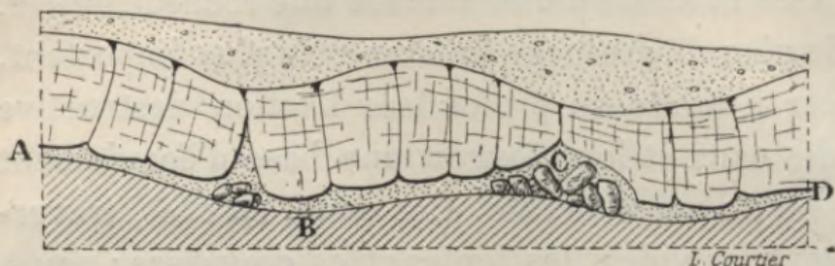


Fig. 20.

interposés entre deux bancs de roche et remplissant les fentes et les diaclases élargies. On observe aussi des poches également remplies

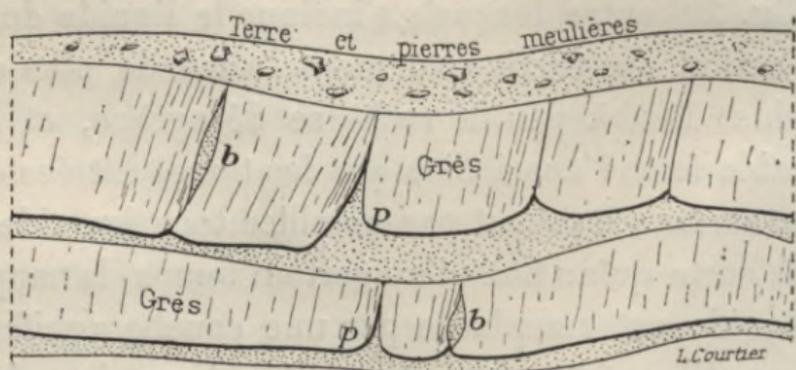


Fig. 21. — Bancs de grès. Carrière des Maréchaux (vallée de Chevreuse).

de sable *pp* et reliées aux diaclases qui affectent une direction croisée perpendiculaire aux plans de stratification. Quelquefois même la poche est

isolée au milieu du grès, comme on le voit en *b, b*, dans la figure 21. C'est par ces cavités et les vides des bancs sablonneux que les eaux pluviales peuvent descendre jusqu'au sous-sol imperméable, sur la surface de drainage.

La même observation s'applique à certains calcaires, et même les cavités *b, b*, prennent quelquefois de grandes proportions et deviennent de véritables gouffres remplis d'eau qui s'écoule en formant des rivières souterraines.

Si les roches fissurées sont des gypses ou des sels gemmes, l'eau qui s'infiltré dans leurs diaclases produit, par dissolution, des cavités qu'elle remplit, formant ainsi des réservoirs accidentels qui déversent leur liquide par des fissures de fond jusqu'au plan de drainage.

En résumé, les eaux souterraines circulent généralement sous forme de suintements et de filets qui se succèdent les uns aux autres en remplissant les vides des couches perméables et suivant les sinuosités du plan de drainage. Quand, sur leur passage, elles rencontrent des dépressions ou des épanouissements de la roche perméable, elles les traversent sans y séjourner ; de sorte que si les apports d'eaux pluviales sont continus, la couche aquifère circule en se renou-

velant sans cesse, et les sources auxquelles elle peut donner naissance sont *perpétuelles* ou *pérennes*, avec un débit qui varie en même temps que ces apports.

IV

COURS D'EAU ET LACS SOUTERRAINS

Dans les roches fissurées, les eaux, par des effets chimiques et mécaniques, s'ouvrent peu à peu passage dans les diaclases qu'elles élargissent en formant de véritables conduits et couloirs. Elles peuvent même, par érosion et corrosion¹, déterminer dans les roches des cavités de formes irrégulières où elles déposent des matières minérales entraînées : telle est l'origine de quelques gisements de fer et de manganèse.

Accidentellement enfin, les couches aquifères peuvent être recoupées ou interrompues par des bassins ou réservoirs naturels d'eau, en communication avec l'atmosphère, quoique sou-

¹ Je rappelle que l'*érosion* est un phénomène d'ordre physique, tandis que la *corrosion* est d'ordre chimique.

vent à des profondeurs de plus de 300 mètres.

De même, il peut se faire que l'un de ces bassins trouve à se déverser extérieurement en aval, et alors la rivière souterraine se continue, à la surface du sol, par un ruisseau qu'elle alimente.

Mais l'existence de ces réservoirs, véritables puits naturels, n'est en somme qu'un accident dans l'histoire générale de l'hydrologie; il faut les considérer comme de vastes diaclases où l'eau s'amasse et circule avec une plus grande activité.

M. Daubrée en a fait une étude particulière et détaillée dans son grand ouvrage sur les eaux souterraines¹. Il explique leurs origines diverses et leur influence sur le régime des eaux souterraines; il décrit les cavernes les plus connues de France, Belgique, Suisse, Italie, Autriche, Angleterre, etc.

En ces dernières années, l'étude des rivières souterraines, des cavernes et des cavités naturelles a été traitée sous le nom de *spéléologie* par M. Martel qui, à la suite d'excursions souvent périlleuses, est arrivé à reconnaître un certain

¹ A. Daubrée. *Op. cit.*, t. I, p. 290 à 389.

nombre de fleuves et lacs souterrains, en France, en Autriche et en Grande-Bretagne. Dans un important Mémoire publié en 1896¹ et suivi de plusieurs autres insérés dans les *Annales des Mines* et dans les *Comptes rendus* de l'Académie des Sciences, M. Martel a recherché l'origine et le rôle des cavités naturelles et leurs rapports avec les émissions filoniennes. Il admet, en principe, que les *abîmes* ou cavités naturelles, percés à pic dans la terre, ont été formés de haut en bas par une double action chimique et mécanique des eaux engouffrées dans de grandes diaclases verticales².

Cette hypothèse paraît juste, car, au point de vue de leur action sur les roches, les eaux *descendantes* sont généralement *actives*, tandis que les eaux *ascendantes* sont plutôt *passives*. Il est rare, en effet, que les eaux de surface, après avoir pénétré dans le sol, y effectuent les dépôts de remplissage ; leur action consiste surtout à attaquer les roches, à les désagréger et à leur emprunter des éléments variés qu'elles dissolvent grâce à leurs propriétés oxydantes, acides ou basiques.

¹ *Applications géologiques de la spéléologie*, par E.-A. Martel. *Annales des Mines*, 7^e livraison de 1896.

² E.-A. Martel. *Op. cit.*, p. 36.

Les eaux *ascendantes*, au contraire, sont plutôt *passives*, en ce sens que, se trouvant plus ou moins saturées de matières minérales, à une haute température et sous une pression élevée mais qui diminue au fur et à mesure qu'elles montent, elles ont une tendance constante à abandonner ces matières, soit qu'elles les déposent dans des fentes ou cavités, soit qu'elles les échangent par voie de substitution chimique avec les matériaux mêmes des roches.

Ces eaux donnent naissance aux *filons métallifères* et *minéraux* d'ordre secondaire, comme j'ai déjà eu l'occasion de le dire. C'est à elles également qu'il faut attribuer l'origine des *filons stériles* de sables et cailloux ; tels sont les filons de sables oligocènes qui traversent les bancs d'argile néocomienne d'Alatyr (Russie) et les étranges filons de sables et galets qu'on a observés dans certaines formations houillères.

En résumé, les eaux descendantes ouvrent ou élargissent, dans les roches, des fentes et cavités ; les eaux ascendantes, au contraire, les remplissent et les exemples que l'on peut citer à l'encontre de cette assertion ne sont que des exceptions¹.

¹ On donne plus spécialement les noms de *bétoires*, *endouvoirs*, *goules*, *embuts*, aux gouffres dans lesquels se perdent

J'ajoute encore qu'il existe, plus particulièrement dans les calcaires jurassiques, des cavités ou cavernes qui sont de véritables gouffres ou abîmes dans lesquels disparaissent quelquefois des rivières de la surface pour reparaître ensuite au jour, après un parcours souterrain plus ou moins long. Cette particularité laisse même souvent des doutes sur l'origine de certaines sources à grand débit ; c'est ainsi que les sources du Loiret ne sont que l'émergence d'un bras souterrain de la Loire, que la puissante source de la Loue dérive du Doubs, etc., etc.

Un grand nombre de rivières souterraines sont donc simplement alimentées par des eaux de surface qui s'engouffrent dans les diaclases des terrains fissurés, dans les failles ou dans des puits naturels connus sous les noms divers de *gouffres*, *bétoires*, *fosses*, *entonnoirs*, *avens*, *barrancs*, *igues*, *goules*, *mardelles*, *dolines*, *scialets*, *chourums*¹, etc.

Ces puits, irréguliers d'allure et de dimensions,

les rivières, et ceux d'*avens*, *barrancs*, *dolines*, *mardelles*, *scialets*, *chourums*, à ceux qui avalent les eaux d'infiltration et de ruissellement superficiel du sol.

¹ Les gouffres les plus profonds sont ceux de Trebiciano (322 mètres). près de Trieste, et le Chourum-Martin (310 mètres), près de Saint-Disdier, dans les Hautes-Alpes.

forment des boyaux coudés que joignent des couloirs parfois si étroits qu'il est nécessaire de les élargir à la mine pour les explorer. A la longue, par érosions, corrosions, dislocations et déplacement de matériaux, les failles et diaclases s'élargissent, leurs parois se creusent, s'éboulent, et les eaux se fraient des passages sur un lit capricieux et accidenté.

En cheminant dans les marnes et même dans les roches fissurées, l'eau les gonfle peu à peu en provoquant des dislocations et même des glissements et des effondrements de terrains. Par contre-coup, le sol superficiel s'affaisse en cuvettes et même en vallonnets vers lesquels concourent ensuite les eaux de surface pour alimenter avec plus d'abondance encore les rivières souterraines.

Dans la plaine d'Opoul (Pyrénées-Orientales) qui forme une immense cuvette de plusieurs kilomètres de diamètre, il existe une douzaine de barrancs dans lesquels s'engouffrent toutes les eaux pluviales et de ruissellement.

Le principal d'entre eux a été exploré jusqu'à 140 mètres de profondeur par M. Roquet-Lalanne en 1906 et 1907; son but était de reconnaître et capter les eaux souterraines qui débouchent en deux rivières dans les rives maré-

cageuses de l'étang de Leucate, à 7 kilomètres du village d'Opoul.

La figure 22 représente la coupe verticale du barranc, jusqu'à 115 mètres de profondeur; on



Fig. 22. — Grand barranc d'Opoul.

y pénètre par une série ininterrompue de puits naturels, cavernes, grottes, couloirs et boyaux. L'eau y circule très lentement dans de petits lacs; elle s'étale un peu plus à la profondeur de 115 mètres. Au delà, le barranc continue à descendre jusqu'à la profondeur explorée de

140 mètres; mais il a été impossible de trouver, à un niveau suffisamment élevé, l'origine des deux rivières souterraines qu'on voulait capter pour irriguer les plaines du Roussillon.

Il est à remarquer qu'un alignement de bétoires ne jalonne pas nécessairement le cours d'une rivière souterraine; cependant, quand cette circonstance se produit, elle fournit de précieux renseignements pour la reconnaissance et le captage de la rivière (sources de l'Avre, de la Vanne, etc.).

En général, les cours d'eau souterrains ne sont ni larges, ni profonds. Les plus importants, d'après M. Martel, ne mesureraient pas plus de 100 mètres de largeur. D'autre part, leur écoulement ne se fait pas avec régularité sur un lit plus ou moins incliné; celui-ci est au contraire accidenté, et constitué par des montées et des descentes en syphon, entre des parois souvent très resserrées et, selon les crues, les eaux montent ou baissent dans les bétoires.

Il en résulte encore une formation de lacs, sortes de réservoirs alimentaires souterrains, qui régularisent le débit des exutoires.

Les rivières souterraines réapparaissent à la surface sous forme de sources auxquelles on a

donné le nom de **fonts**, **bouillons** ou de **sources vaclusiennes** à l'instar de la fameuse fontaine de Vaucluse, dont l'écoulement irrégulier est dû à un jeu de syphon. Dans certaines régions, on leur a conservé l'ancienne appellation celtique, comme la *Doux* à Chatillon-sur-Seine, la *Dhuis* dans la vallée de la Marne, les *Doyes* dans le Jura, les *Duits*, les *Duées*, etc.

Toutefois, il existe certaines cavités qui ne sont pas des réservoirs creusés par l'eau et qui ont une toute autre origine que les diaclases ordinaires; elles sont dues à des inclusions gazeuses formées pendant la période de sédimentation. L'expérience est facile à reproduire. Si, dans un vase en verre plein de sable fin, on ajoute de l'eau, l'air qui remplissait les vides est peu à peu chassé et remplacé par le liquide; mais il arrive aussi que des bulles gazeuses se rejoignent et finissent par former de véritables chambres qui se maintiennent au milieu du sédiment.

Dans des travaux de recherches effectués, en 1895, aux mines de Sunium (Grèce), on rencontrait de grandes cavités absolument isolées dans le terrain calcaire et sans aucune relation avec les griffons de calamine développés au con-

tact du calcaire et des schistes (fig. 23). Ces chambres, souvent de plus de 100 mètres cubes de capacité, n'ont certainement pas d'autre origine qu'une inclusion gazeuse.

J'ai constaté également cette particularité

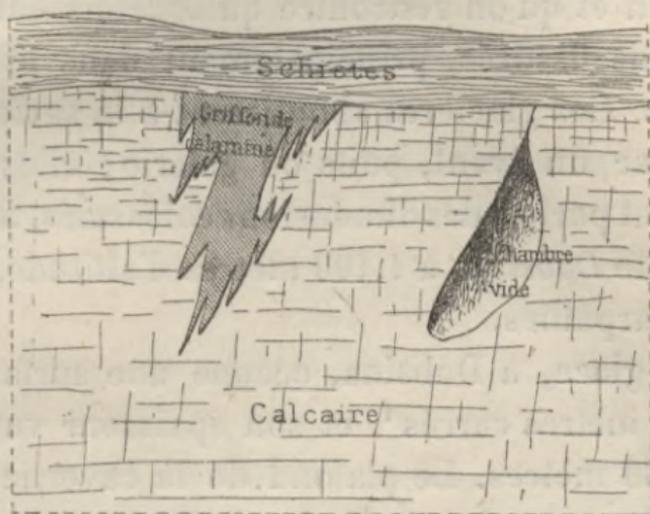


Fig. 23. — Calcaire minéralisé. Mines de Sunium (Grèce).

aux mines de zinc du Bou-Jaber (Tunisie), au début de l'exploitation minière.

La grotte des mines du *Dos*, près d'Engis, en Belgique, est située à 140 mètres de profondeur et mesure 85 mètres de hauteur; sa plus grande section atteint 200 mètres carrés. Elle est accolée à un filon de blende-galène¹.

¹ Ces cavités, d'origine et de nature diverses, ne sont quelque-

Mais, je le répète, ces cas particuliers sont des phénomènes dans l'allure générale des eaux souterraines, au même titre d'ailleurs que les **glacières naturelles**, cavernes remplies de glaces dont on ne s'explique pas bien le mode de formation et qu'on rencontre quelquefois dans les terrains fissurés, principalement dans les calcaires. Ces glacières aboutissent à la surface du sol par un évent, puits ou galerie; elles présentent parfois des dimensions colossales, témoin celle de *Dobsina*, à 1.100 mètres d'altitude, dans les Carpathes.

La glace, à Dobsina, occupe une surface de 4.644 mètres carrés¹, et son épaisseur varie de 35 à 60 mètres. Le plafond de la caverne est à 11 mètres au-dessus de la glacière, mais il est relié à celle-ci par des piliers et des stalactites de glace; la température maxima est de $+ 4^{\circ}$ C. en août, et la température minima est de $- 4^{\circ}$ C. au mois de janvier.

fois en communication avec l'atmosphère que par d'étroites fissures ou des couloirs étranglés. Or, sous l'influence des variations climatériques il se produit, à certaines époques, des entrées ou des sorties violentes d'air qui se manifestent par des sifflements, des détonations et autres phénomènes acoustiques.

¹ *Ice Caves and the causes of subterranean ice*, by Edwin Swift Balch (*Journal of the Franklin Institute*, March 1897, p. 165).

La glacière de la *Schonbergalm*, dans le massif du Dachstein, au-dessus du lac de Hallstadt, est encore plus curieuse. La grotte est à deux étages ; elle se compose d'une grande galerie de 2 kilomètres qui se ramifie en de nombreuses galeries secondaires. On y trouve un puits plein de glace, de 25 m. de profondeur et 35 m. de largeur, plusieurs glaciers dont la longueur dépasse 100 mètres et des stalagmites de glace suspendues sur plus de 12 mètres de hauteur.

CHAPITRE VII

ÉTUDE ET DÉLIMITATION D'UN GISEMENT AQUIFÈRE

I

BASSINS SUPERFICIELS ET SOUTERRAINS

Les sources aquifères souterraines qui alimentent les sources et les puits sont contenues dans un **bassin dit de réception**, lequel est lui-même alimenté par les infiltrations d'eaux météoriques tombant et circulant sur une surface déterminée du sol. Cette surface est le **bassin d'absorption** ou **d'alimentation**.

La réunion de plusieurs bassins partiels d'absorption constitue une **vallée hydrographique**.

En principe, le bassin d'absorption est un **synclinal** limité par des versants de ruisselle-

ment : c'est une plaine, une vallée, un vallon, un vallonnet, dans le thalweg desquels coulent fréquemment des cours d'eau. Il est constitué par des terrains perméables et des roches imperméables.

Lorsque le sol présente beaucoup de résistance à la pénétration de l'eau, le bassin superficiel est un *ravin*, une *combe* à thalweg défini, ou un *cirque* sans thalweg précis.

Le bassin de réception reçoit des eaux de provenances diverses :

1° Des eaux de pluie qui s'infiltrent dans les strates perméables de recouvrement ;

2° Des eaux qui descendent en se frayant passage dans les fractures du terrain et par les zones de contact avec des bordures imperméables ;

3° Les eaux de rivière qui s'infiltrent partiellement à la faveur d'un lit plus ou moins perméable.

Les figures 24 et 25 montrent la position théorique de deux bassins d'absorption accolés et faisant partie d'une vallée hydrographique dont le thalweg est ponctué par un cours d'eau principal. Le gisement aquifère unique qui leur est subordonné traverse deux bassins de réception partiels faisant partie d'un bassin général

qui correspond à la vallée hydrographique; ces deux bassins communicants peuvent cependant être isolés l'un de l'autre, si le niveau hydrostatique s'abaisse suffisamment. La cuvette de

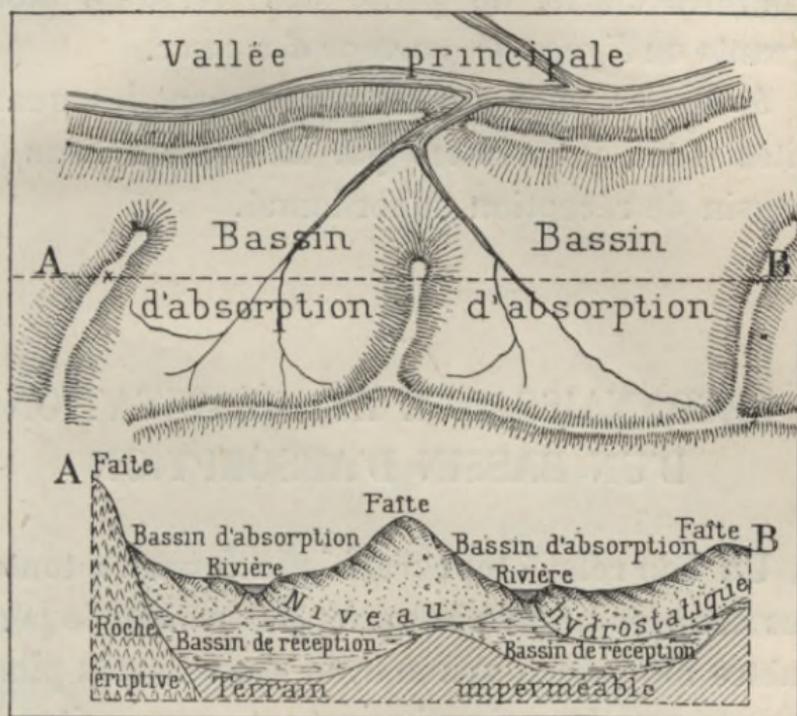


Fig. 24 et 25. — Plan et coupe de deux bassins d'absorption accolés.

gauche est limitée, sur la figure, par une roche éruptive imperméable.

Si l'on veut étudier d'une façon complète la vallée hydrographique, ou tout au moins l'un des bassins partiels, afin de reconnaître les

ressources en eaux de la région, il convient :

a) De déterminer la surface absorbante et perméable du bassin d'absorption, dans le périmètre du synclinal que limitent les lignes de commencement de pente des versants plongeants ou *lignes de partage des eaux*.

b) De calculer approximativement les quantités d'eau introduites par infiltration dans le bassin de réception subordonné.

II

RECONNAISSANCE ET DÉLIMITATION D'UN BASSIN D'ABSORPTION

Un bon relevé topographique fournira toutes les données nécessaires pour déterminer le périmètre de chaque vallon avec ses versants plongeants ou de ruissellement et, par suite, la projection horizontale de la superficie qui reçoit les eaux de pluie.

D'autre part, les cartes géologiques complétées sur place, ou, si l'on manque de cartes, l'étude stratigraphique du terrain, permettront d'évaluer la surface du sol perméable d'absorption par l'établissement des lignes d'affleurement.

Comme j'ai déjà eu l'occasion de le signaler, la reconnaissance des roches et des terrains stratifiés est souvent difficile parce qu'ils sont dissimulés sous des formations plus récentes :

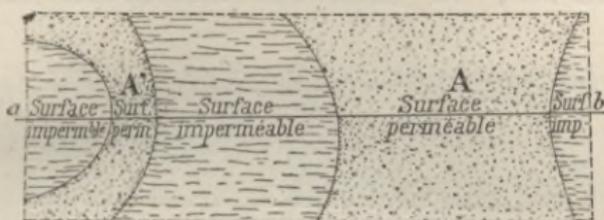


Fig. 26. — Plan superficiel.

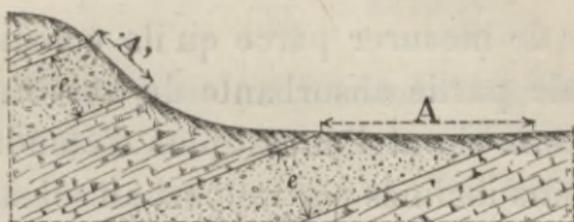


Fig. 27. — Coupe *ab*.

apports de terres et de sables, conglomérats, terrassements, végétation, etc.

C'est par les failles, les accidents de terrains, les escarpements, les érosions, les carrières, les tranchées, les éboulis, les galeries et puits de mine, les grottes et cavernes et, en dernier lieu, par des sondages, que l'on parvient à identifier la nature des roches sous-jacentes, leur coefficient relatif de perméabilité, leurs pentes

et leurs conditions d'écoulement sur la surface de drainage.

Et comme les eaux météoriques ne peuvent pénétrer dans une roche que par son affleurement au sol, ce sont les affleurements qu'il

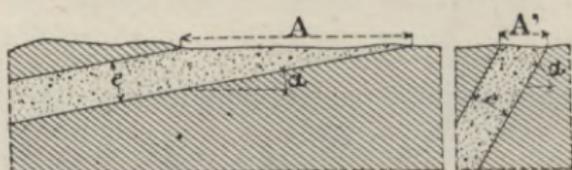


Fig. 28.

importe de mesurer parce qu'ils constituent la principale partie absorbante du bassin.

Or, ceux-ci ont d'autant plus d'étendue qu'ils sont moins inclinés par rapport au sol sur lequel ils débouchent.

Les figures 26 et 27 montrent la grande différence de superficie des affleurements A et A' qui correspondent cependant à deux strates d'égale épaisseur e , mais débouchant l'une en plaine, l'autre en versant.

De même les affleurements diffèrent considérablement lorsqu'ils procèdent de deux roches perméables, l'une très inclinée, l'autre au contraire très horizontale. La figure théorique 28 explique bien leur dissemblance.

Lorsqu'on connaît (fig. 28) la largeur A de l'affleurement et l'angle d'inclinaison α , l'épaisseur réelle e de la strate se calcule par la formule de Maclaren¹:

$$e = A \times \frac{\alpha}{60}.$$

Si la largeur de l'affleurement, mesurée perpendiculairement à la direction, est de 500 mètres, par exemple, et que l'inclinaison de la strate soit de 10°, on trouve :

$$e = 500 \times \frac{10}{60} = 83,30 \text{ m.}$$

Cette règle est suffisamment exacte pour toutes les inclinaisons inférieures à 45°.

La détermination des pentes se fait à l'éclimètre ou clinomètre. C'est un petit appareil très simple composé d'un cadre de bois portant un arc gradué sur lequel se déplace un fil à plomb ou une aiguille lestée.

En posant l'instrument sur une strate inclinée, la position du fil indique immédiatement l'angle d'inclinaison avec une approximation suffisante.

Le clinomètre est généralement agencé en

¹ A. Geikie. *Éléments de géologie sur le terrain*, p. 120, Paris, 1903.

forme de montre ou accouplé à une boussole.

La boussole à éclinètre, connue sous le nom de **boussole de géologue**, présente l'avantage de fournir les inclinaisons et les directions.

Il peut se faire que, trompé par les apparences, l'hydrologue confonde le pendage avec

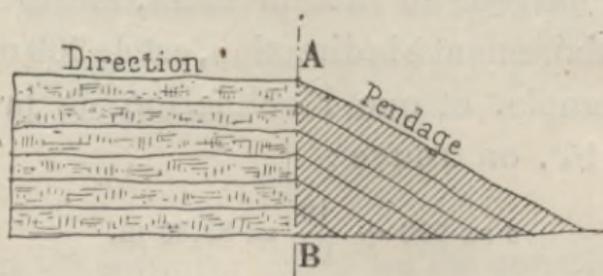


Fig. 29. — Face apparente et pente réelle.

la direction. C'est le cas, par exemple, où les strates se trouvent découpées normalement au pendage; elles semblent alors horizontales alors qu'en réalité elles sont plus ou moins inclinées, comme l'indique la coupe A B dans la figure 29.

Toutefois, aucune erreur n'est possible lorsqu'on a soin de déterminer à la fois la direction et l'inclinaison, comme pour l'étude des plis synclinaux.

J'ai déjà dit l'importance qu'il faut attribuer à ces plis pour la recherche des eaux et la nécessité de les reconnaître avec précision.

En principe, un pli anticlinal est un dos de colline et le pli synclinal un creux de vallon ; mais il peut se faire que ces plis ne définissent ni une cime, ni un thalweg. Il arrive même, contrairement aux définitions et comme je l'ai expliqué au chapitre I^{er}, qu'un pli d'apparence anticlinale coïncide avec une vallée, ou bien un synclinal avec une colline.

Lorsqu'enfin on est parvenu à identifier les roches perméables et imperméables, les plis synclinaux et anticlinaux, les failles, etc., on résume sur la carte leurs diverses particularités au moyen de signes conventionnels, tels que les suivants :

—	Couche horizontale.
T	— très relevée ou verticale.
↓	— inclinée.
~	— ondulée.
P	— perméable.
I _p	— imperméable.
=	Faille.
↑	Pli anticlinal.
↓	
↓	Pli synclinal.
↑	

C'est ainsi que les relevés topographiques et géologiques permettent de déterminer exac-

tement le bassin superficiel qui reçoit les eaux météoriques et alimente les nappes aquifères du bassin souterrain de réception.

III

CAPACITÉ HYDRAULIQUE D'UN BASSIN DE RÉCEPTION

Après avoir reconnu et délimité le bassin d'absorption, il reste à évaluer les quantités d'eau qu'il est susceptible de fournir au sous-sol.

Les statistiques locales indiquent la moyenne annuelle de chutes pluviales, mais il est prudent de la contrôler.

La portion de ces eaux qui pénètrent en profondeur dépend de la **capacité de retenue** du terrain. Or celle-ci diffère très sensiblement de la **capacité d'absorption**; elle n'en est même qu'une faible fraction, comme je l'ai indiqué précédemment (voir le chapitre iv : *Terrains perméables*).

Si l'on imagine un récipient renfermant un dépôt de sables, d'allure régulière et mesurant par exemple 1.000 mètres de côté et 1 mètre de hauteur, son volume total est de 1.000 mètres

cubes. Or, on sait qu'il faut y introduire 400 mètres cubes d'eau pour remplir ses vides ; on dit alors que sa *capacité d'absorption* est de 40 p. 100.

Si le dépôt est mis en état, par des moyens quelconques, d'écouler de l'eau, une partie reste dans la masse par imbibition ou mouillage et l'autre, qui forme excédent, s'écoule librement.

Dans le cas particulier que je viens de citer, le volume d'eau de libre écoulement est sensiblement égal à celui qui est retenu par imbibition.

Il s'écoulera donc librement 200 mètres cubes d'eau et il en restera 200 mouillant le sable ; on dit alors que la *capacité de retenue* est de 20 p. 100.

La quantité d'eau qui peut s'écouler librement constitue ce que j'appelle la **capacité hydraulique** du bassin, celle qui alimente les sources et les puits ; son mouvement se produit par cheminement au-dessus du niveau de drainage.

En jetant les yeux sur le tableau de la page 89, on voit que la capacité de retenue d'un terrain par rapport au volume total est comprise entre :

20 à 45	p. 100	pour les terres.
10 à 15	— —	les sables.
10	— —	la craie.
2,5 à 5	— —	les grès.
0,25 à 5	— —	les calcaires.

L'eau qui est retenue dans le bassin de réception retourne partiellement dans l'atmosphère par évaporation ; le reste entretient l'humidité et sert à la nourriture des plantes.

La capacité de retenue d'un terrain joue un grand rôle ; plus elle est grande et moins elle laisse descendre d'eau en profondeur. C'est pourquoi les terrains qui jouissent d'une grande capacité de retenue ne donnent naissance qu'à une médiocre circulation d'eaux et à de faibles sources, parce que l'eau retenue, l'eau de carrière, n'est pas captable. Au contraire, ceux dont la capacité est moindre fournissent une couche aquifère active et des sources abondantes.

Lors donc que l'on connaît la quantité d'eaux pluviales tombant annuellement sur un bassin d'alimentation, il devient facile de calculer, avec une certaine approximation, le volume des eaux absorbées qui, n'étant pas retenues, s'écoulent en profondeur. On établit ensuite l'allure de la couche aquifère par la détermination des pentes et de la direction de son niveau de drainage

Il faudra tenir compte de l'état du sol, dénudé ou boisé. Je rappelle que dans ces deux cas, les eaux pluviales sont partagées très inégale-

ment en eaux d'évaporation, de ruissellement et d'infiltration.

On trouve, par exemple :

Répartition des eaux	en terrain boisé	en terrain dénudé	moyenne.
Eaux de ruissellement.	0 p. 100	23 p. 100	12
— retenues par la forêt.	45 —	0 —	22
Eaux évaporées.	40 —	52 —	31
— infiltrées.	45 —	25 —	35

En tenant compte de toutes ces circonstances, le calcul de la capacité hydraulique d'un bassin de réception se résout assez facilement.

Supposons que le tiers seulement de la surface totale d'alimentation S en projection horizontale, soit perméable, et qu'il tombe annuellement dans la région e millimètres d'eau, on aura :

Volume total des eaux tombées. $V = Se$.

— des eaux absorbées. $V' = \frac{1}{3} V$.

Si la surface perméable est à moitié boisée, on trouve, par application des moyennes, que le volume des eaux est égal à :

$$v_a = 0,35 V' = 0,115 V.$$

C'est donc la neuvième partie seulement du

volume des eaux tombées sur la superficie totale du bassin d'absorption qui servira à alimenter les sources et les puits du bassin de réception.

La descente par gravité des gouttes et filets liquides à travers la roche perméable jusqu'à leur incorporation à la couche aquifère d'écoulement libre est lente ; mais l'écoulement dans cette couche est lui-même très lent, à moins qu'il ne soit activé par la présence de cassures communicantes ou favorisé par un niveau de drainage très incliné.

On ne saurait mieux comparer l'écoulement libre, dans le bassin aquifère limité par la nappe supérieure du niveau hydrostatique et par le niveau de drainage, qu'à un déplacement d'ensemble de tranches verticales occupées par les molécules liquides qui remplissent les vides des sections perméables correspondantes.

Dans cette hypothèse, la vitesse moyenne, pour chaque tranche, est celle des molécules de la nappe-limite supérieure ; c'est aussi la vitesse d'écoulement des eaux dans la couche aquifère.

Cette vitesse est en rapport avec le débit des sources qu'alimente le bassin ; elle peut donc

être évaluée, avec une certaine approximation, par le jaugeage de ces sources, ou par la rapidité de propagation d'un colorant dilué dans les eaux souterraines.

Pour réaliser simplement ce dernier procédé, on creuse deux puits dans la zone aquifère, à une certaine distance l'un de l'autre. On jette une solution de fluorescéine dans celui qui est en amont et l'on note le temps nécessaire pour que la coloration se manifeste dans le second puits. Si l'écoulement est à peu près régulier et qu'il n'existe aucune cause de perturbation, on arrive à évaluer assez exactement la vitesse de circulation des eaux dans le gisement aquifère.

Cette méthode, d'un caractère suffisamment pratique et qui a été indiquée par M. Marboutin, présente un double avantage : elle décèle le sens du mouvement de la couche aquifère et permet en même temps de fixer les limites du bassin général de réception. Pour ne pas inquiéter les populations par une coloration exagérée des eaux, on n'emploie que de très faibles quantités de fluorescéine dont on reconnaît ensuite la présence, en des points plus ou moins éloignés, au moyen du **fluorescope**.

Mais les expériences de coloration à la fluo-

rescéine ne peuvent donner qu'une indication approximative de la vitesse des filets liquides, car le colorant ne se diffuse pas seulement dans le sens du courant qui l'entraîne, mais aussi, par expansions latérales, sur toute la largeur du cours d'eau ou de la couche aquifère. J'aurai d'ailleurs l'occasion de préciser le mode d'emploi des colorants (voir chap. VIII, p. 180).

M. Pochet, dans son traité d'hydraulique¹ des eaux souterraines, a voulu rattacher la science des sources à l'hydraulique et soumettre à l'analyse mathématique la circulation des eaux souterraines. Son point de départ est l'application du théorème de Dupuit :

Dans un terrain perméable, la perte de charge d'un filet liquide est proportionnelle à la vitesse ; théorème qui se traduit par les formules suivantes :

$$u = \frac{\text{Sin } i}{\mu} \text{ et } q = m u$$

dans lesquelles on représente par :

u , la vitesse moyenne d'un filet liquide ;

i , l'inclinaison du fond d'écoulement ;

¹ Léon Pochet. Etudes sur les sources. *Hydraulique des nappes aquifères et des sources*, Paris, 1905.

μ , constante exprimant la résistance du terrain au mouvement de l'eau ;

q , le débit par tranche d'un mètre de largeur ;

m , le rapport des vides au plein dans une section normale au courant.

Lorsque les angles i sont très petits, on substitue $\text{tg } i$ à $\sin i$, et l'on a :

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dy}{dx}.$$

c'est la vitesse d'un filet liquide le long d'une verticale.

Les équations de Dupuit conduisent à des calculs théoriques assez compliqués, au moyen desquels M. Pochet établit les formules du mouvement dans les couches aquifères souterraines.

Mais ces formules sont basées sur tant d'hypothèses et d'assimilations irréalisables qu'elles ne sauraient être d'aucun secours à l'hydrologue, tout au moins dans les cas ordinaires et usuels.

Si donc on a besoin de connaître la vitesse d'écoulement des eaux souterraines, il faut, en l'état actuel de nos connaissances hydrauliques, se contenter de l'approximation expérimentale que donnent la coloration et le jaugeage.

Le jaugeage a surtout pour objet de déter-

miner le débit moyen d'une source ; c'est lui qui peut indiquer les variations de la vitesse d'écoulement et qui permet d'en rechercher les causes.

J'ai déjà indiqué plusieurs de ces causes. Il en est une, entre autres, qu'il convient de signaler, car elle se prête à d'importantes conséquences dans les captages d'eau : c'est l'influence que présente la position du point d'émergence des sources.

Il est notoire, en effet, que le débit d'une source est d'autant plus abondant et rapide que son point d'échappement est plus bas. La raison en est que les eaux de la couche aquifère, dans le bassin de réception, sont plus *condensées*, pour ainsi dire, dans le voisinage du plan de drainage qu'à la partie supérieure.

IV

BASSINS DE RÉCEPTION SUPERPOSÉS

Jusqu'à présent, j'ai supposé que le bassin de réception comportait une seule couche aquifère susceptible d'alimenter les sources et les puits ; mais, en réalité, c'est par séries que se succèdent en profondeur les strates imperméables

drainant les eaux de surface et à chacune d'elles peut correspondre une couche aquifère à écoulement libre. Celle-ci est souvent d'allure régulière, comme le sont généralement les couches

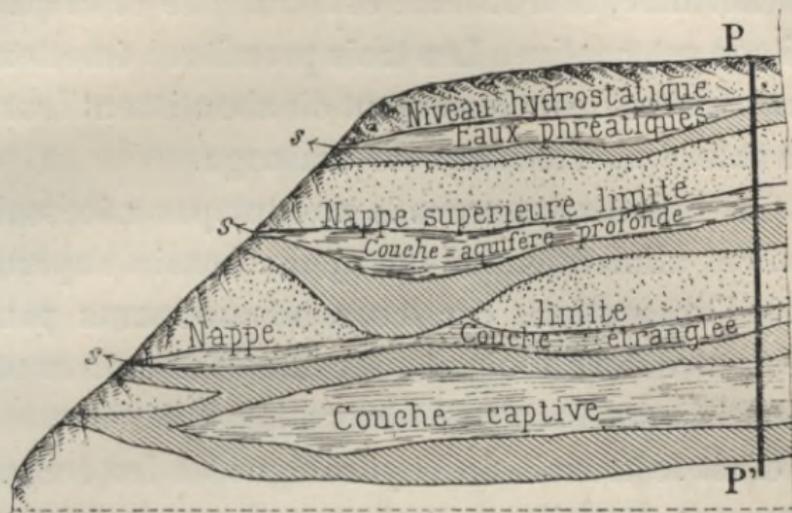


Fig. 30.

phréatiques ; quelquefois elle se trouve localisée dans des conditions spéciales. C'est ainsi que, sous une zone phréatique, on trouvera des couches aquifères profondes *étranglées* ou même *captives*.

C'est dans ces couches profondes, lorsqu'elles répondent à certaines conditions, que l'on recherche les eaux artésiennes.

La figure théorique 30 montre qu'un forage,

tel que PP', rencontrera, par exemple, quatre couches aquifères très distinctes. La première est la couche phréatique régulière, la seconde est la première couche profonde et son allure est normale, la troisième est étranglée et la quatrième est captive. Les trois premières émettent des sources S sur le versant où aboutissent leurs niveaux imperméables de drainage.

Ces bassins superposés ne sont pas nécessairement alimentés par un même bassin superficiel d'absorption, car leurs affleurements peuvent être fort éloignés les uns des autres et aboutir à des bassins d'absorption différents.

C'est le travail de l'hydrologue de les reconnaître et d'attribuer à chacun d'eux le rôle et l'origine qui lui conviennent.

V

ALIMENTATION SUPPLÉMENTAIRE DES BASSINS DE RÉCEPTION

J'ai indiqué que la quantité des eaux météoriques infiltrées est une fraction seulement de la totalité des eaux tombées. On pourrait augmenter la capacité hydraulique d'un bassin de

réception en retenant le plus longtemps possible les eaux pluviales dans le bassin d'alimentation ; on les empêche ainsi de gagner trop vite les cours d'eau et on accroît le taux d'infiltration.

L'expérience a été souvent tentée ; elle consiste à diriger les eaux dans des puits absorbants ou à retarder leur écoulement superficiel au moyen de barrages, de réservoirs, etc. ; mais les procédés sont coûteux et ne conviendraient tout au plus que pour de grands captages.

Les anciens aquilèges, dont la science hydrologique était très limitée au point de vue de la reconnaissance des eaux souterraines, ne cherchaient pas précisément à augmenter la capacité hydraulique des bassins de réception ; mais ils obtenaient ce résultat sans s'en douter, car ils s'ingéniaient à retenir l'eau pluviale à la surface du sol afin de l'utiliser en irrigations et en captages. On sait avec quel succès ils ont entrepris le défrichement de leurs provinces africaines de Bysacène, Numidie et Mauritanie, et de leurs colonies européennes en Dacie et en Bétie.

Dans les régions desséchées de l'Afrique, où la chute annuelle des pluies ne dépasse pas 200 millimètres, ils avaient réussi à développer les cultures en soustrayant à l'évaporation une

partie des eaux d'absorption et en maintenant dans le sol une humidité constante par le relèvement de la couche mouillée ¹.

D'ailleurs, il est curieux de constater que, dans notre organisation sociale, tous les efforts de l'homme tendent à diminuer l'absorption et l'infiltration des eaux météoriques dans le sol; ce sont les cultures, les défrichements, les reboisements, les drainages et autres travaux agricoles dont le résultat final contribue à dessécher le sol superficiel. De sorte que le progrès et la civilisation qui, d'une part, tendent à améliorer chaque jour les conditions de notre existence, menacent, d'autre part, notre avenir en diminuant constamment nos précieuses ressources d'eaux souterraines.

¹ C'est la méthode romaine qu'appliquent actuellement les fermiers du Far West, aux Etats-Unis, dans les contrées où le régime pluvial ne fournit jamais plus de 200 à 250 millimètres d'eau; elle est désignée sous le nom de Dry Farming.

CHAPITRE VIII

DÉBIT DES SOURCES ET DES PUIITS

Lorsqu'on creuse dans le sol perméable une cavité profonde : puits, galerie de captage, galerie de mine, tunnel, etc., le vide qui en résulte provoque une sorte d'appel ou de succion des eaux avoisinant la zone mouillée.

Autour d'un puits, il se forme un entonnoir d'aspiration ; dans une galerie, l'afflux d'eau est longitudinal.

Puis, l'équilibre se produit, la venue d'eau, très abondante au début, prend une allure régulière et ne varie plus désormais que sous l'influence des infiltrations variables d'eaux superficielles.

Le même effet de drainage se manifeste quand on ouvre une galerie dans un terrain imperméable bouleversé par des cassures ou traversé par une faille ; au bout d'un certain temps, l'écoulement de l'eau devient à peu près régu-

lier et il ne reste plus qu'à la diriger dans des conduites appropriées ou à la remonter à la surface par un procédé quelconque d'exhaure.

I

DÉBIT DES PUIITS ORDINAIRES

Quand un puits de section circulaire, à parois perméables, traverse une zone aquifère, les filets liquides qui gravitent de toutes parts autour de lui sont sollicités par deux forces : l'une qui résulte de la gravité et les entraîne dans le mouvement général de la zone au-dessus de son niveau de drainage, l'autre qui les attire par succion vers l'axe du puits.

Si l'on considère, en amont du puits, une molécule d'eau A (fig. 31); celle-ci se trouve donc sollicitée par les deux forces AG et AS dont la résultante AR traverse le puits, lui est tangent ou passe en dehors.

Dans le premier cas, la molécule est arrêtée et captée; dans les autres cas, elle continue sa marche avec la couche aquifère, en dehors du puits.

Le lieu géométrique des molécules, dont les

résultantes de forces ainsi définies sont tangentes à la section circulaire du puits, est une courbe telle que $OMN N' M'$, rétrécie vers l'aval avec un point de rebroussement en O , là où les deux forces agissantes sont opposées et coupent l'axe du puits.

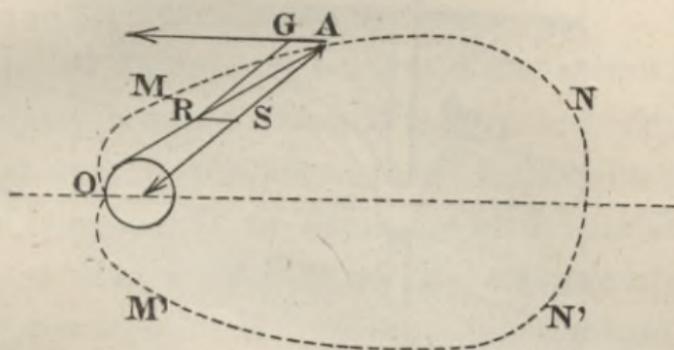


Fig. 31.

Le plan de cette courbe est sensiblement parallèle à la direction générale du niveau de drainage ; toutes les molécules liquides qui lui correspondent sont attirées à l'intérieur du puits normalement à l'axe.

L'ensemble des courbes sur toute la hauteur filtrante du puits donne naissance à une surface de révolution limitée au niveau de l'eau (fig. 32).

Quand on enlève de l'eau par puisage, l'équilibre général est rompu et un apport plus considérable tend à compenser la perte. Si cet apport

est suffisant, le niveau reste stationnaire dans le puits.

Si on enlève plus d'eau qu'il n'en rentre, le niveau baisse, la nappe aquifère de plus en plus sollicitée se creuse davantage, la courbe extrê-

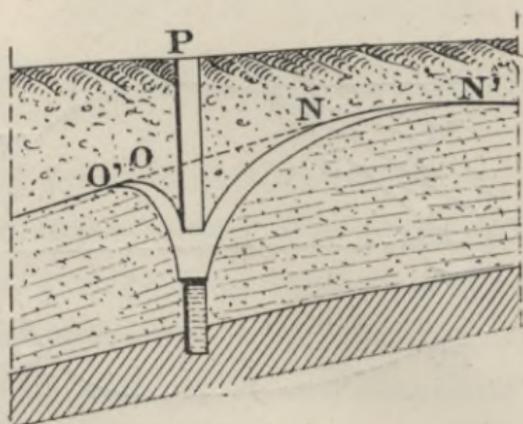


Fig. 32.

me ON de l'entonnoir s'allonge jusqu'à O'N' et l'alimentation augmente (fig. 32).

Mais si le nouvel apport, si grand qu'il soit, ne peut plus compenser les pertes occasionnées par un puisage continu, l'équilibre ne se rétablit pas et le puits se tarit jusqu'à ce qu'une période de repos ait rempli de nouveau la dépression.

La détermination exacte de la surface de dépression présenterait donc un grand intérêt si elle ne résultait pas de données aussi variables, sans parler d'autres circonstances comme la

penne plus ou moins accentuée du niveau de drainage, l'apport des eaux voisines de la dépression qui fait elle-même succion autour d'elle, etc.

Elle a cependant été tentée par des savants, comme Prony, Dupuit¹ et, en ces derniers temps, par MM. Lembke², en Allemagne, Brouhon³, en Belgique, et Pochet⁴, en France.

Tous ces ingénieurs partent d'une même base théorique. Ils supposent que la surface de dépression est symétrique par rapport à l'axe du puits et que les niveaux de drainage et de limite supérieure sont horizontaux. Ils admettent, en outre, que le débit hydraulique, par seconde, est constant pour toutes les sections *circulaires* de l'entonnoir.

Par application des lois d'écoulement en parois minces et de la formule de Prony

$$Ri = av + bv^2$$

R, rapport de la section au périmètre mouillé ;

¹ Dupuit. Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux. *Comptes rendus*, 1857.

² C. Lembke. Du mouvement des eaux souterraines. *Revue universelle des Mines*. Liège, 1888.

³ L. Brouhon. Contribution à la théorie des puits. *Revue universelle des Mines*, t. XLIX, n° 2. Liège, 1900.

⁴ L. Pochet. Etudes sur les sources. *Hydraulique des nappes aquifères et des sources*. Paris, 1905.

v , vitesse d'écoulement sur une pente i .

On établit la relation :

$$R i = a v$$

en admettant que les éléments d'une couche aquifère ne soient jamais animés que d'une très faible vitesse.

Le débit par seconde pour une section S est :

$$q = S \lambda v = S \lambda i \frac{R}{a}$$

et en posant

$$\frac{R}{a} = k$$

$$q = S k \lambda i$$

λ est le rapport du volume débité par la section S au volume débité par la section totale de la zone aquifère.

En partant de cette formule, M. Dupuit donne pour le débit, par seconde, dans un puits de section circulaire

$$Q = 2\pi k \lambda l y \frac{dy}{dt}$$

k , coefficient qui dépend de la perméabilité du terrain et qui est égal à $v \sin \alpha$;

α , angle que fait avec l'horizontale la tangente en un point O de la courbe ;

v , vitesse d'infiltration ;

λ , rapport des espaces vides à la section totale perméable ;

l et y , abscisses du point O ;

$\frac{dy}{dl} = \sin \alpha$, le coefficient de pente.

M. Brouhon a proposé de modifier la formule

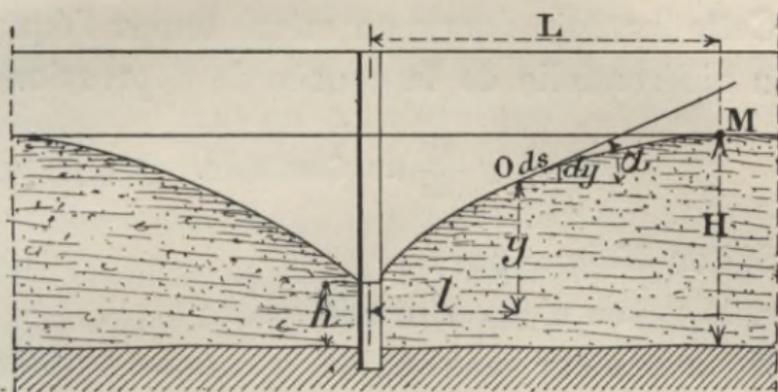


Fig. 33.

de Dupuit en substituant au coefficient de pente $\frac{dy}{dl}$ le coefficient de charge $\frac{dy}{ds}$ sur un élément ds de la courbe de dépression, en un point O assimilé à un orifice d'écoulement en mince paroi (fig. 33).

Le débit est alors¹ :

$$Q = 2\pi k \lambda l y \frac{dy}{ds}$$

¹ L. Brouhon. *Op. cit.*

Dans ce cas :

$$\frac{dy}{ds} = \operatorname{tg} \alpha$$

et la vitesse de filtration est :

$$V = k \frac{dy}{ds}$$

Cette formule donne en même temps l'équation différentielle de la couche de dépression :

$$2\pi k \lambda l y \frac{dy}{ds} = \text{Constante.}$$

Si l'on désigne par :

r , le rayon d'ouverture du puits ;

H , la hauteur maxima de la couche aquifère qui correspond à une dépression de rayon L ;

α , l'inclinaison de la courbe de dépression, le débit maximum du puits est égal à :

$$Q_{\max} = 2\pi k \lambda r H L \operatorname{Sin} \alpha.$$

Sur ces données, M. Brouhon établit la formule suivante qui permettrait de calculer le débit d'un puits ordinaire, en fonction de la hauteur minimum d'eau h .

$$Q = 0,43429 \pi k \lambda \frac{L}{S} \frac{H^2 - h^2}{\log \frac{S}{r}}$$

Connaissant L , H et h , on peut tracer par points la courbe S .

Le débit maximum est proportionnel à r , ce qui montre qu'il y a toujours avantage à donner le plus grand diamètre possible aux puits filtrants. Il est aussi proportionnel à H , la distance du fond du puits à la nappe-limite de la zone aquifère; et comme cette limite s'élève ou s'abaisse selon les infiltrations d'eaux superficielles, il faut en conclure que ces infiltrations règlent le débit du puits.

Dans son étude sur les eaux souterraines¹, M. Lembke applique les formules précédentes aux cas usuels, pour lesquels on a généralement $\lambda = \frac{1}{4}$ et $\frac{h}{H} = \frac{1}{2}$.

En désignant par δ le coefficient d'infiltration par seconde et par mètre carré, le rayon d'activité R autour d'un puits se déduit de l'expression :

$$R^2 = \frac{k\lambda}{\delta} \frac{1 - \frac{h^2}{H^2}}{\log. \text{nép.} \frac{R}{r}} H^2$$

La valeur limite de R devient, d'après

¹ C. Lembke. *Op. cit.*

M. Lembke :

$$R = 1880 H \sqrt{k}$$

en faisant

$$\delta = \frac{1}{118.840.000} \quad \text{et} \quad \log. \text{ nép. } \frac{R}{r} = 6,27$$

Pour $H = 10$ mètres, et prenant $K = \frac{1}{100}$ dans le gros sable, on a :

$$R = 1880$$

ce qui correspond à une entrée d'eau de $0,079 \text{ m}^3$ par seconde dans le puits, ou 6.826 mètres cubes par jour.

A la profondeur $H = 5$ mètres, le débit par seconde est égal à $0,0216 \text{ m}^3$, soit 1.866 mètres cubes par jour.

Les valeurs de k ont été déterminées par l'ingénieur allemand M. Kröber, pour $\lambda = 0,392$, en terrains sablonneux.

Grosseur des sables.	Valeur de k .
0,54 mm.	0,0032
0,70 —	0,00536
0,90 —	0,00958
1,35 —	0,0159
2,00 —	0,0333

M. Pochet¹, dans son *Hydraulique des eaux*

¹ Léon Pochet. *Op. cit.*, p. 253.

souterraines, a traité la question dans des termes analogues ; les conclusions qu'il en tire, pour le cas d'un puits établi sur une couche phréatique, sont les suivantes :

1° Le débit d'un puits ordinaire est proportionnel au débit de la source du versant auquel il appartient, au rapport de sa dépression à la hauteur totale de la couche aquifère en ce point, à son rayon d'appel dans la section transversale, et à un coefficient A qui représente l'influence de sa position.

2° Le coefficient A varie de 1 à 2 quand le puits passe du point de profondeur maxima de la couche aquifère au point d'émergence de la source. Il diminue beaucoup à mesure que le puits se rapproche du faite et d'autant plus que la pente de drainage de la couche est plus forte.

3° En résumé, toutes choses égales d'ailleurs, les puits ordinaires établis le long d'une couche aquifère débitent d'autant plus qu'ils sont placés plus bas et la différence est d'autant plus considérable que la pente de drainage est plus accentuée.

En somme, et quoique les formules précédentes manquent de bases sûres et pratiques,

elles peuvent néanmoins être utilisées lorsqu'on doit établir un avant-projet de captation des eaux souterraines.

Pour les puits ordinaires, à petit débit, le plus simple est d'employer la méthode expérimentale. On vide le puits et l'on constate ensuite la quantité d'eau rentrée pendant un temps déterminé.

Si q est le volume d'eau infiltré en t secondes, l'expression $q = vt$ donnera une idée approximative de la vitesse d'infiltration dans le puits.

II

DÉBIT DES GALERIES FILTRANTES

Le passage de l'eau à travers les parois filtrantes d'une galerie de captage se produit comme dans un puits ordinaire.

La succion se fait sur toute la longueur de la galerie, à une distance latérale qui varie de 400 à 350 fois la hauteur H ; celle-ci représentant la profondeur du lit de la galerie au-dessous de la nappe-limite supérieure de la zone aquifère.

Le débit normal s'établit avec une grande lenteur, quelquefois même des années seule-

ment après la mise en fonctionnement du captage.

M. Lembke¹ en donne un exemple intéressant, par application de ses formules :

Une galerie filtrante mesure 100 mètres de longueur ; elle est installée dans une zone aquifère de 10 mètres d'épaisseur. En supposant $K = \frac{1}{200}$, $\lambda = \frac{1}{4}$, avec une alimentation en eaux météoriques égale à 727 mètres cubes par jour et par kilomètre carré, M. Lembke calcule que le rayon-limite d'activité de la galerie est égal à 2,725 mètres et que le débit normal s'établit en 952 jours.

III

DÉBIT DES SOURCES

En ce qui concerne les sources, leur débit se mesure par la méthode expérimentale.

On les jauge comme une rivière. Je ne citerai qu'un procédé, c'est le suivant qui est simple et pratique.

L'eau est dirigée sur un barrage à déversoir

¹ C. Lembke. *Op. cit.*

en bois dont les bords sont taillés en biseau (fig. 34) afin de réaliser le cas des minces parois.

La vitesse d'écoulement est donnée par la formule modifiée de Bazin :

$$v = 2,21 \frac{a}{\sqrt{H}}$$

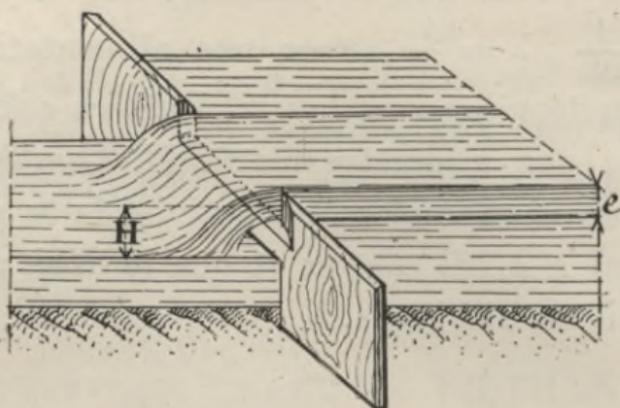


Fig. 34. — Jaugeage par déversoir.

et le débit par seconde, en mètres cubes :

$$Q = 2,21 \frac{a}{\sqrt{H}} bh$$

a , distance moyenne, en projection horizontale, à laquelle parvient le jet à partir de l'arête du déversoir ;

b , largeur du déversoir ;

h , hauteur d'eau au-dessus de l'arête du déversoir ;

H, hauteur moyenne de chute comptée du milieu de h .

En désignant par e la hauteur de la couche des eaux tranquilles au-dessus de l'arête, en amont, on peut prendre avec une approximation suffisante :

$$h = \frac{2}{3} e$$

On passe facilement du débit par seconde au débit par heure, à l'aide du tableau suivant :

LITRES par seconde.	LITRES par minute.	MÈTRES CUBES par heure.
0,138	8,33	0,5
0,277	16,66	1
0,555	33,33	2
0,833	50,00	3
1,111	66,66	4
1,388	83,33	5
1,666	100,00	6
1,944	116,66	7
2,222	133,33	8
2,500	150,00	9
2,778	166,66	10

On peut encore calculer le débit, avec une approximation suffisante par la formule plus simple de Bazin :

$$Q = 0,450 be \sqrt{2ge}$$

applicable à des charges variant de 0,04 à 0,50 m et pour des hauteurs de déversoir de 0,20 à 2 mètres.

IV

EMPLOI DE LA FLUORESCÉINE

La difficulté de résoudre par le calcul le problème du débit et de la vitesse des eaux souterraines a suggéré l'idée d'utiliser la propriété que possèdent certaines matières colorantes de se dissoudre dans l'eau en infime proportion et en lui laissant une coloration persistante à de très grandes distances.

On emploie, dans ce but, la *fuchsine sulfonée*, la *safranine*, le *rouge Congo*, l'*esculine* et surtout la *fluorescéine sodique*, substance de couleur jaune orange quand elle est pure et rouge brun quand elle renferme un excès de soude.

La solution de fluorescéine dans l'eau est rouge par transparence et verte par réflexion ; la couleur verte est visible à l'œil nu jusqu'à la dilution de $\frac{1}{200.000.000}$, et au fluorescope jusqu'à

$\frac{1}{10.000.000.000}$

La vitesse de propagation de la coloration à la distance d au bout de t secondes est :

$$v = \frac{d}{t} .$$

Mais ce n'est pas la vitesse d'écoulement V de l'eau, parce que la propagation de cette coloration est plus lente que le courant ; généralement V est compris entre $1,30 v$ et $2 v$. Il y a d'ailleurs d'autres causes de ralentissement telles que la décoloration par des eaux acides, la décomposition du carbonate de chaux, etc.

Le mode opératoire est le suivant. On dissout à chaud un kilogramme de fluorescéine sodique dans 5 litres d'eau, cette solution refroidie est jetée dans le courant en prenant soin de provoquer une agitation afin d'empêcher le colorant de gagner le fond. Puis on surveille le moment où la coloration se manifeste à une distance déterminée.

La dose du colorant varie suivant les usages ; voici les indications que fournit à ce sujet M. Diénert¹.

1° POUR RECONNAITRE UNE SOURCE. — On détermine la quantité A de fluorescéine à verser par

¹ Diénert. *Eaux douces et minérales*. Paris, 1912.

application de la formule :

$$A = \frac{125}{10^6} \frac{\Delta d}{a}$$

Δ , débit en litres de la source ;

d , distance en mètres de la source au lieu où se fait le jet ;

a , puissance d'absorption en litres en ce lieu.

Le premier prélèvement à la source se fait en se basant sur une propagation de la coloration à raison de 6 kilomètres à l'heure. .

2° CAS D'UN Puits ORDINAIRE. — La quantité de fluorescéine en grammes est :

$$A = \frac{d}{2} (\Delta + D)$$

D étant le débit à la seconde et en litres du puits.

Le premier prélèvement est fait sur la base d'une propagation de 10 kilomètres en vingt-quatre heures s'il s'agit d'un puits à fort courant, et de 6 kilomètres seulement dans les autres cas.

Le jet de la fluorescéine dure une heure environ. Les prélèvements se font en aval, en un point où l'on peut guetter le passage de l'eau.

D'après M. Marboutin¹, il faut employer au

¹ Félix Marboutin. Essai sur la propagation des eaux souterraines. *Bulletin géologique belge*, 1903.

moins 50 grammes de fluorescéine pour les petites distances, et 2 à 3 kilogrammes dans les grands parcours.

Pour des expériences en rivière, M. Marboutin en consomme jusqu'à 100 kilogrammes à l'heure; toutefois il y a quelque danger à faire usage de quantités trop considérables de fluorescéine, d'autant plus que les eaux conservent très longtemps leur coloration.

On reconnaît la coloration à l'aide du *fluorescope Trillat*. Cet appareil se compose simplement de deux tubes en verre blanc, de 2 centimètres de diamètre et 1 mètre de hauteur, fermés à leur base par un bouchon de liège recouvert de papier plombaginé; l'un des tubes est plein d'eau pure, l'autre reçoit l'eau à examiner. On reconnaît la teinte verte jusqu'à la dilution de $\frac{1}{500.000.000}$.

Avec un peu de pratique, on se sert très utilement de l'appareil Trillat.

Dans les laboratoires, on fait usage du *fluorescope électrique*, instrument plus sensible et plus précis, avec lequel on apprécie la coloration à la dose de $\frac{1}{1.000.000.000}$ de fluorescéine.

CHAPITRE IX

RECHERCHE DES EAUX ET SOURCES PHRÉATIQUES

La loi fondamentale de l'hydrologie nous apprend que les eaux souterraines se rencontrent partout, aussi bien dans les pays chauds que dans les régions humides.

Si aride, si desséchée que soit une contrée, la sonde du puisatier y trouvera de l'eau pourvu qu'elle descende à une profondeur suffisante ; puis, aussitôt que la couche aquifère aura été mise en contact avec l'air atmosphérique, l'eau montera dans le forage.

En réalité, le problème est loin d'être aussi simple, car il ne s'agit pas seulement de trouver de l'eau, il faut encore que celle-ci soit pure, abondante et localisée à une faible distance du sol.

C'est ce que l'on peut traduire de la manière suivante :

Trouver une eau convenable et abondante, à peu de frais et à proximité de l'exploitation ou de l'usine qui doit en faire usage.

Au point de vue topographique, trois cas peuvent se présenter :

- 1° L'exploitation est établie sur un plateau ;
- 2° — — — sur un versant ;
- 3° — — — dans une vallée.

Le régime des eaux souterraines pouvant présenter quelquefois une certaine corrélation avec celui des cours d'eau superficiels, leur recherche doit porter non seulement sur l'examen des reliefs et de la constitution géologique du sol, mais encore sur l'allure et la direction des eaux courantes, car celles-ci donneront souvent d'utiles indications.

Ainsi, nous savons déjà que dans les contrées à sol calcaire, crayeux et en général perméable, les ruisseaux ne sont pas fréquents ; on y trouve de vastes plateaux et des vallées profondes, mais rares. Or, c'est dans ces régions que les eaux souterraines sont nombreuses et abondantes.

Au contraire, dans les terrains imperméables tels que les roches granitiques, où les ruisseaux sont nombreux, les plateaux peu importants et

les vallées fréquentes mais petites, les eaux souterraines sont plus rares, et il faudra les chercher à une plus grande profondeur.

Examinons maintenant les règles qui doivent guider les recherches dans les trois situations topographiques que je viens de signaler.

I

RECHERCHES SUR UN PLATEAU

Les eaux météoriques qui tombent sur un plateau s'écoulent, selon deux directions opposées, de part et d'autre de la ligne de faite. Si celle-ci partage le plateau en deux parties à peu près égales, les eaux circulent par moitié de chaque côté ; dans ce cas, on trouvera d'autant plus d'eau que le puits sera plus éloigné de la ligne de partage, mais par contre sa profondeur sera d'autant moindre qu'il en sera plus rapproché. La figure 35 montre le cas aux points A et B.

Si au contraire elle se trouve vers l'une des extrémités du plateau, l'un des versants présente une grande déclivité, tandis que l'autre côté est en pente douce et constitue, en somme, tout le

plateau, lequel se termine par une sorte de crête ou d'arête vive. Dans ce cas, la totalité des eaux s'écoule le long de la pente douce, et le puits à creuser devra être placé aussi loin que possible de la ligne de faite.

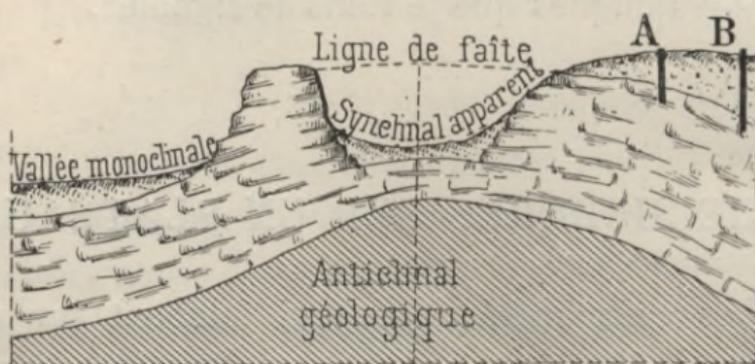


Fig. 35.

Un plateau de quelque importance présente fréquemment des accidents de terrain produits, soit par des érosions, soit par des affaissements.

On y observera, par exemple, sur un anticlinal géologique, des vallées d'apparence synclinale vers le sommet (fig. 35), ou *monoclinale* sur les versants. Une dépression anticlinale correspond au point le plus élevé du plateau, c'est-à-dire à la ligne de partage des eaux ; il n'y aura donc aucun intérêt à y creuser un puits.

On recherchera de préférence une dépression

monoclinale, car c'est en un point de ce genre qu'on aura le moins à forer pour atteindre la nappe aquifère.

Si la dépression, au lieu de former cuvette, s'allonge en pli ou vallonnement, les eaux tendront à se réunir le long du *thalweg*, ou ligne de rencontre des deux côtés prolongés du pli.

Et, s'il existe plusieurs plis qui se recourent, leur point de rencontre correspondra au centre de passage des eaux souterraines.

Lors donc qu'on aura à faire des recherches sur un plateau, on s'éloignera le plus possible de la ligne de faite, si l'on a surtout en vue de trouver beaucoup d'eau; on s'en rapprochera, au contraire, si l'on ne veut pas faire de grands frais et que l'on puisse se contenter d'une quantité d'eau limitée. Dans l'un et l'autre cas, on profitera, pour creuser le puits, d'une dépression du sol, d'un vallonnement, d'une intersection de deux plis ou de tout autre accident de terrain analogue. Si la question économique prédomine, on se placera dans la dépression du côté de l'amont; on se mettra au contraire un peu en aval si l'on tient, avant tout, à trouver plus d'eau.

Et comme les eaux qui s'infiltrèrent sur un pla-

teau imperméable sont exclusivement des eaux météoriques, leur abondance sera d'autant plus grande que la surface de celui-ci sera plus importante. On trouvera donc beaucoup d'eau sur les grands plateaux, et peu sur les petits.

Enfin, si la ligne de faite partage le plateau en deux superficies à peu près égales, les chances de rencontrer l'eau en plus ou moins grande quantité seront les mêmes de part et d'autre de cette ligne. Mais comme celle-ci a toujours une pente générale de même sens que celle des thalwegs des vallées latérales, il y aura intérêt, quel que soit le côté où l'on se trouve, à se rapprocher autant que possible des points les plus bas, suivant la pente. Et en effet, les eaux qui tombent sur un semblable plateau sont sollicitées suivant deux directions *ab* et *ac* (figure 36), l'une perpendiculaire, l'autre parallèle à la ligne de faite. Elles tendent donc à s'écouler suivant la direction composante *ad*. De sorte que si l'on voulait retenir les eaux dans une tranchée pour les capter ensuite au moyen d'un puits, la tranchée devrait avoir une position et une direction telles que *mn*, et le puits devrait être placé en *p*.

Les conditions étant les mêmes de chaque côté de la ligne de faite, la tranchée à pratiquer

sur le revers opposé serait placée d'une manière analogue, en $n' m'$, par exemple (fig. 36).

Dans les pays de montagne où les pluies sont

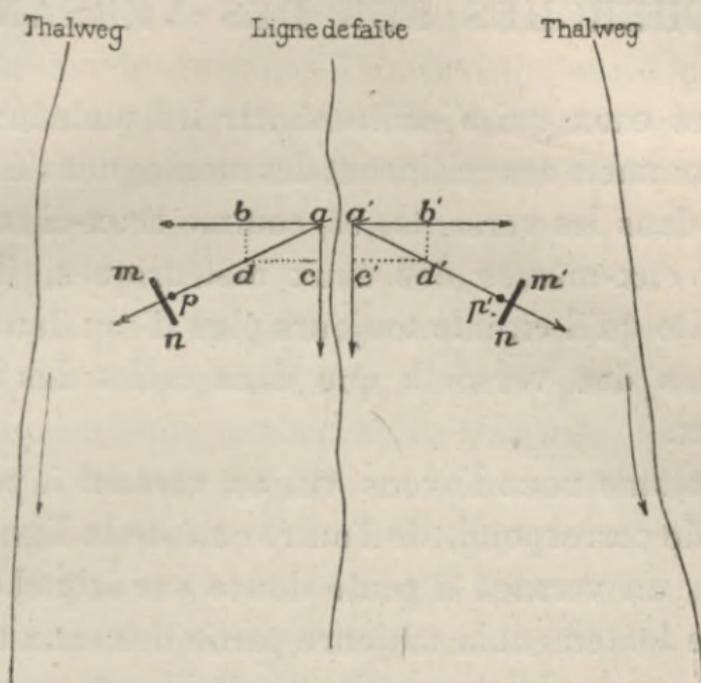


Fig. 36.

plus abondantes que dans les vallées, les sources sont généralement nombreuses ; on les recherchera de préférence dans les recouvrements alluvionnaires.

II

RECHERCHES SUR DES VERSANTS

Les eaux qui s'infiltrant sur les plateaux et les sommets des collines et des montagnes s'écoulent dans les versants, et, comme ceux-ci reçoivent eux-mêmes des eaux météoriques, il en résulte qu'il circule toujours plus d'eau dans les strates des versants que dans celles des plateaux.

Comme nous l'avons vu, au versant à pente rapide correspond, de l'autre côté de la ligne de faite, un versant à pente douce sur lequel chemine lentement la majeure partie des eaux tombées sur le plateau; celles-ci, d'ailleurs, rencontrent toutes facilités pour imbiber et pénétrer le sol jusqu'à la couche imperméable.

Sur le versant à pente raide, au contraire, les eaux souterraines, moins abondantes, ruissellent rapidement vers le fond de la vallée; d'autre part, les eaux pluviales qu'il reçoit descendent trop vite pour avoir le temps de pénétrer profondément dans le sol. De sorte qu'un puits creusé sur un versant à grande pente ne peut rencon-

trer que des couches aquifères minces, éparpillées et de faible débit.

La recherche des eaux sur les versants se fera comme dans le cas précédent. On choisira de préférence les origines d'un ravin, d'une dépression, d'un pli quelconque ; et, suivant les conditions du programme à réaliser, on fixera l'emplacement du puits, soit en amont, soit en aval.

Un pli qui recoupe le versant perpendiculairement ou obliquement à la ligne de plus grande pente, constitue une véritable tranchée de drainage au fond de laquelle on trouvera facilement à capter les eaux.

Si le pli est dirigé suivant la pente, c'est vers son point d'origine que l'eau passera le plus près de la surface ; mais c'est vers sa partie la plus basse que les eaux seront le plus abondantes.

Si le pli forme un ravin qui descend jusqu'à la vallée, c'est au point bas qu'il faudra chercher l'eau, si même celle-ci n'y point naturellement sous forme d'une source pérenne ou accidentelle. En tout cas, il est probable qu'à l'époque des grandes pluies, une semblable position se décèlera par un écoulement important, car c'est vers elle que tend à se réunir une grande partie

des eaux d'infiltration descendant du versant dans la vallée.

De même, un dyke imperméable qui traverse la zone aquifère joue un rôle analogue et dénonce la présence d'eaux plus abondantes contre sa

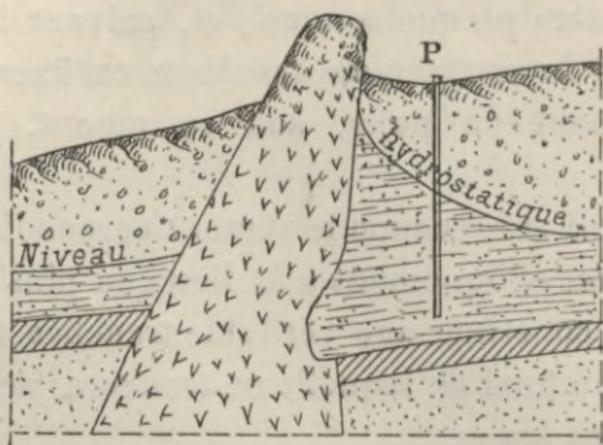


Fig. 37.

paroi d'amont, laquelle limite alors une sorte de *barrage-réservoir*. En cette région, la nappe aquifère est très épaisse et le niveau hydrostatique relevé, de sorte qu'un puits P foré en amont dans le voisinage (figure 37) se trouve dans d'excellentes conditions; toutefois les eaux du réservoir risquent d'être contaminées par des écoulements directs d'eaux superficielles le long du dyke.

Dans certaines circonstances, l'eau agit à la

longue sur la roche, l'use, la crevasse et s'ouvre peu à peu des passages qui lui permettent de s'écouler de l'autre côté du dyke.

J'ai supposé jusqu'à présent que la strate imperméable qui contient la nappe aquifère est parallèle au versant; mais le contraire peut se présenter. Dans ce cas, la strate recoupe le versant

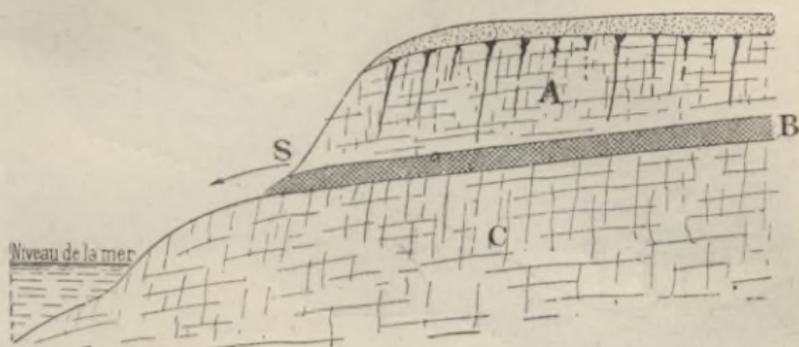


Fig. 38. — Falaise sur les côtes de la Manche.

et son affleurement la dénonce au loin par des suintements ou même des sources.

Supposons, par exemple, le cas d'une falaise découpée comme celle de la figure 38. La partie supérieure A est un banc de craie fendillée reposant sur une couche imperméable B de marne argileuse. En suivant la ligne d'affleurement sur la côte, on trouvera certainement des écoulements d'eau S. Cette ligne se signale, d'ailleurs, à l'œil de l'observateur, par une végé-

tation spéciale qui tranche par son abondance et sa fraîcheur.

Il est rare qu'un versant ne présente pas quelque un des accidents que je viens de signaler. Mais il arrive aussi que sa superficie est com-

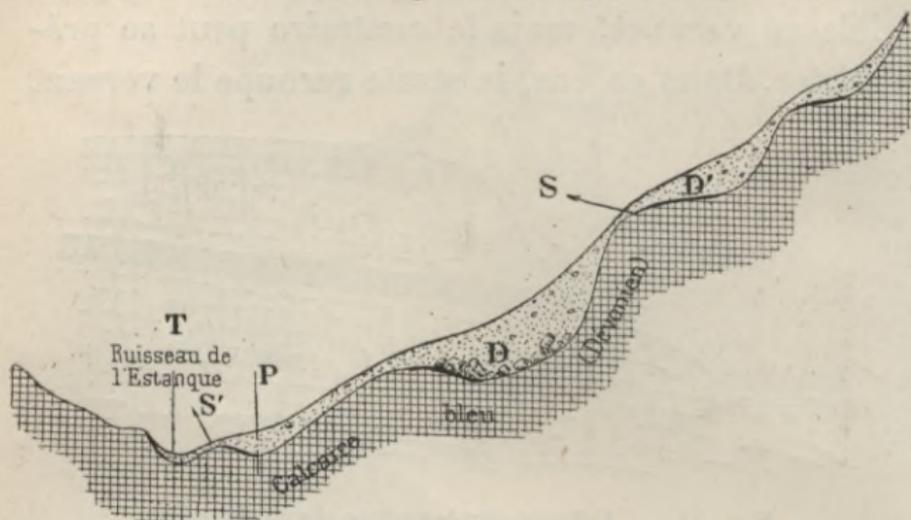


Fig. 39. — Ravin de Cazalas (Ariège).

blée par des terres, des sables détritiques ou des éboulis qui masquent l'allure véritable du sous-sol rocheux et donnent l'apparence souvent fautive d'une pente régulière et uniforme (figure 39).

Il faut alors, par l'observation et quelques découvertes à la pioche, s'efforcer de reconstituer le sous-sol réel. On trouvera, par exemple (fig. 39), qu'à l'époque des pluies, une source

point en S, et encore que, pendant les sécheresses, il s'en manifeste d'autres en S', près du thalweg de la vallée et au-dessous du niveau des crues du torrent qui coule dans le vallon.

Ces observations permettront de conclure que, sous la couche détritique qui le recouvre, le sous-

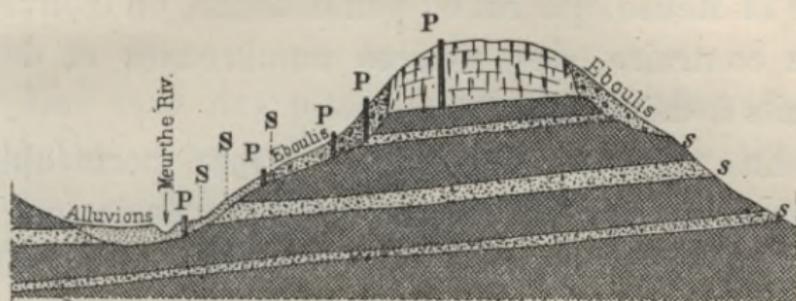


Fig. 40. — Plateau de Malzéville (d'après M. Imbeaux).

sol imperméable présente des dépressions en D, D', etc., et une configuration analogue à celle qu'indique la figure 39. On saura alors que c'est en des points tels que P qu'il y aura avantage à chercher l'eau.

La figure 40 empruntée à l'ouvrage de M. Imbeaux¹ montre, par une coupe sur le plateau de Malzéville et l'un des versants de la Meurthe, l'influence des versants raides ou à pente douce

¹ *Les eaux potables et leur rôle hygiénique dans le département de Meurthe-et-Moselle*, par le Dr Imbeaux, ingénieur des Ponts et Chaussées. Nancy, 1897.

pour la recherche des sources et l'établissement des puits ; le plateau est constitué par un banc calcaire et trois couches aquifères indépendantes les unes des autres et comprises entre des strates de marnes imperméables. Sur le versant raide, les sources sont faibles et rares ; sur le versant de la Meuse, qui est en pente douce, on trouve, au contraire, des sources nombreuses et des puits à débits importants.

En principe, lorsqu'une strate perméable affleure à flanc de coteau, son niveau de drainage est presque toujours souligné par le contraste de deux végétations différentes. L'une, active et verdoyante, correspond à la zone aquifère ; l'autre, plus sèche et plus rare, caractérise l'affleurement imperméable.

Ces indications peuvent se répéter à plusieurs niveaux différents lorsqu'il existe plusieurs nappes d'eau superposées.

Enfin, il peut arriver que le plateau ou le coteau soient entièrement perméables et que la strate imperméable d'écoulement passe sous la vallée sans montrer d'affleurement sur le versant. Dans ce cas, la nappe aquifère circule à une grande profondeur et ne pourrait être atteinte que par un puits profond et coûteux ;

mais cette circonstance se présente assez rarement.

III

RECHERCHES DANS LES VALLÉES ET LES PLAINES

Les eaux des plateaux et des versants descendent dans les vallées, tout au moins dans celles que l'on désigne sous le nom de *synclinales* et *monoclinales*, et leur contingent s'augmente encore des infiltrations météoriques qui les pénètrent directement.

Mais, d'un autre côté, c'est dans les vallées qu'il faudra creuser les puits les plus profonds, car le terrain y est toujours recouvert de terres et sables détritiques amoncelés souvent sur une grande épaisseur.

Toutefois, et avant de faire une recherche ou une fouille quelconque, il importe de procéder à un examen stratigraphique sérieux des terrains.

Supposons d'abord que la direction de la vallée soit de même sens que celle des strates, il faut alors reconnaître si elle est *synclinale*, *monoclinale* ou *anticlinale*.

Dans une vallée **synclinale**, les strates des versants plongent de chaque côté, et la vallée constitue une sorte de cuvette ou de pli vers lequel convergent les eaux des deux versants ; il y a donc d'importants apports.

Si la vallée est **monoclinale**, les strates plongent d'un seul côté, et les apports d'eau y sont moins abondants, puisqu'un seul des versants y dirige ses couches aquifères. On retombe alors dans le cas d'un versant, et on y fera les mêmes recherches que s'il s'agissait d'un versant.

Enfin, si la vallée est **anticlinale**, elle est assimilable à un plateau avec ligne de faite, ou plutôt de partage ; et, comme une semblable vallée ne peut recevoir aucun apport de l'un ou l'autre de ses flancs dont les strates plongent en sens inverse, on n'y trouvera d'eaux que celles qui résultent d'une infiltration directe sur sa superficie.

Les recherches d'eau dans une vallée anticlinale se feront comme sur un plateau, en observant les règles précédemment signalées.

Enfin, si la direction de la vallée est normale à celle des strates, les nappes aquifères ne s'y dirigent que par un seul côté et les traversent sans s'y arrêter. C'est le cas d'un monoclinale.

Je ne considérerai donc que la vallée synclinale dans laquelle les couches aquifères des deux versants convergent au-dessus du thalweg souterrain ; toutes les autres, monoclinales et anticlinales, rentrent, au point de vue des recherches d'eau, dans la catégorie des versants ou des plateaux.

Après s'être réunies au-dessus du thalweg, les eaux ne suivent pas nécessairement cette ligne ; et, en effet, leur écoulement ne pouvant s'effectuer qu'autant qu'elles sont contenues entre des berges imperméables, il est bien évident que si celles-ci font défaut, il y aura fuite des liquides à droite ou à gauche du thalweg, partout enfin où ils pourront se frayer un passage.

Il faut observer encore que le thalweg souterrain ne concorde généralement pas avec le thalweg de la vallée qui est à la fois la ligne d'écoulement des eaux de surface et la ligne de moindre pente.

La vallée est, en effet, constituée par des remplissages détritiques et par des apports incessants. Elle peut même, ce qui est d'ailleurs fréquent, subir des remaniements par le fait du travail des hommes, du déplacement des cours d'eau et du passage des crues.

La ligne d'écoulement des eaux souterraines ne correspond donc pas nécessairement au

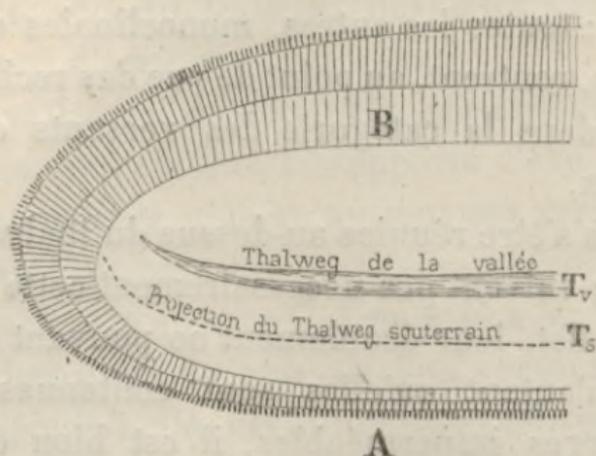


Fig. 41.

thalweg de la vallée. Elle est déterminée par la

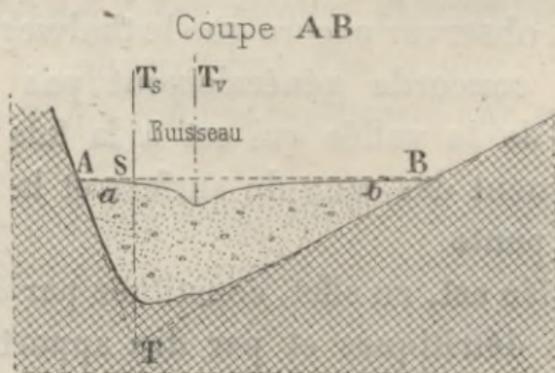


Fig. 42.

rencontre des deux versants. Si, par exemple, l'un des versants se rapproche de la verticale,

et que l'autre, au contraire, soit en pente douce, le thalweg souterrain se projettera tout près de la ligne de fin de pente du versant raide, tandis que le thalweg de la vallée occupera une position intermédiaire entre les deux lignes de fin de pente (fig. 41 et 42).

La projection S, d'un point quelconque de la ligne de passage des eaux souterraines, est facile à déterminer. Il suffit de connaître la ligne AB et les angles a et b . On a, en effet (fig. 42)

$$BS = ST \cotg b$$

$$AS = ST \cotg a$$

d'où l'on tire :

$$\frac{BS}{AS} = \frac{\tg a}{\tg b}$$

on a d'ailleurs :

$$AS + BS = AB.$$

Les mêmes formules font connaître ST, c'est-à-dire la distance du thalweg souterrain au sol de la vallée.

On voit immédiatement que si $a = 90^\circ$, on a $AS = 0$.

Si $a = b$, il en résulte $AS = SB$.

Pour atteindre la nappe aquifère, il faudra traverser toute la couche détritique de la vallée.

Mais s'il arrive que le banc rocheux qu'elle recouvre est lui-même perméable (fig. 43), il devient nécessaire de forer le puits P jusqu'à la rencontre d'une couche imperméable.

Notons encore que le thalweg souterrain est rarement rectiligne; il affecte souvent des formes

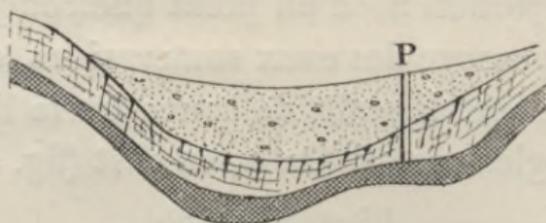


Fig. 43.

sinueuses qui déterminent des hauts et des bas, de sorte que la nappe aquifère passe alternativement dans des *réservoirs* et sur des *déversoirs*.

Au point de vue des dépenses à faire, cette considération a une grande importance. Ainsi, un puits creusé au-dessus d'une dépression donnera beaucoup d'eau; il pourra n'en donner que fort peu, au contraire, s'il se trouve en face d'un seuil. Et ce fait explique comment il arrive que deux puits, P et p, placés à peu de distance l'un de l'autre, dans la même vallée (fig. 44), puissent donner des débits extrêmement différents.

La reconnaissance stratigraphique des terrains formant les versants, aide efficacement à surmonter toutes ces difficultés.

En effet, si les flancs de la vallée sont imperméables, les eaux météoriques ou d'infiltration des plateaux supérieurs dévalent à la surface.

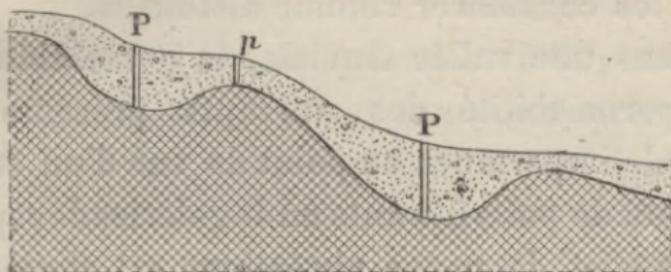


Fig. 44.

Elles creusent des ravins tout le long et de chaque côté de la vallée, et celle-ci est traversée par un cours d'eau dans lequel viennent se réunir tous les ruisselets des ravins et vallonnets.

Si, au contraire, les flancs sont perméables, une partie des eaux s'infiltrent jusqu'à ce qu'elles rencontrent un niveau imperméable sur lequel elles s'écoulent.

Souvent, le terrain perméable est double et comprend, par exemple, une couche alluvionnaire superficielle et un terrain rocheux reposant sur la strate imperméable.

Il faut observer que, dans ce cas, aux deux strates perméables correspondent deux nappes aquifères : celle des alluvions qui est la nappe phréatique proprement dite et celle du banc rocheux qui est déjà une nappe profonde. Elles communiquent l'une avec l'autre et cependant on doit les considérer comme distinctes.

Dans une vallée fluviale, la perméabilité ou l'imperméabilité des versants présente une grande importance au point de vue d'un établissement de puits filtrants ou de galeries de captage.

En effet, la nappe phréatique est alimentée à la fois par la rivière et par l'infiltration des deux versants convergents quand ceux-ci sont perméables ; de sorte que, si la rivière s'assèche, la zone phréatique l'alimente et inversement.

Lorsque, au contraire, les deux versants sont imperméables, la zone phréatique, qui n'est alimentée que par la rivière et les pluies localisées, s'assèche quand le cours d'eau se tarit.

Dans tous les cas, les puits, aussi bien que les galeries de captage, devront être descendus jusqu'à la strate imperméable qui draine la zone aquifère profonde. On déterminera la position du niveau de drainage au moyen de deux petites tranchées suffisamment espacées.

Un certain nombre des considérations qui précèdent s'appliquent également aux rivages littoraux.

On peut, en effet, considérer un rivage maritime comme une vallée monoclinale vers laquelle convergent les eaux de la côte, son unique versant.

Mais comme l'eau salée tend à s'infiltrer dans le rivage perméable et, par suite, à s'opposer à l'écoulement des eaux phréatiques vers la mer, celles-ci se trouvent sollicitées par la résultante de deux forces opposées ; et, suivant que l'une ou l'autre de ces forces l'emporte, il y a afflux d'eau douce dans la mer ou pénétration par diffusion des eaux salées dans la zone phréatique jusqu'à une certaine distance du rivage.

L'effet de diffusion est limité par une surface qui divise la nappe aquifère en deux parties ; l'une, inférieure, contenant des eaux salées ou saumâtres, l'autre, supérieure, dont les eaux restent douces. Dans ces conditions, le puits qu'on arrête au-dessus de la surface séparatrice débite de l'eau douce, mais si on le prolonge jusqu'à la zone inférieure, il donne une eau saumâtre.

La figure 45 montre clairement cette particularité.

Ces diverses observations ne doivent jamais être perdues de vue ; au surplus, la recherche des points les plus convenables pour creuser un puits dans une vallée repose sur les mêmes considérations que j'ai indiquées dans les deux cas

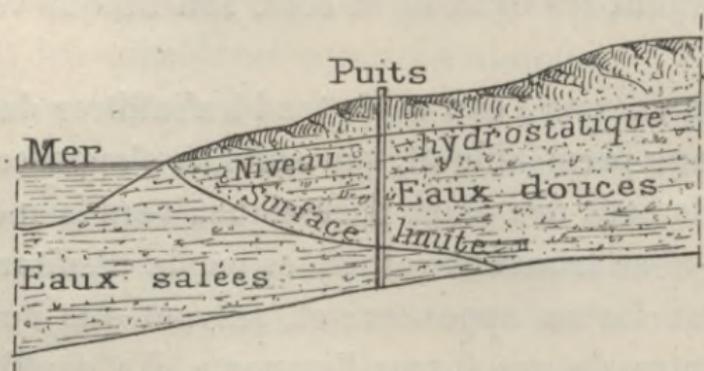


Fig. 45.

précédents. Ces points se trouveront à l'origine du thalweg et dans les dépressions.

a) A L'ORIGINE DU THALWEG. — Comme je l'ai indiqué au chapitre premier, le thalweg peut commencer à un ravin aigu découpé par l'intersection de deux versants très raides, ou à un bassin arrondi en forme de cirque ; c'est à l'endroit où le ravin se soude à la vallée et au centre du cirque qu'on recherchera l'eau. On creusera donc un puits en choisissant, à proximité, un point convenable.

Il peut se faire que la région soit constituée par une vallée principale recoupée par des vallées secondaires ; dans ce cas, l'intersection des thalwegs est un point de recherche tout indiqué.

b) DANS LES DÉPRESSIONS. — Si le terrain imperméable qui retient les eaux souterraines est accidenté et forme une série de barrages naturels, on trouvera l'eau en amont d'un barrage si celui-ci n'est pas fendillé et, par conséquent, perméable, mais à coup sûr et avec la plus entière certitude, à la base d'un déversoir.

Néanmoins, et dans tous les cas, il faudra, avant de commencer un travail, s'assurer que la profondeur à laquelle se trouve le premier plan de drainage n'est pas trop considérable.

Lorsque la vallée est parcourue par un ruisseau de surface, celui-ci peut recevoir souterrainement des eaux d'infiltration des versants ; ce sont autant de sources dont la présence n'est bien décelée qu'au moment des basses eaux. Lorsqu'on a reconnu ces sources, rien n'est plus simple que de déterminer à quelle profondeur elles coulent dans les versants ou les vallées, et de creuser un puits pour les utiliser en tout temps.

Si la berge du cours d'eau est en pente raide, on trouvera naturellement l'eau, dans les puits, au-dessus du niveau d'écoulement du ruisseau. Mais les deux niveaux ne sont pas forcément en corrélation l'un avec l'autre; il peut arriver que l'un baisse tandis que l'autre monte, ou que le mouvement ascensionnel ou descensionnel de l'un soit bien plus accentué que l'autre. L'explication en est simple.

Observons d'abord que, si des pluies locales provoquent une crue, elles produiront également un relèvement de niveau dans les puits rive-rains. Mais la crue elle-même peut agir directement sur une source affluente et provoquer, suivant la direction d'écoulement de celle-ci, soit un refoulement, soit une succion. Dans le premier cas, le niveau des puits montera; il baissera dans le second cas.

D'autre part, la crue peut être occasionnée, non par des pluies locales, mais par un apport d'affluent en grande crue ou encore par des pluies tombées abondamment en amont; dans ce cas, le courant, en refoulant la source, fait obstacle à son écoulement, et l'eau des puits rive-rains s'élève.

L'effet inverse peut se produire, et on l'ob-

serve bien nettement dans la Crau. Cette vaste plaine, qui borde la rive gauche du Rhône, est constituée par un banc de conglomérats imperméables, de 2,50 m. environ, recouvrant une couche de sables et galets de 20 à 30 mètres d'épaisseur. L'eau qui imbibe les sables remonte parfois en étangs jusqu'à la surface du sol, en traversant des crevasses ou affaissements qui se sont produits dans le conglomérat. Or, le niveau de ces étangs s'abaisse d'une manière sensible pendant les grandes crues du Rhône ; et ce fait s'explique par la force considérable d'aspiration ou de succion du courant qui attire à lui les eaux de la Crau jusqu'à une grande distance de ses rives.

J'ai pu constater le phénomène à la dynamétrie de Saint-Martin-de-Crau, située à 8 kilomètres du Rhône. Pendant la grande crue du mois de novembre 1896, le niveau de l'eau d'un de ces étangs, en communication avec la nappe aquifère sous-jacente, a baissé de 3 à 4 centimètres.

IV

RÈGLES GÉNÉRALES
POUR LES RECHERCHES D'EAU PAR PUIITS

En résumé, les sols où il est inutile de chercher l'eau et, par suite, de creuser des puits, soit parce que les sources y sont rares, soit parce que les couches aquifères sont trop profondes, peuvent être classés de la manière suivante :

1° *Les alluvions de faible épaisseur ;*

2° *Les éboulis, les affaissements accidentels, les morts-terrains et autres du même genre ;*

3° *Les terrains compacts qui peuvent être aussi bien des roches sédimentaires que des roches éruptives ;*

4° *Les calcaires à bêtouilles et à cavernes qui écoulent l'eau trop profondément pour qu'on puisse l'atteindre par un puits ordinaire ;*

5° *Les vallées et versants à strates très inclinées.*

En tous les autres lieux, plateaux, vallées ou versants, on effectuera les recherches d'eau souterraine en choisissant de préférence :

a) Les centres de dépressions naturelles du sol

(qu'il ne faut pas confondre avec les affaissements);

b) Les origines de plis, ravins ou thalwegs;

c) Les intersections de plis ou de thalwegs secondaires.

C'est *en amont* qu'on forera le puits toutes les

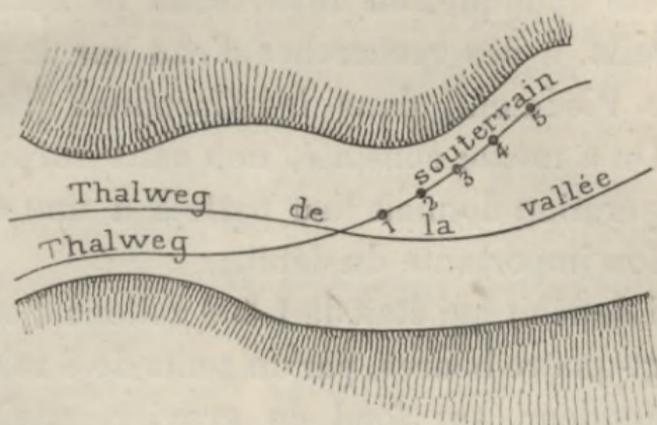


Fig. 46.

fois que l'on voudra faire un travail économique; *en aval*, au contraire, si l'objet principal est de trouver beaucoup d'eau.

Et comme l'amont ou l'aval n'est pas toujours bien indiqué, on le déterminera expérimentalement. Dans ce but, on jalonne quelques points du thalweg souterrain par de petits puits rapprochés; puis on vérifie le sens de l'écoulement par la fluorescéine (fig. 46).

L'opération est simple; elle est, en outre, avan-

tageuse, car ces forages sont utilisables pour un captage d'eau. Pour cet objet, il suffit de les munir de tuyaux métalliques qui aboutissent à une conduite unique armée d'une pompe.

Ce mode de captage doit être recommandé lorsque l'on a besoin de grands volumes d'eau.

Il a été appliqué, en 1895, sous le nom de **Tube-wells**, à des recherches d'eau sur le plateau de Piedmont, dans les Carolines (États-Unis). On a même constaté, non sans surprise, que l'opération donnait lieu parfois à une augmentation importante du débit.

Ainsi, le débit qui était de 1.500 gallons d'eau¹, en vingt-quatre heures, par un puits de 8 mètres de profondeur, sur fond de gravier, atteignit le chiffre de 20.000 avec cinq puits conjugués.

V

PUITS-CITERNES ET RÉSERVOIRS DE SUINTEMENTS

Les indications qui précèdent paraissent d'une application facile ; et cependant, lorsqu'on veut

¹ A. Holmes. The underground supplies of potable waters. In Transactions of the American Institute of Mining Engineers. *Atlanta Meeting*, october 1895.

les mettre en pratique, on se butte contre les difficultés inhérentes à la nature physique du sol. C'est qu'en effet on ne rencontre pas fréquemment des plateaux, des versants ou des vallées aussi bien définis et présentant les reliefs ou accidents que je viens d'énumérer; d'ailleurs, en supposant même qu'on ait la possibilité d'appliquer une ou plusieurs de ces règles, on est rarement maître du choix de l'emplacement qui serait théoriquement le plus convenable pour y établir un puits. Il importe donc de chercher une solution pratique et susceptible de donner satisfaction dans les meilleures conditions possibles.

Supposons, par exemple, une vaste plaine dont la terre végétale ou alluvionnaire recouvre des strates horizontales de calcaire. Elle ne peut pas recéler des sources abondantes puisque les pentes sont faibles; cependant le seul fait d'y creuser une cavité, un puits, suffit pour y attirer par succion les eaux environnantes qui imbibent les calcaires.

Il ne s'agit plus ici de sources pérennes ni même accidentelles, mais de simples débits par suintements périodiques qui permettent de créer des approvisionnements d'eau dans une sorte de *puits-citerne*.

Cette solution, de caractère tout à fait spécial, peut s'appliquer non seulement aux calcaires, mais encore aux roches peu perméables, granites et grès, dont j'ai signalé le pouvoir absorbant par imbibition.

Elle est d'ailleurs la seule utilisable quand on se trouve en présence de strates très inclinées dans lesquelles il serait souvent chimérique de rechercher la couche imperméable de drainage. Comme il arrive fréquemment que ces terrains relevés s'imbibent à saturation, il en résulte qu'en les traversant par un puits suffisamment profond on rompt l'équilibre de la zone mouillée et les eaux environnantes suintent dans le réservoir improvisé. Elles le remplissent peu à peu et finissent par atteindre un certain niveau qui varie avec le degré de saturation de la roche.

C'est par ce très primitif procédé que, dans les régions schisteuses à couches fortement inclinées, l'on parvient à créer des puits-citernes qui rendent de précieux services. La réussite est absolument certaine lorsqu'on a la possibilité de les creuser dans l'axe d'un pli ou d'un thalweg.

Le débit de ces puits ne peut être que passager ou intermittent, mais on arrive à le renou-

veler, le cas échéant, par des explosions à la dynamite, comme je l'indiquerai au chapitre suivant.

VI

BARRAGES

Les barrages permettent de retenir, pour des utilisations diverses, les eaux de ruissellement

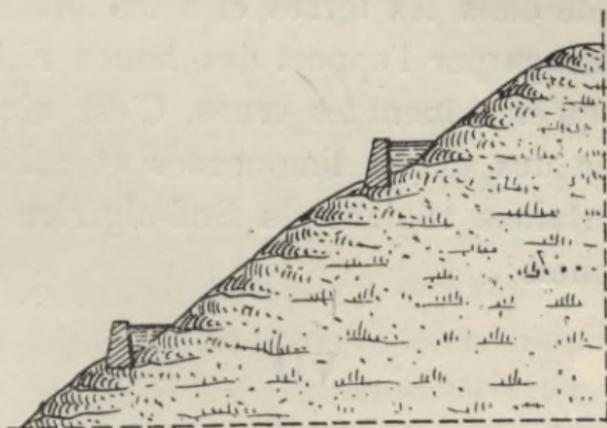


Fig. 47. — Barrages en montagne.

qui dévalent de versants rocheux, imperméables ou déboisés. On les construit en maçonnerie grossière, perpendiculairement aux ravins d'écoulement (fig. 47).

On crée ainsi des bassins de réserve qui se

déversent les uns dans les autres et retiennent l'eau pendant une assez longue période.

On construit encore des barrages d'absorption afin de permettre aux eaux des crues de pénétrer dans les couches profondes et alimenter le gisement aquifère souterrain.

Les barrages d'imbibition superficielle ont pour objet d'imprégner à peu de profondeur des terrains peu perméables, destinés à la culture. On parvient, de cette manière, à conserver de l'humidité dans les terres et à les fertiliser en même temps par l'apport des boues riches en humus qu'entraînent les crues. C'est ainsi que l'on crée des plages limoneuses et cultivables dans certaines régions du Sud-algérien et du Sud-oranais¹.

VII

RÉSERVOIRS RÉGULATEURS

Dans les hautes régions, où les condensations atmosphériques sont plus importantes que dans la plaine, on établit des réservoirs compensateurs ou régulateurs, en appropriant convena-

¹ Service géologique des Territoires du Sud. Campagne 1907-1908. Alger, 1908.

blement les accidents du sol. Cet emmagasinement d'eau constitue de véritables réserves pour l'alimentation ou les usines hydrauliques, en même temps qu'il préserve la région contre les effets destructeurs des gros orages.

VIII

RECHERCHES BASÉES SUR LES CONSIDÉRATIONS DES SIGNES EXTÉRIEURS

Comme on le voit, les règles qui précèdent ne fournissent pas absolument des indications précises et suffisantes ; il est même des cas où elles conduisent, après des recherches laborieuses et des sondages profonds, à des résultats négatifs. D'ailleurs elles peuvent faire complètement défaut dans les vastes plaines et les larges vallées. Il importe donc de les compléter par un supplément de remarques et d'observations, tirées de l'examen des signes extérieurs.

L'abbé Paramelle qui a énoncé quelques-unes de ces règles ne tenait pas suffisamment compte des signes extérieurs ; c'est à coup sûr, un grand tort. L'ingénieur qui cherche l'endroit le plus propice pour établir économiquement un puits,

n'a pas le droit de les négliger, surtout lorsqu'ils témoignent d'une circulation d'eau souterraine à proximité du sol.

Au surplus, ces indices seuls guidaient autrefois les aquilèges romains et nos fontainiers. En y joignant nos connaissances hydrologiques et stratigraphiques, que ceux-ci ignoraient, on doit pouvoir résoudre, dans la majorité des cas, le problème de la recherche et de la captation des eaux souterraines.

Voici d'abord les observations fournies par la végétation.

1° Dans les endroits de nature marécageuse, là où les eaux affleurent ou sont très voisines du sol, on trouve :

Des *saules*, des *osiers*, des *aulnes*, des *joncs*, des *roseaux*, la *fétuque des marais*, des *mousses fraîches*, des *sphaignes*, etc.¹.

2° Si les eaux sont peu profondes, leur présence est dénoncée par :

L'*hépatique des fontaines*, la *fougère commune*, l'*ajonc commun*, la *cicutaire* ou *ciguë aquatique*, l'*hièble sureau*, la *lysimaque monnoyère* ou

¹ Il est curieux de constater que les plantes de sols humides, comme la *colchique d'automne*, les *renoncules*, l'*œnanthe safranée*, la *berce*, les *moisissures* et les *rouilles*, sont dangereuses pour l'alimentation du bétail.

herbe aux écus, la cardamine des prés ou cresson sauvage, la véronique cressonnière, la menthe pouliot, la menthe aquatique, la scabieuse succise, l'inuline à feuille de saule, certaines renoucles comme la reine des prés et le bouton d'or, la colchique d'automne ou veillote, certaines scrofulaires et laiches, etc.

Le *tussilage* ou *pas-d'âne*, qui pousse sur les marnes légèrement mouillées, ne décèle pas nécessairement la présence d'eau en profondeur.

3° Les eaux plus profondes sont décelées par la *prêle dite queue de renard*, la *menthe des champs*, la *ronce des champs*, etc.

L'indication que fournissent ces plantes spéciales est corroborée par une abondance toute particulière de végétation, ou bien encore celle-ci est plus florissante et moins prompte à se faner.

D'autres indices sont également caractéristiques.

Ainsi la neige fond plus vite aux endroits où les eaux souterraines sont très rapprochées; ce qui s'explique par le fait que l'humidité du sol est constamment entretenue et renouvelée par la circulation des eaux.

Cette humidité persistante donne d'ailleurs

naissance à une évaporation qui se manifeste visiblement, le matin et le soir, par une localisation de vapeurs au ras du sol et, en temps de pluie, par une stagnation d'eau.

Enfin, la fraîcheur qui en résulte attire les insectes, et on voit fréquemment en ces endroits des nuées de moucheron qui voltigent en se maintenant à peu de distance de terre.

Toutefois, ces signes particuliers demandent à être contrôlés avec le plus grand soin. D'autre part, ils n'ont une valeur réelle que s'ils se manifestent en des points isolés; ils n'en ont aucune quand ils sont observés sur de larges espaces, parce qu'alors ils indiquent simplement un terrain humide par défaut de perméabilité, ou bien un affaissement du sol où la terre reste longtemps mouillée. C'est le cas des tourbières, des marécages et des prairies à sol peu perméable, et la présence des plantes révélatrices est due simplement à la stagnation superficielle des eaux pluviales. Ces eaux d'imbibition peuvent d'ailleurs être recueillies par un drainage qui provoque leur écoulement dans des rigoles profondes, ouvertes ou souterraines.

Le drainage d'une tourbière donne des facilités pour exploiter la tourbe en la desséchant suffi-

samment et, par suite, en lui donnant une certaine consistance.

Le drainage d'un marécage assainit la région, et enfin le drainage d'une terre argileuse peu perméable permet de l'utiliser avec profit pour la culture. Les eaux recueillies dans les drains peuvent être canalisées et employées à divers usages agricoles.

CHAPITRE X

CAPTAGE DES SOURCES. — GALERIES FILTRANTES. — DRAINS

I

CAPTAGE DES EAUX DE SOURCE

L'eau de source destinée à l'alimentation par le captage peut se définir ainsi :

Une eau pure provenant des couches profondes et recueillie dans des conduites ou des galeries avant d'avoir subi une contamination quelconque par contact avec l'air ou le sol.

C'est un préjugé assez commun de croire que toutes les sources sont pures ou tout au moins potables ; or il s'en faut de beaucoup qu'il en soit ainsi et la pureté d'une eau dépend de la nature des terrains filtrants qu'elle a traversés.

On considère comme susceptibles de recéler des sources pures certains sols comme les grès,

quelques granites fendillés, les schistes anciens, les alluvions épaisses de sables, de graviers ou de cailloux, lorsqu'ils ne sont pas traversés par un gisement métallifère quelconque.

Les roches fissurées donnent des sources abondantes, mais fréquemment impures.

La craie, qui est assez rarement fissurée, renferme de bonnes eaux mais peu abondantes ; elle retient de grandes quantités d'eau mais qui n'est pas captable parce que c'est une eau *d'imbibition* et non de circulation libre.

Dans les schistes feuilletés, l'eau est bonne mais rare ; c'est un produit de suintements.

A ces considérations, il convient d'en joindre une autre que j'ai déjà signalée, à savoir qu'un bassin d'absorption dont la surface est boisée fournira toujours de meilleures eaux qu'un bassin aride, desséché et sans végétation.

On comprend dès lors l'importance que présente l'étude géologique et stratigraphique des bassins d'absorption et de réception pour la captation des sources.

En principe, la recherche des sources correspond à la reconnaissance des couches imperméables du sous-sol, puisque, en thèse générale, toute surface imperméable sert de lit d'écoule-

ment ou de descente à l'eau d'une couche aquifère ; et, en effet, la pratique constante et particulièrement le forage des puits artésiens à grande profondeur établit que, sur toutes les couches imperméables successivement rencontrées, circulent des eaux dont l'abondance est d'autant plus grande qu'elles sont plus profondes.

Lorsque le sol superficiel est lui-même imperméable, il faudra, pour atteindre les eaux souterraines, pénétrer jusqu'à une nouvelle couche imperméable sous-jacente.

Le reconnaissance de la région ayant été effectuée par les divers moyens que j'ai indiqués : examen physique des terrains, étude géologique des roches, particulièrement sur les versants où l'on peut trouver des affleurements, recherche de sources existant déjà dans le voisinage, etc., on saura approximativement sur quelle couche il convient de faire des recherches. L'inclinaison de la strate à partir de son affleurement dans le bassin d'absorption, indiquera à quelle profondeur on aura des chances de rencontrer l'eau, en un point donné.

Si le sol est perméable et constitué par un terrain meuble qui repose immédiatement sur une surface imperméable, on creusera jusqu'à

cette surface. Mais s'il repose sur des roches fendillées, il faudra les traverser. Dans le premier cas, on trouvera peu ou point d'eau pendant la saison sèche ; dans le second cas, on en trouvera plus abondamment et en toutes saisons.

Mais, dans l'un et l'autre cas, si l'on veut installer un puits, il faudra toujours le creuser jusqu'à la roche imperméable et même pénétrer celle-ci d'un ou plusieurs mètres pour y emmagasiner l'eau. On comprend, en effet, qu'en limitant la profondeur du puits à la couche perméable, on s'exposerait à ne plus avoir d'eau pendant les époques de sécheresse ; tandis qu'en la prolongeant dans la roche compacte, on constitue un réservoir capable d'assurer une alimentation d'eau plus abondante et plus fraîche.

L'épaisseur des couches perméables à traverser a une grande influence quant au procédé à employer pour capter les sources. Si elle est faible, on creusera un puits ordinaire ; si elle est grande, plusieurs systèmes peuvent être préconisés. Le plus simple, applicable lorsqu'il existe quelque saillie de la couche imperméable, est le suivant : un peu en amont de cette ligne, on établira une tranchée perpendiculaire à la

descente des filets d'eau, et dans cette tranchée on construira un barrage de retenue en maçonnerie, avec des ailes sur les côtés, de façon à constituer une sorte de réservoir d'où l'on recueillera l'eau avec une tuyauterie en bois ou tout autre moyen.

C'est le cas, par exemple, d'une petite source *S* se manifestant par des suintements à la suite d'une dépression au fond de laquelle on ne pourrait arriver que par un puits très profond *P* (fig. 48).

Le barrage peut être en amont *B_m*, ou mieux en aval *B_v*, selon les convenances locales. L'eau, qui s'amoncelle derrière le mur, est captée le plus bas possible et conduite dans une rigole en bois *C*, ou une conduite en

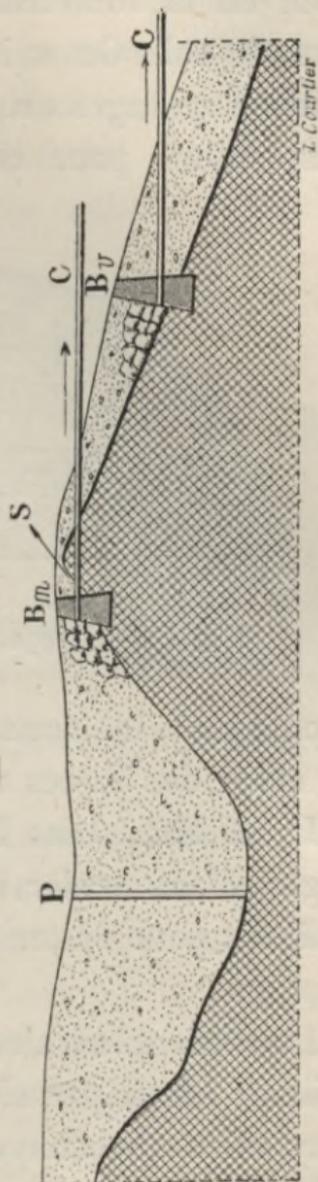


Fig. 48.

tôle, fonte ou poterie, à telle distance que l'on veut en la soutenant convenablement au-dessus du sol. On sait avec quelle économie et quels avantages on utilise les rigoles en bois suspendues pour convoier, dans les pays de

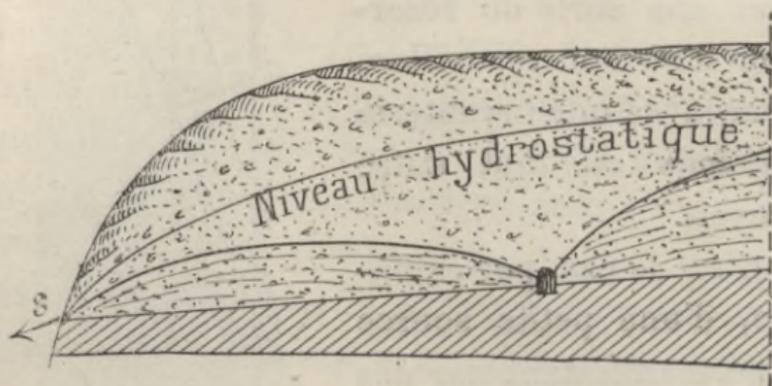


Fig. 49. — Nappe aquifère à un seul versant.

montagnes, les eaux de cascades ou de glaciers, et créer des forces motrices.

Il est bon, dans la construction de ces barrages, d'amonceler, en amont, des pierres et des cailloux pour éviter l'obstruction des canaux de captage.

En règle générale, il y a toujours avantage à utiliser les dépressions de ce genre, car c'est vers elles que convergent les filets liquides, et elles constituent, par conséquent, un centre d'alimentation de sources.

Si les dépressions naturelles n'existent pas, il faut en créer d'artificielles.

Dans ce but, on creuse perpendiculairement à la marche des filets liquides une excavation en tranchée qui produit un appel des eaux de la couche aquifère, soit que celle-ci aboutisse à

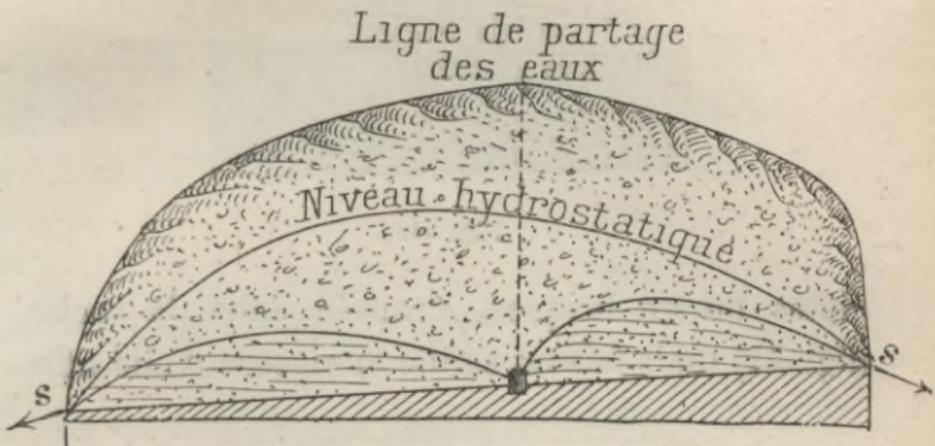


Fig. 50. — Nappe aquifère à deux versants.

un seul versant (fig. 49), soit qu'elle se partage, par une sorte de ligne de faite, en deux nappes alimentant deux systèmes de sources S et S' (fig. 50).

Dans l'un et l'autre cas, la tranchée reçoit des eaux; il n'y a plus qu'à lui donner une forme convenable pour qu'elle puisse les convoyer.

Dans ce but, on la découpe dans la roche et on la remblaie comme pour un drainage. On

fera, par exemple, un simple remplissage en pierres et cailloux, ou bien une rigole en pierres

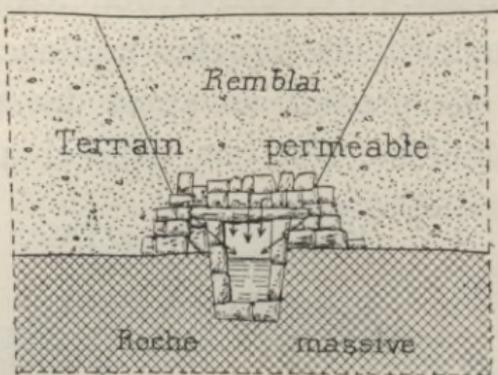


Fig. 51.

plates ou en briques, creusée dans la roche (fig. 51) mais faisant saillie au-dessus d'elle afin

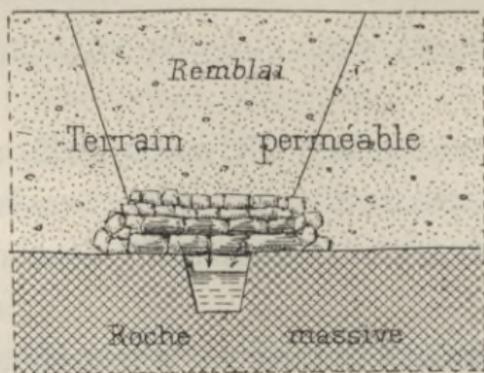


Fig. 52.

de permettre aux suintements liquides de s'y déverser. Si l'on manque de pierres, on creusera

dans la couche imperméable un drain que l'on recouvrira de fascines ou de branchages (fig. 52). On choisira de préférence des branches d'arbres résineux qui résistent plus longtemps à l'humidité.

Une fois la rigole de captation des eaux ter-

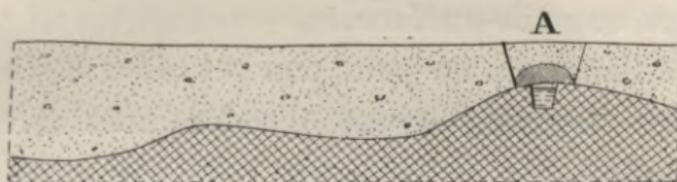


Fig. 53.

minée, on la recouvre de pierres faisant filtre et on remblaie la tranchée.

La largeur de ces drains de captage varie de 10 à 30 centimètres, et leur hauteur de 20 à 30 centimètres. On leur donne des dimensions plus grandes lorsque le captage doit être important.

La captation des sources par galeries implique en soi une assez grande dépense, mais que l'on réduit à un minimum si l'on a soin de rechercher, par des sondages préalables, les points où la roche imperméable se rapproche le plus de la surface, en A par exemple (fig. 53).

Le procédé a été employé à diverses reprises,

pendant ces dernières années, avec l'objet de créer des galeries de captage pour l'alimentation des eaux des villes. Mais il a souvent donné de mauvais résultats parce qu'on avait négligé de loger les galeries dans la roche imperméable et qu'on n'avait pas prévu les contaminations par les eaux de surface.

D'ailleurs, on ne peut pas procéder à de semblables travaux avant d'avoir préalablement déterminé les principales conditions du programme, telles que les suivantes :

1° La nappe aquifère à drainer ne charrie que des eaux pures et n'est pas exposée à recevoir des eaux souillées ou impures.

2° Le tracé de la galerie, convenablement repéré par des sondages, ne comporte pas de dénivellations brusques.

3° Les appels d'eau produits en amont et en aval par la dépression se s'étendent pas à une région susceptible d'être contaminée.

J'ai indiqué, dans un précédent chapitre, que ces appels s'exercent parfois jusqu'à 2 et même 3 kilomètres de distance.

4° Il convient de s'assurer s'il sera possible, le cas échéant et sans dépense excessive, de diminuer ces appels d'eau par des barrages

appropriés ou des serremments convenablement localisés.

La disposition à employer varie selon la nature des terrains; trois cas peuvent se présenter :

1° *La couche perméable du sol repose immédiatement sur un terrain imperméable ;*

2° *Le sol recouvre une roche fissurée de grande épaisseur ;*

3° *Le sol meuble repose sur une roche fissurée peu épaisse.*

1° LA COUCHE PERMÉABLE SUPERFICIELLE REPOSE SUR UNE ROCHE IMPERMÉABLE

Après avoir découvert la roche au point convenable, on creuse la galerie dans la roche

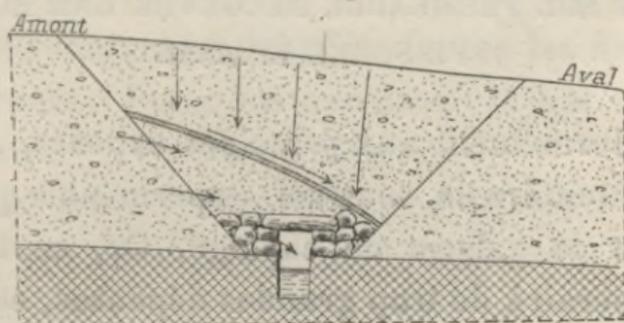


Fig. 54.

même et on la recouvre en pierres sèches (fig. 54). Puis on l'enveloppe d'une couche de sable fin

provenant des matériaux de déblai passés à la grille et cette couche est recouverte d'une cape de ciment, d'un placage d'argile ou toute autre matière imperméable qui défend la galerie contre les infiltrations immédiates de la surface. On remblaie le reste de la fouille.

Avec une semblable disposition, on voit qu'il se forme, au-dessus du drain où vont se réunir les eaux, une sorte de barrage contre lequel tend à s'amasser l'eau d'amont; d'autre part, la cape argileuse ou marneuse rejette, en dehors de la fouille et en aval de la galerie, les eaux de surface qui tendent à s'infiltrer dans la tranchée et qui descendent par gravité.

2° LE SOL PERMÉABLE RECOUVRE UNE ROCHE FISSURÉE ÉPAISSE

Conformément aux principes exposés, il faudrait atteindre le sous-sol imperméable pour y creuser la galerie de captage. Or, ce travail entraînerait à de trop grandes dépenses, et, dans ce cas, voici comment on doit opérer.

On commence par choisir un point en amont des cassures, failles ou bétoires; si cela est nécessaire, on obstrue avec soin par des coulées

de ciment toutes les grandes cassures susceptibles de recevoir des eaux superficielles contaminées.

On établit la fouille aussi profondément que possible, et on garnit le fond et la paroi d'aval d'un mortier quelconque ou d'un enduit mar-

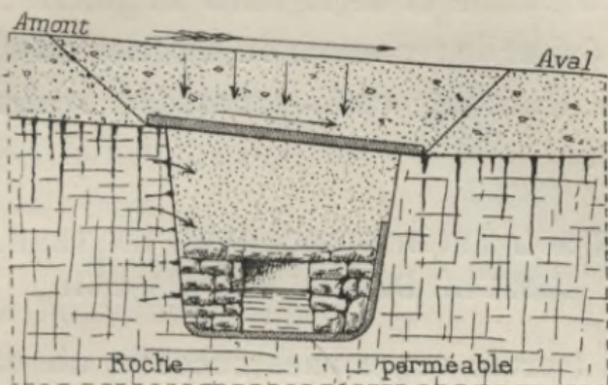


Fig. 55.

neux, de manière à boucher toutes les fissures de la roche. Puis, on construit la galerie de captage en pierres sèches (fig. 55).

On remblaie la tranchée avec du sable et du gravier qu'on recouvre, au-dessus de la roche, avec une cape argileuse ou toute autre matière convenable, mais inclinée d'amont en aval de manière à produire une sorte de fermeture et empêcher la pénétration directe des eaux de surface jusqu'à la galerie.

Cette disposition favorise l'accumulation des eaux contre la paroi d'aval qui joue le rôle de barrage et assure l'alimentation des eaux en même temps que leur filtration.

Les eaux qui arrivent d'amont à travers les fissures de la roche doivent passer facilement dans la tranchée et de là dans la galerie; aussi doit-on éviter de recouvrir de mortier ou d'argile la paroi d'amont; cette paroi doit rester bien dégagée.

3° LE SOL MEUBLE RECOUVRE UN TERRAIN FISSURÉ DE PEU D'ÉPAISSEUR

Si au terrain superficiel succède un calcaire fissuré par exemple, de faible épaisseur, il faut

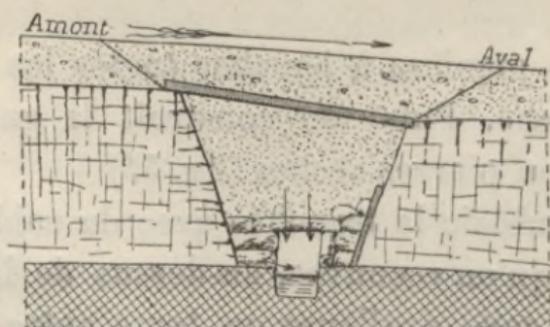


Fig. 56.

ouvrir la tranchée jusqu'au terrain imperméable dans lequel on creuse la galerie dont la couronne

est faite en pierres sèches (fig. 56). On hourdit la paroi aval avec du ciment ou de l'argile, de manière à constituer, comme dans les cas précédents, un barrage qui empêche les eaux de gagner trop vite le côté aval de la tranchée. Puis, on remplit celle-ci avec du sable et du gravier qui forment filtre, et la partie supérieure est recouverte d'une chape d'argile pour empêcher la pénétration des eaux de surface.

Avec les dispositions que je viens d'indiquer, on peut, en presque toutes les cir-

contances, assurer l'alimentation continue des galeries de captage, et, de plus, fournir des eaux claires et suffisamment filtrées.

Lorsqu'il s'agit d'un captage important, on remplace les galeries en pierres sèches par une conduite en béton poreux. On construit le radier en béton ordinaire imperméable et la voûte en béton maigre perméable ou en maçonnerie poreuse sans enduit (fig. 57 et 58). Dans certains cas, il convient de ménager dans les galeries des regards de visite et d'y établir des passerelles en fer au-dessus du plan d'eau normal. En pla-

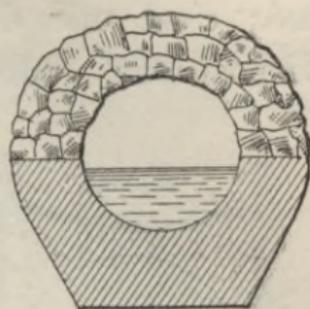


Fig. 57.

cant les passerelles à 1,75 m. de la voûte, on peut parcourir la galerie sans en souiller l'eau (fig. 59).

Quelquefois on se contente de recouvrir la galerie de dalles filtrantes en béton armé; c'est une des dispositions adop-

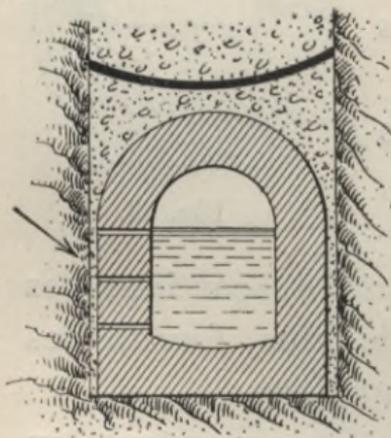


Fig. 58.

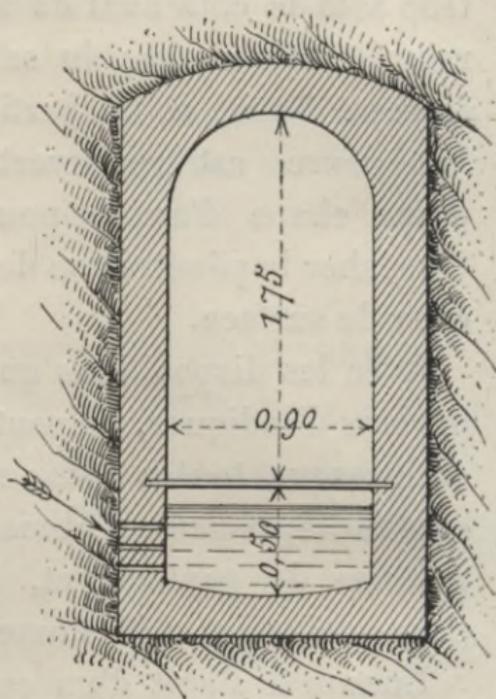


Fig. 59.

tées par le service des travaux de la ville de Paris. Le béton présente la composition suivante :

Ciment à prise lente	1
Graviers fins.	10

Le cas échéant, on assure l'imperméabilité

complète du béton en l'enduisant de ciment qu'on badigeonne ensuite au goudron.

La galerie de captage peut être utilisée pour constituer, aux époques de grande sécheresse, une réserve d'eau; pour cet objet, deux procédés sont applicables.

1^{er} Cas. — LA SOURCE EST AMÉLIORÉE PAR EXHAUSSEMENT EN AMONT. — Dans son traité d'hydrau-

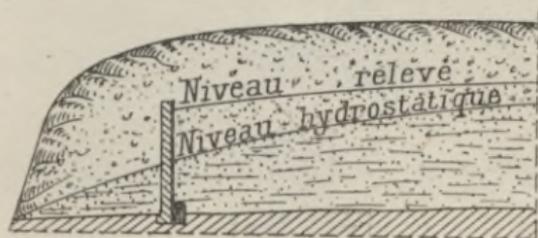


Fig. 60.

lique souterraine, M. Pochet indique une mise en œuvre très simple¹. On creuse en travers de la vallée une tranchée AB, de 0,80 environ de largeur, jusqu'au niveau imperméable. On la remplit d'argile pilonnée de manière à former un barrage imperméable à la base duquel on établit une galerie de captage G en pierres sèches.

Le niveau aquifère est ainsi relevé de C en A (fig. 60).

¹ L. Pochet. *Op. cit.*, p. 285.

En un point convenablement situé, sur le parcours de la tranchée, on dispose un regard à vanne en maçonnerie, la tige de manœuvre de la vanne se lève ou s'abaisse selon les conditions de régime de la nappe aquifère et permet ainsi

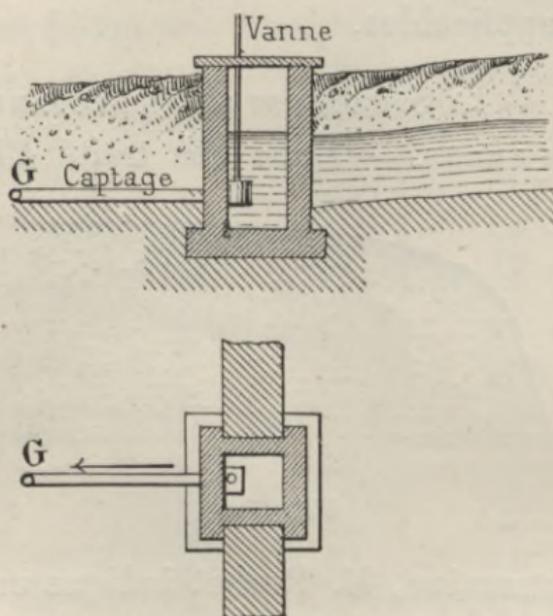


Fig. 61 et 62.

de régulariser le débit dans la conduite de captage G (fig. 61 et 62).

Ce mode d'amélioration du débit d'une source par exhaussement du niveau hydrostatique en amont s'applique surtout aux nappes peu profondes.

2^e Cas. — LA SOURCE EST AMÉLIORÉE PAR ABAIS-

SEMENT, AU MOYEN DE GALERIES. — J'ai déjà signalé, en parlant des bassins d'absorption ou de réception, le principe d'abaissement des sources.

Une galerie de captage, placée au-dessous du point d'émergence de la source, prend plus d'eau et peut former réservoir de régularisation pendant les époques de sécheresse. La figure 63,

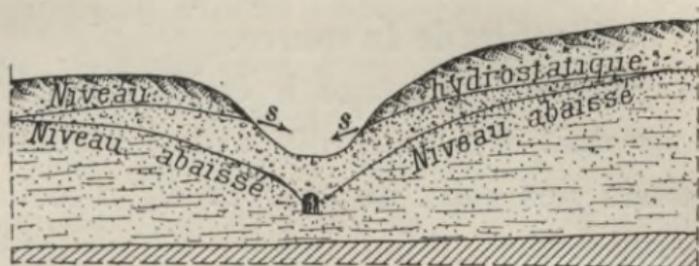


Fig. 63.

d'après M. Pochet, indique l'abaissement de niveau produit par une galerie de captage, dans le cas où le thalweg commun à deux nappes aquifères correspond à deux séries de sources S et S'.

Ce procédé procure, selon M. Pochet¹, les avantages suivants :

1° Il permet de mettre, à toute époque de l'année, dans les années sèches comme dans

¹ L. Pochet. *Op. cit.*, p. 278.

les années humides, le débit capté en rapport avec les besoins de la consommation ;

2° Il augmente la valeur du débit moyen extrait de la couche aquifère ;

3° Il évite les déperditions qui se produisent pendant la saison humide par suite du débit surabondant de la source et, pour ce double motif, il augmente dans une proportion considérable l'utilisation de la source.

La galerie de captage à établir suivant ce principe doit être raccordée avec les conduites d'amenée des eaux de sources et, si celles-ci sont trop hautes, il faut la faire déboucher dans un puits d'où les eaux seront remontées à la hauteur des conduites.

CONCLUSIONS

En somme, le captage des eaux de source est toujours un travail difficile. Le cadre restreint de ce livre ne me permet que d'indiquer tous les éléments, d'ailleurs essentiellement variables, d'une méthode opératoire, mais on peut aisément se documenter dans les ouvrages spéciaux qui contiennent des monographies de captages et de distributions d'eaux.

Je rappellerai seulement les trois principes suivants qui résument tout ce qui précède :

1° *Il faut toujours creuser les tranchées de captage perpendiculairement au thalweg, quand on opère en vallée; et perpendiculairement à la ligne de plus grande pente lorsque la fouille est faite sur un versant;*

2° *S'il n'est pas possible de descendre la tranchée jusqu'au niveau imperméable, on l'approfondit suffisamment pour que les filets d'eau tombent en chute dans la galerie;*

3° *Dans les grands captages, le niveau du radier doit être tenu à 5 ou 6 mètres au moins de profondeur afin que la source ne soit pas exposée à tarir pendant les périodes de grande sécheresse, ou à se contaminer aux époques de grandes pluies ou de fonte des neiges.*

II

RÉSERVOIRS D'ALIMENTATION

La création de dépressions artificielles, dans le genre des galeries de captage, peut d'ailleurs recevoir beaucoup d'autres applications. En voici encore un exemple.

Dans les pays de montagnes, traversés par des ruisseaux à régime torrentiel, il arrive constamment que le lit de ces cours d'eau est à sec pendant une partie de l'année. Mais quand le thalweg du vallon correspond sensiblement au thalweg souterrain, on voit poindre des sources

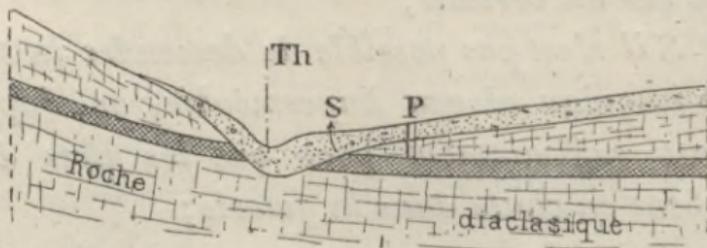


Fig. 64.

qui apparaissent et disparaissent, pendant l'étiage, dans le lit sablonneux et desséché. C'est le cas d'une vallée d'érosion où des bancs de calcaire fendillé reposent sur une couche de marnes feuilletées, et dont le fond est un remplissage de débris de roches, cailloux et sables charriés par les eaux (fig. 64). En suivant les berges pendant la saison sèche, il est rare de ne pas voir poindre quelque suintement d'eau, indice d'une source qu'il est dès lors facile de capter par un puits P en amont. Pour augmenter le débit du puits, on en enveloppe la base

d'une tranchée garnie d'une murette avec deux ailes de retour maçonnées, et qui forme comme un réservoir d'alimentation.

III

GALERIES FILTRANTES D'EAUX DE RIVIÈRES

Les galeries filtrantes d'eau de rivière avaient primitivement pour but la purification de l'eau destinée à certaines industries : papeteries, brasseries, etc.

On les établit sur la berge, un peu au-dessous de l'étiage, avec un recouvrement de sables filtrants d'au moins 2 mètres d'épaisseur.

Actuellement on les utilise quelquefois, concurremment avec les captages de sources, pour l'alimentation des agglomérations.

M. Imbeaux, qui a installé, sur les rives de la Moselle, des galeries filtrantes destinées à l'alimentation en eau potable des villes de Pont-à-Mousson et Nancy, indique les conditions indispensables à leur bon fonctionnement en général¹:

¹ Imbeaux. *Les eaux potables et leur rôle hygiénique dans le département de Meurthe-et-Moselle*. Nancy, 1897.

1° L'épaisseur de la couche filtrante doit être aussi grande que possible ;

2° L'arrivée de l'eau, dans les galeries, doit se faire sous une faible pression ;

3° Le terrain filtrant doit être formé d'éléments fins.

Malgré toutes les précautions prises, les galeries filtrantes subissent toujours l'influence pernicieuse des crues et le filtrage finit par devenir si défectueux qu'on doit y renoncer.

C'est ce qui est arrivé en 1905, à Breslau, dans des conditions assez particulières¹. La ville, dont la population dépasse 400.000 habitants, était alimentée par les eaux de l'Oder préalablement filtrées sur des lits de sable. Or la contamination sans cesse croissante du fleuve devint si considérable que l'on dut chercher un autre mode d'alimentation.

On crut bien faire en établissant, dans la nappe phréatique de la région, des puits tubés de 315 millimètres de diamètre, disposés en quinconces à 21 mètres les uns des autres.

Or il arriva que le débit, qu'on avait prévu à 60.000 mètres cubes au début, tomba assez

¹ *Annales des Travaux publics de Belgique*, décembre 1906, p. 1311.

rapidement à 40.000; puis l'eau se chargea d'oxydes de fer et de manganèse dans des proportions sans cesse croissantes et qui atteignirent bientôt 400 milligrammes par litre. L'eau, qui était devenue trouble avec une saveur métallique très prononcée, donna bientôt une odeur tellement infecte qu'il fallut renoncer à la purifier et l'on revint aux filtres à sable. Le mouvement des eaux, dans la couche phréatique, avait amené le délayage d'un banc ferrugineux et l'entraînement des oxydes métalliques.

IV

DRAINS ET DRAINAGES

Le drain est une forme particulière de la galerie de captage.

Le drainage, dont j'ai déjà dit quelques mots à la fin du chapitre ix, n'a pas seulement pour but d'écouler des eaux stagnantes, il permet encore d'ameublir et d'aérer les terrains de façon à les rendre propres à la culture. C'est le cas des sols marneux, argileux, trop compacts ou encore simplement argileux, mais reposant à peu de profondeur sur un plan imperméable.

Le plus communément on prépare les drains en creusant des tranchées que l'on remplit de pierres ou de fascines et que l'on recouvre de terre. Mais, à la longue, la terre remplit les interstices et les drains ne fonctionnent plus.

Le mieux est d'installer des drains en poterie, avec une pente de 3 à 5 millimètres par mètre. L'eau les pénètre par les joints des manchons de raccordement et par les pores du matériel; on la recueille dans des collecteurs et on l'écoule comme on peut.

La loi de 1834 sur le drainage permet au propriétaire désireux d'assainir son fonds, de traverser les propriétés voisines qui le séparent du cours d'eau, moyennant une indemnité raisonnable; exception est faite toutefois des habitations et jardins attenants.

OUVRAGES A CONSULTER

ANNALES DES PONTS ET CHAUSSÉES. — Dumas, éditeur, Paris.

ANNALES DE LA CONSTRUCTION. — Béranger, éditeur, Paris.

DIVERS. — Distributions d'eaux de ville. — Dunod et Pinat, éditeurs, Paris.

ANNALES DES TRAVAUX PUBLICS DE BELGIQUE. — Captage des sources de l'aqueduc des Pouilles. Bruxelles, 1905.

LÉON POCHET. — Etudes sur les sources. Applications. Paris, 1905.

A. DEBAUVE ET IMBEAUX. — Distributions d'eaux. Paris, 1906.

CHAPITRE XI

EAUX ARTÉSIENNES

I

THÉORIE DES PUIITS ARTÉSIENS

Je n'ai traité jusqu'ici que des eaux dites *phréatiques* (de φρεας, puits), c'est-à-dire des eaux qui alimentent les puits ordinaires et les captages simples ; il me reste encore à parler de ces eaux, souvent très profondes, qui tendent à s'élever ou même à jaillir au-dessus du sol et qu'on désigne sous le nom d'**eaux artésiennes**.

Tandis que les eaux phréatiques sont exposées aux souillures de la surface, les eaux profondes, bien qu'issues comme elles des eaux pluviales, sont plus saines parce qu'elles ont subi une longue et lente filtration qui les ont purifiées des contaminations microbiennes.

Il y a donc un puissant intérêt à rechercher

les eaux souterraines profondes et, en particulier, celles qui peuvent être jaillissantes et que l'on capte en puits artésiens.

L'explication du jaillissement est simple. On conçoit en effet que si une couche aquifère profonde remplit complètement l'intervalle de deux strates imperméables dont la plus basse possède des bords relevés, l'eau s'y trouve soumise à une certaine pression et ne peut s'échapper qu'en débordant sur la rive la moins élevée. Mais si on l'atteint par un forage traversant la strate imperméable supérieure, elle tend immédiatement à monter dans le tubage, autant que le permet la pression à laquelle elle se trouvait soumise dans la cuvette.

Or, cette pression dépend du relèvement des bords et, selon que ceux-ci sont plus ou moins hauts, l'eau peut s'élever plus ou moins et même jaillir au-dessus du sol, conformément à la loi des pressions hydrostatiques, en donnant naissance à une source artésienne jaillissante.

Le puits artésien paraît avoir été connu de toute antiquité. On le trouve en effet en Chine, en Asie Mineure, en Égypte, au Sahara, etc.

En Europe, le plus anciennement connu est celui qui existe encore dans la Chartreuse de

Lillers, en Artois, d'où le nom d'artésien, et qui, foré en 1126, n'a jamais cessé de fournir une eau abondante.

Lors donc que l'on fore un sondage ou un puits dans une nappe de nature artésienne, l'eau y afflue et tend à monter. Si la couche aquifère présente une interruption, une faille, des fissures ou cassures, ou un affleurement sur un versant, le même phénomène se produit et l'eau afflue en ces endroits sous forme de source abondante ou d'un jaillissement.

On a attribué ce fait au mécanisme des vases communicants et l'on en a conclu que la hauteur d'ascension dans le puits correspond au niveau d'équilibre des liquides. Or, M. Daubrée a expliqué avec beaucoup de raison¹ que cette hauteur dépend plutôt des distances du puits au bassin de réception et à l'orifice d'écoulement.

Si l'on compare la nappe artésienne à un tuyau RO et le bassin qui l'alimente à un réservoir A (fig. 65), l'expérience montre qu'en fixant des tubes t , t' , t'' , sur les tuyaux, les niveaux piézométriques de l'eau dans ce tube sont situés sur la ligne AO, dite ligne de charge, qui joint l'ori-

¹ Daubrée. *Les eaux souterraines à l'époque actuelle*, p. 153. Paris, 1887.

ficé de sortie O à l'extrémité de la ligne verticale RA élevée du point R jusqu'à la surface libre du liquide.

En appliquant cette règle aux trois puits, P, D

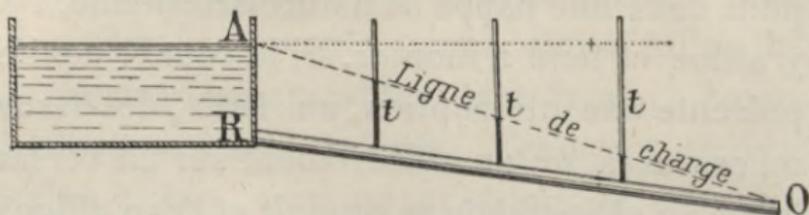


Fig. 65. — (D'après Daubrée.)

et J forés sur une nappe artésienne OA, on voit que le puits J fournira des eaux jaillissantes et le puits D des eaux qui se déverseront sim-

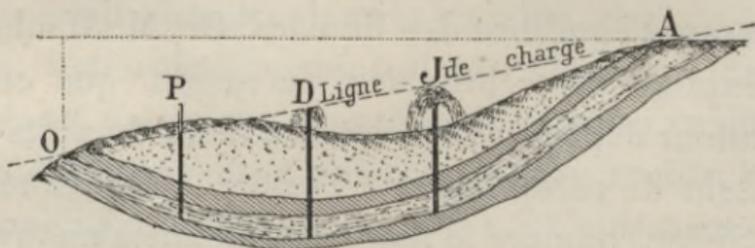


Fig. 66.

plement à l'extérieur, tandis que l'eau ne s'élèvera pas suffisamment dans le puits P pour arriver jusqu'au sol (fig. 66).

La ligne de charge OA est contenue dans une surface plus ou moins sinueuse, que M. Dau-

brée appelle **surface piézométrique** ou **surface de charge**.

On aura donc, en un point donné, des eaux jaillissantes ou non, selon que la verticale de ce point rencontre la surface piézométrique au-dessus ou au-dessous du sol.

Cette théorie est en accord complet avec tous les faits observés et, en particulier, avec les suivants que cite M. Daubrée :

1° Le niveau piézométrique, en un point donné, est indépendant du diamètre du forage, et il est généralement plus élevé lorsque le trou est tubé que s'il ne l'est pas.

2° Le volume d'eau que fournit un puits artésien augmente avec le diamètre du puits, mais non pas proportionnellement à sa section. Le rapport des débits est moindre que celui des sections et d'autant moindre que celles-ci sont plus grandes.

3° Le volume augmente à mesure que l'on prend l'eau en un point plus rapproché du sol ou à une plus grande distance en dessous du niveau piézométrique.

4° Deux puits suffisamment voisins s'influencent ; et la somme de leurs débits tend, à mesure qu'ils sont plus rapprochés, à se réduire

à ce que donnerait un puits unique ayant une section égale à la somme de leurs sections.

II

PUITS ABSORBANTS

Quand, en un point donné, le niveau piézométrique passe au-dessous du sol, le forage qu'on y établit peut servir de puits absorbant ou **boit-tout**, car les eaux qu'on y déverse de la surface s'écoulent dans la zone aquifère, sans que le niveau s'élève.

Ces puits absorbants rendent de grands services pour écouler des eaux usagées, drainer des régions humides, etc., etc.

En raison des importantes applications qu'ils ont reçues en ces dernières années, il m'a paru nécessaire de donner quelques renseignements complémentaires sur leur fonctionnement et leur construction.

Tout puits absorbant doit pénétrer d'une certaine profondeur dans la couche aquifère destinée à absorber des eaux superficielles. Si cette couche est un banc de sable, l'opération est simple ; mais si c'est une roche diaclasique, il

faut descendre le puits jusqu'à ce qu'il atteigne une grande cassure, ou tout au moins un réseau de fissures, dans laquelle on lancera deux ou trois petites galeries en éventail afin de multiplier les surfaces d'absorption.

Les puits simples, destinés à recevoir les eaux ménagères, par exemple, et qu'on désigne vulgairement sous le nom significatif de **puits perdus**, ne sont que des excavations pénétrant jusqu'à la zone aquifère et remblayées ensuite au moyen de pierres, cailloux et sables.

Les puits plus importants se construisent en maçonnerie, au diamètre de 1 à 2 mètres.

Si la nature des eaux déversées laisse craindre la formation de feutrages ou d'ensablements, il est mieux de remplacer le puits maçonné par une forte tuyauterie en fer qu'on descend au-dessous du niveau hydrostatique de la zone aquifère. L'eau monte dans le tuyau à un niveau qui varie peu.

Les puits absorbants ont reçu de nombreuses et intéressantes applications : *évacuation des eaux ménagères, perte des eaux usagées et des eaux industrielles polluées, dessèchement des marais, élimination des eaux imprégnant des fondations importantes*, etc.

A Bondy, près de Saint-Denis, un boit-tout de

74 mètres reçoit journallement 135 mètres cubes d'eaux-vannes de Paris.

On a même entrepris des travaux de forage ayant pour but d'écouler dans des puits absorbants l'eau des grandes crues de la Seine. M. Diénert, ingénieur du Service des eaux de la ville de Paris, est parvenu à démontrer, à la suite d'essais effectués dans les vallées du Loing et du Grand-Morin et sur le plateau de Romainville, que les bassins de la Seine et de la Marne se prêtent à l'établissement de vastes puits absorbants capable de diminuer l'intensité des crues de ces deux rivières.

La circulation sous pression des eaux artésiennes peut ainsi être utilisée avec grand profit pour des travaux d'assainissement et d'utilité publique.

C'est donc à des points de vue très divers que l'on a intérêt à effectuer les recherches des eaux profondes de caractère artésien.

III

RECHERCHES DES EAUX ARTÉSIENNES

Les recherches artésiennes sont assez limitées ; il est évident que les plateaux isolés, les lignes

de faite des bassins d'alimentation, ne peuvent donner lieu à des travaux de sondage pour une installation de puits. On préférera les fonds de bassins encaissés par des collines vers lesquelles les strates se relèvent, car les couches aquifères qui en suivent toutes les inflexions pourront fournir des eaux ascendantes si un forage bien conduit les atteint dans les parties basses.

Dans une vallée, on fera des recherches dans les dépressions du thalweg souterrain.

C'est en général dans les strates du terrain crétacé que l'on a le plus de chance de rencontrer des eaux artésiennes, et particulièrement quand la roche est fissurée. On en trouve aussi, mais moins fréquemment, dans le terrain jurassique où les bancs arénacés sont plus rares ; ce terrain est plus propice, par sa constitution géologique et stratigraphique, aux sources non jaillissantes.

Pour qu'une région soit favorable à une recherche d'eaux artésiennes, il est nécessaire qu'elle réunisse certaines conditions spéciales aux points de vue stratigraphique, géologique et hydrologique.

Ces conditions sont les suivantes :

1° Le sol doit être formé de strates enfoncées en cuvettes à bords relevés ;

2° Les terrains les plus favorables aux recherches sont ceux qui sont composés de strates alternativement perméables et imperméables : *sables et marnes, calcaires fissurés et argiles marneuses*, etc.

Plus la cuvette est profonde, plus le jaillissement sera important ; le forage décèlera les couches aquifères successivement traversées, par une différence de pression et aussi de composition des eaux.

Aux grandes profondeurs, la couche aquifère peut fournir des eaux artésiennes sans qu'elle soit nécessairement renfermée entre deux terrains imperméables ; il suffit qu'elle soit comprimée par une couche imperméable superposée.

Il est à noter que la mobilité de la nappe résulte d'une circulation continue et non d'une descente par gravité.

3° Pour que les eaux artésiennes soient susceptibles d'être captées, il faut que le bassin de réception qui contient la nappe aquifère ne présente pas de solution de continuité résultant d'une faille ou coupure, ou d'un accident géolo-

gique quelconque tel que dénudation, dislocation, intrusion d'un dyke éruptif, etc.

4° Enfin, pour que l'eau soit jaillissante en un point du sol, il est nécessaire que la surface piézométrique passe au-dessus de la surface du sol.

Quand on a déterminé le point le plus propice aux recherches, on s'installe de préférence sur un grand affleurement perméable de sables, graviers, conglomérats, grès, etc. Un affleurement de grande superficie suppose toujours une strate peu inclinée et, dans ce cas, on arrive à déterminer avec une certaine précision la profondeur à laquelle on rencontrera les eaux, au point choisi pour l'installation.

Une particularité bien connue des puits artésiens, c'est la régularité de leur débit qui reste indépendant des conditions atmosphériques, contrairement au cas des eaux phréatiques ; la grande profondeur de la cuvette la met en effet à l'abri des variations météorologiques du sol.

Mais si leur débit reste sensiblement constant, il est quelquefois insuffisant, et l'on peut arriver à l'augmenter en suralimentant artificiellement la nappe aquifère.

Cet intéressant procédé est dû à l'ingénieur suédois Richert. Dans le but de fournir une eau pure et abondante dans les villes de Gothenbourg et Uddevallen, en Suède, M. Richard eut l'idée de dériver les eaux du fleuve Gotha sur l'affleurement sableux d'une grande strate perméable



Fig. 67.

contenue entre deux terrains imperméables (fig. 67). L'eau de la rivière filtrant sur un grand parcours se purifie, puis entre dans la circulation de la zone artésienne profonde, dont elle augmente notablement le volume. Actuellement, les puits artésiens, établis dans le bassin, fournissent par suralimentation une eau claire, abondante et à peu près aseptique.

IV

ÉTABLISSEMENT DES PUIITS ARTÉSIENS

La captation des eaux artésiennes se fait au moyen d'un forage dans lequel on dispose un tubage en fer ou acier, ou un cuvelage en maçonnerie. Celui-ci est prolongé au-dessus du sol de manière à permettre l'utilisation immédiate ou l'emmagasinement des eaux jaillissantes.

Si la pression est insuffisante pour faire monter l'eau jusqu'au jour, on attelle une pompe au tubage.

En principe, on peut annihiler le débit en surélevant le tubage au-dessus du point d'ascension maximum; on peut aussi le régler à volonté en pratiquant l'opération inverse.

C'est dans les craies et calcaires fissurés qu'on exerce le plus avantageusement les recherches d'eaux artésiennes, parce que ces roches contiennent toujours des sources ou même des ruisseaux souterrains. Il convient donc de n'entreprendre le forage définitif qu'après avoir préalablement étudié la région

au moyen d'un certain nombre de petits sondages rapides susceptibles de donner quelques renseignements sur la présence et la pression des eaux.

Cette précaution est indispensable car un seul forage risquerait d'aboutir en quelque point sec, isolé, quoique entouré de toutes parts par des cassures ou des fissures remplies d'eau.

D'ailleurs il existe presque toujours plusieurs nappes artésiennes superposées et l'on a le plus grand intérêt à atteindre la plus profonde parce que c'est elle qui non seulement donnera le plus grand débit, mais encore fournira les eaux les plus pures.

Lorsque le sol ne dépasse pas une dureté moyenne et que l'eau artésienne circule à une profondeur inférieure à 50 mètres, ce qui est d'ailleurs assez rare, on peut procéder soi-même aux recherches, comme je l'indiquerai plus loin avec quelques détails. Mais, pour de grandes profondeurs il vaut mieux, à tous égards, traiter le travail à forfait avec un entrepreneur de sondages.

Le choix d'un matériel de sondage¹ dépend de

¹ Paul-F. Chalon. *Manuel du Mineur*. Paris, 1909.

la profondeur à atteindre et de la nature des roches. Dans les terrains argileux, les tourbes, certains lignites, etc., on se contente d'une

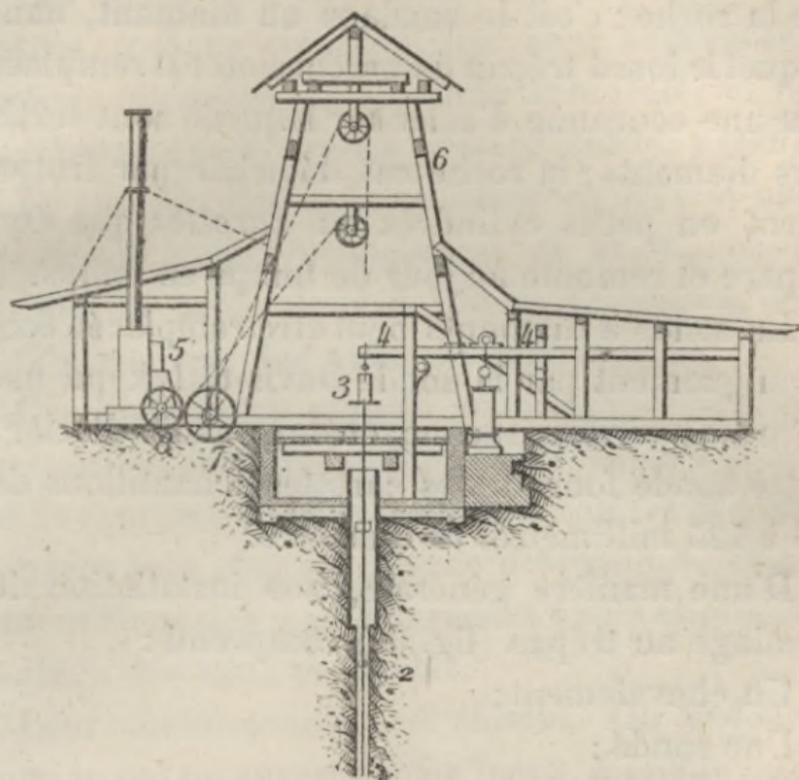


Fig. 68. — Installation de sondage.

tarière; dans quelques cas on peut même faire usage de la cuiller de nettoyage dite *à mouche de tarière*. Mais en général il faut des outils spéciaux. Les uns (*tarières et trépan de percussion*) agissent par pénétration avec combinaison d'un mouvement de rotation, c'est le **sondage à la**

tige rigide ; d'autres travaillent par percussion sous une charge considérable, c'est le sondage à la corde. Enfin, le forage peut se faire par usure de la roche ; c'est le sondage au diamant, dans lequel le lourd trépan de percussion est remplacé par une couronne d'acier sur laquelle sont sertis des diamants ; la roche est détachée par frottement en petits cylindres ou *carottes* que l'on sépare et remonte au jour de temps en temps.

La sonde à diamants peut être remplacée économiquement par la sonde Davis-Calyx qui use la roche par rodage au moyen de grenaille d'acier ; cette sonde fournit des carottes-échantillons de 40 à 125 millimètres de diamètre.

D'une manière générale, une installation de sondage au trépan (fig. 68) comprend :

- Un chevalement ;
- Une sonde ;
- Un appareil de battage ;
- Un treuil de levage ;
- Un treuil de curage.

La sonde se compose de :

1° La tige divisée en tête, rallonges et joints ou coulisses à chute libre ;

2° L'outil d'attaque par rodage (*trépan*) ou par rotation (*tarière*).

Le plus souvent on garnit le trou de sonde avec un tubage en tôle de fer ou d'acier.

Les tubes sont descendus les uns dans les autres (*tubage complet*), ou sont superposés (*tubage télescopique*), ou enfin sont isolés et ne garnissent que certaines passées (*tubage perdu*).

Le captage des eaux artésiennes devient une opération facile, économique et avantageuse, jusqu'à la profondeur de 30 ou 40 mètres, par l'établissement des puits dits **instantanés**.

Ces puits qu'on appelle encore **puits Norton**, du nom de leur inventeur, ou **abyssins** à cause de l'avantageux emploi qu'en ont fait les Anglais pendant leur rude campagne d'Abyssinie, constituent l'une des plus heureuses applications du captage des eaux profondes.

Leur établissement est simple. On enfonce dans le sol un tuyau en fer forgé, à pointe ou à vis, perforé à la base ; puis à son sommet on adapte une pompe à bras.

On peut employer le tube en acier, de 30 à 50 millimètres de diamètre, qu'on enfonce à l'aide d'un mouton à cordes. Le tubage complet est formé de tubes partiels vissés les uns sur les autres.

La figure 69 indique la manière d'opérer. Le

tube A porte deux colliers B et C; sur le premier sont fixées deux petites poulies à cordes qui commandent le mouton D et celui-ci frappe, en tombant, sur le second collier.

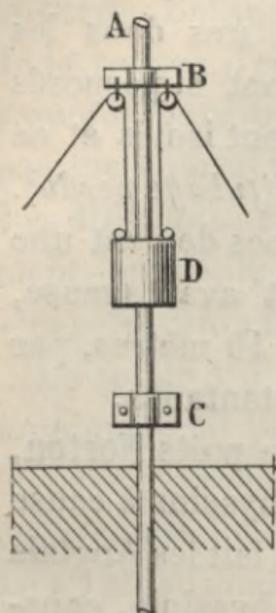


Fig. 69.

Lorsqu'on dispose d'une sonnette à vapeur, on peut atteindre des profondeurs de 30 à 40 mètres en faisant usage d'un tuyau de plus gros diamètre.

Aussitôt que le tube est en place, on l'arme d'une pompe de fortune avec laquelle on cure la base où se fait la prise d'eau; on produit ainsi une sorte de réservoir qui ser-

Quand, par suite de l'enfoncement, le collier C est arrivé au niveau du sol, on le replace un peu plus haut ainsi que le collier supérieur, et on reprend le battage.

Fig. 70.
Puits Norton.

vira à alimenter la pompe définitive (fig. 70).

Si, au cours du travail, la pénétration du tube dans le sol présente des difficultés, on le retire à l'aide d'un levier et on change de place.

Le pompage direct dans une couche aquifère sableuse présente certaines difficultés, car les sables fins sont aspirés et engorgent assez rapidement la conduite.

On y remédie de deux manières :

1° On installe, à la hauteur où l'eau monte naturellement dans le forage, un réservoir étanche sur lequel on attelle la pompe définitive.

2° On descend le tuyau de sondage aussi bas que possible, afin de traverser les sables et atteindre le fond de graviers et cailloux de la couche aquifère. L'aspiration des sables, par le fond du tube, perforé ou muni d'une crépine, devient ainsi plus difficile; sans compter que l'eau remontée est plus pure parce qu'elle est plus profonde.

Le puits Norton est avantageux parce qu'il permet de traverser facilement les terrains cou-lants et les couches aquifères impures sans qu'il soit besoin de le préserver par un cuvelage quel-conque.

Il est économique dans les terrains mous et

de moyenne dureté, car son établissement n'est pas plus coûteux que l'installation d'une pompe à bras sur un puits déjà existant.

Enfin il s'applique aussi bien aux couches phréatiques qu'aux nappes artésiennes.

Dans certains cas, on dispose les puits instantanés par séries en quinconces aboutissant à un réservoir unique sur lequel on attelle une pompe.

Si la pompe à piston est insuffisante, on emploie l'*émulseur* ou le *pulsateur à air comprimé*. Avec une seule station d'air comprimé, on peut pomper l'eau de plusieurs forages éloignés les uns des autres.

V

APPLICATIONS DIVERSES DU CAPTAGE DES EAUX ARTÉSIENNES

Nombreux et bien connus sont les services rendus par les eaux artésiennes captées, sous une forme jaillissante ou demi-jaillissante, dans les contrées désertiques telles que le Sahara, et dans les grandes plaines arides de l'Australie, de la Californie et de la République Argentine.

En Australie, les premières recherches datent de 1879 ; à cette époque, le puits foncé à Killara,

dans la Nouvelle-Galles du Sud, rencontra l'eau à 322 mètres de profondeur et fournit un débit journalier de 15.000 mètres cubes. Depuis cette époque, on y a pratiqué près de 500 sondages et presque tous avec succès; le plus profond est celui d'Euraba qui débite 5.000 mètres cubes par jour.

En Californie, les eaux ne sont qu'à demi jaillissantes et doivent être pompées à 50 et même 100 mètres de profondeur. Or le développement donné aux sondages artésiens a permis de pratiquer les irrigations avec tant de succès qu'actuellement la Californie du Sud possède les plus vastes cultures du monde en prairies, en betteraves et en jardins fruitiers.

Dans l'Afrique du Nord, le forage de puits artésiens a favorisé la création de nombreuses oasis nouvelles et l'amélioration de toutes les anciennes. L'eau jaillissante ou à demi jaillissante est dirigée dans des réservoirs d'où elle est distribuée dans les rigoles d'irrigation.

Dans le sud de l'Algérie, les sources artésiennes se manifestent à la surface du sol sous deux formes¹. Elles émergent directement, sans

¹ Service géologique des territoires du Sud de l'Algérie.

jaillissement, des calcaires fissurés et coulent au jour (fig. 71); ou bien elles n'atteignent le sol

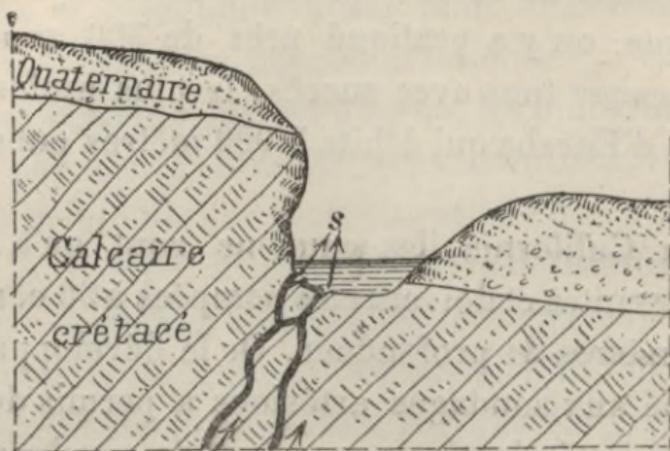


Fig. 71. — Fontaine d'Aïn-Mzata (d'après M. Flamand).

qu'après s'être frayé un passage, parfois assez long, dans le terrain quaternaire de recouvrement.

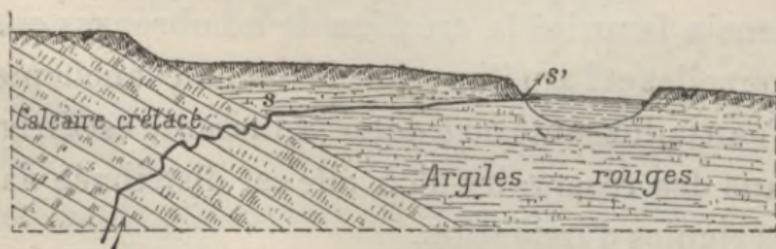


Fig. 72. — (D'après M. Flamand.)

Leur point d'émergence S' (fig. 72) n'est qu'une

Campagne 1907-1908. *Géohydrologie appliquée*, par M. Flamand, directeur-adjoint,

fausse source ; elle procède de la véritable S qui est une source artésienne chassée des calcaires par pression.

Ces sources n'ont nullement, comme on pourrait le croire au premier abord, une origine phréatique.

En Europe, les captages artésiens ont également rendu de grands services à l'agriculture. On sait avec quelle habileté les Italiens ont utilisé les eaux artésiennes pour irriguer les plaines de la Lombardie.

Dans la région milanaise, il existe plusieurs couches aquifères profondes dont les relèvements affleurent les uns à la suite des autres, avec une assez faible dénivellation. En creusant des puits jusqu'aux surfaces imperméables, l'eau remonte et se déverse sur le sol ; on garnit ces puits ou *fontanili* de tubages en bois de 2 à 3 mètres de hauteur et 4 mètres de diamètre, et l'eau qu'ils déversent sert à alimenter des canaux d'irrigation.

C'est par milliers que les agriculteurs de Lombardie ont installé ces *fontanili* qui, pendant toute l'année, fournissent une eau fraîche.

Je ne crois pas devoir insister sur la recherche des eaux artésiennes, car celle-ci constitue sur-

tout l'art du sondeur et ne peut être entreprise qu'au moyen d'outillage spécial; c'est d'ailleurs un travail coûteux et qui ne réussit pas toujours.

Qu'il me suffise de citer le célèbre puits artésien de Grenelle qui, commencé en 1833, ne fut achevé qu'en 1841, après de nombreuses difficultés.

Il s'alimente dans la couche de sables verts du Gault qui affleure aux environs de Troyes, à 160 kilomètres de Paris, et descend jusqu'à 550 mètres de profondeur, au centre de cette vaste cuvette de 300 à 350 kilomètres de diamètre qui forme le bassin parisien.

Les grès verts du Gault sont recouverts successivement par les craies blanches et grises du crétacé, les sables, argiles et calcaires du tertiaire et des alluvions quaternaires.

Les nappes aquifères contenues dans le tertiaire ne donnent que des eaux phréatiques, tandis que celles du crétacé sont artésiennes.

CHAPITRE XII

CONSTRUCTION DES PUIITS, CITERNES ET RÉSERVOIRS

I

PUITS ORDINAIRES

J'ai indiqué quels étaient les points les plus convenables pour y rechercher les eaux phréatiques et établir un puits ; mais ces indications théoriques et d'ordre général sont presque toujours subordonnées aux exigences locales.

Il y a lieu, en effet, d'éviter les endroits où les eaux impures de la surface ont une tendance à s'infiltrer ; on choisira, de préférence, quelque point situé en amont des centres habités. Il convient encore de chercher à atteindre les eaux plus pures d'une deuxième ou troisième zone aquifère.

La situation du puits étant déterminée, il faut procéder à sa construction.

C'est un travail assez facile et dont je vais rapidement exposer la pratique, en laissant de côté, bien entendu, la question plus compliquée du puits artésien.

Au moyen d'un sondage préliminaire, de 20 à 40 millimètres de diamètre par exemple, on calcule d'abord la quantité d'eau que pourra fournir le puits projeté. Dans ce but, on laisse monter l'eau dans le tube de forage jusqu'à ce que le niveau reste stationnaire; on l'épuise ensuite aussi bas que possible et on mesure le volume compris entre les deux niveaux. On laisse alors revenir l'eau et on note le temps qu'elle met à regagner le niveau supérieur. Ces deux notions de temps et de volume donnent le débit.

En effectuant plusieurs sondages, on aura l'avantage de choisir celui d'entre eux qui assurera le meilleur débit.

Ces divers sondages peuvent d'ailleurs être utilisés pour établir un système de puits conjugués, comme je l'ai déjà signalé.

Aujourd'hui, avec la vulgarisation des notions d'hygiène dans les campagnes, on ne doit plus procéder à l'installation d'un puits qu'avec la certitude qu'il se trouve à l'abri des contamina-

tions superficielles ; pour plus de sécurité, il faut l'approfondir jusqu'à la seconde couche aquifère. Dans ce cas, la traversée de la première couche doit être maçonnée et cimentée avec soin, afin d'éviter toute communication entre les deux nappes aquifères.

Les travaux d'établissement de puits varient selon la nature des terrains qu'ils doivent traverser et qu'on peut classer, à ce point de vue spécial, de la manière suivante :

Terrains consistants : *craie, calcaire, grès, granite, etc.* ;
— ébouleux : *argiles et sables* ;
— coulants : *sables fins, terres molles.*

a) TERRAINS CONSISTANTS. — On emploie les procédés ordinaires de fonçage en s'aidant de la poudre ou de la dynamite et forant les trous de mine au foret et à la massette ou au marteau pneumatique à air comprimé.

Dans la plupart des cas, les parois ne demanderont aucun revêtement en maçonnerie de chaux ou ciment, ce qu'il faut, d'ailleurs, éviter le plus possible, car les calcaires, craies, grès et certains granites débitent de l'eau par leurs fentes et fissures.

Pour le travail de mine, on évitera tous acci-

dents en calculant convenablement les charges de poudre ou d'explosif. Et dans ce but, on peut se servir de la formule que j'ai indiquée en 1894, et qui paraît donner satisfaction¹ :

$$P = ERl^2$$

P, charge d'explosif en kilogrammes ;

E, coefficient correspondant à la nature de l'explosif ;

R, coefficient proportionnel à la résistance de la roche ;

l, ligne de moindre résistance en fonction de la profondeur *t* du trou de mine.

Cette ligne *l* varie entre 0,50 *t* et *t*. Elle est mesurée à partir du centre de charge.

TABLEAU DES VALEURS DE E

Gomme extra-forte	à 92 p. 100	0,70
Gomme potasse	83 —	0,80
Gélatine 1 A à la soude	64 —	0,87
Gélatine 1 B à la potasse	57,5 —	0,97
Dynamite n° 1 à la guhr	75 —	1,00
Dynamite n° 3	22 —	1,30
Grisoutine G	30 —	1,57
Grisoutine B	12 —	2,00
Fulmicoton		0,95

¹ Paul-F. Chalon. *Manuel du Mineur*, 4^e édit. Paris, 1909.

Poudres chloratées (cheddite, prométhée, rackarock)	1,10 à 1,30
Poudre de mine noire comprimée.	2,00
— — — granulée.	2,50

TABLEAU DES VALEURS DE R

Roches très dures : <i>quartzite, granite dur.</i>	0,60
— dures : <i>granite, porphyre, gneiss</i>	0,50
— — : <i>schistes durs, calcaire cristallin.</i>	0,40
— moyennement dures : <i>calcaires, schistes.</i>	0,20
— tendres : <i>houille, craie, schiste facile.</i>	0,10
— ébouleuses : <i>alluvions, sables.</i>	0,03

La valeur de P est réduite de 50 à 75 p. 100, lorsqu'on opère sur un front de taille bien dégagé ou sur un bloc partiellement dégagé.

Pour de simples pétards, on prend de 30 à 35 p. 100 de P.

1^{er} EXEMPLE : Tirage à la poudre comprimée dans un grès fissuré.

Diamètre des trous de mine, 0,40 à 0,50 mm.

On prendra :

$$R = 0,30 \quad E = 2 \quad l = 0,66 t$$

Pour $t = 1,50$ m., on trouve $P = 600$ grammes.

— $t = 2,00$ — — — $P = 1.050$ —

— $t = 2,50$ — — — $P = 1.500$ —

Si on opère sur un bloc bien dégagé sur deux

faces, on ne prend que 0,75 de P, et 0,50 seulement s'il y a un plus grand nombre de faces libres.

2^e EXEMPLE : Tirage à la dynamite n° 1,
en granite, dans une galerie.

Diamètre des trous de mine, 0,18 à 0,30 mm

On prendra :

$$R = 0,70 \quad E = 1 \quad l = 0,66 t \quad l = 0,75 t$$

Pour $t = 1,00$ m., on trouve P = 300 gr. 400 gr.

— $t = 1,50$ — — — P = 700 — 840 —

— $t = 2,00$ — — — P = 1.190 — 1.500 —

Ces valeurs de P peuvent être réduites de 20 à 30 p. 100 selon que le bloc est dégagé sur un plus ou moins grand nombre de faces.

En raison des fissures que présentent les roches diaclasiques, les trous de mine perforés dans ces roches rencontrent fréquemment des fentes dont la présence cause, particulièrement avec les *poudres lentes* comme la poudre noire ordinaire, de longs feux, de véritables ratés. Il faudra, dans un cas de ce genre, procéder par petits coups de mine, en bourrant aussi énergiquement que possible avec des tampons d'argile molle.

Si les strates du terrain, au lieu d'être horizontales ou légèrement inclinées, sont verticales, les eaux d'infiltration les traversent très rapidement, de sorte qu'un puits foncé suivant les plans de stratification ne donnerait pas d'eau, à moins d'être poussé à une très grande profondeur.

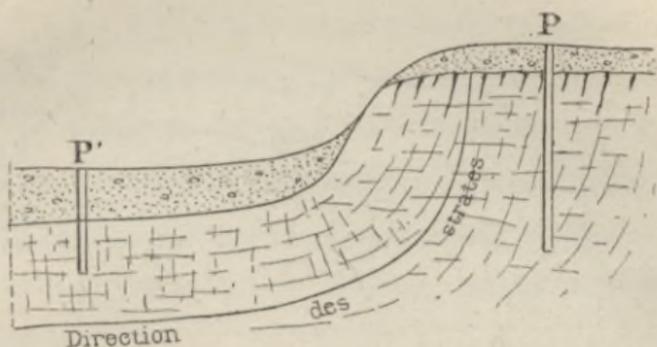


Fig. 73.

Il faut, dans ce cas, chercher dans le voisinage quelque endroit où la stratification soit moins relevée, en P', par exemple (fig. 73). Il est certain qu'un puits placé en P ne donnerait que peu ou point d'eau.

Enfin, il est un cas où l'application des règles ne donne pas de résultat, c'est lorsque la couche perméable superficielle recouvre une roche elle-même perméable et d'une certaine épaisseur. Il peut très bien arriver qu'un forage, descendu jusqu'à 20 ou 25 mètres, passe à côté des fentes.

Or, il est souvent possible d'arriver à provoquer l'écoulement des eaux en agrandissant les fissures et en formant même de nouvelles par un violent ébranlement du terrain.

A proximité d'une exploitation de mine (fig. 74), on avait vainement cherché de l'eau en

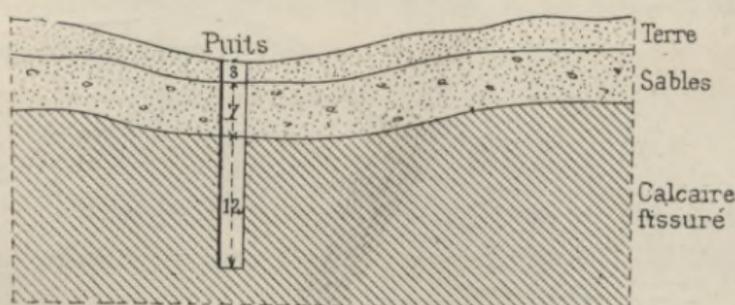


Fig. 74.

creusant un puits de 2 mètres de diamètre qui traversait une couche de terre végétale de 3 mètres, un banc de sables et cailloux de 7 mètres et enfin 12 mètres en calcaire, sans avoir pu constater autre chose que de simples suintements liquides. L'eau était proche, car, au bas du puits, le calcaire était fortement mouillé.

Je conseillai de faire détoner au fond du puits 10 kilogrammes de dynamite. L'effet fut immédiat, et l'ébranlement des parois par une telle explosion produisit un afflux d'eau qui remplit

le puits, sur plusieurs mètres de hauteur, en quelques heures.

C'est ainsi que, dans quelques circonstances, on peut recueillir les suintements d'eau dans certains terrains : calcaires et granites peu fissurés, schistes feuilletés, calcaires durs, grès, gneiss, etc., et transformer une excavation à suintements en puits-citerne.

Le procédé n'est pas nouveau ; il est de pratique courante, depuis longtemps déjà, dans les exploitations pétrolifères de Pensylvanie. Quand un puits à pétrole est épuisé, on fore à sa base quelques trous de mine que l'on charge de dynamite. Il est rare que l'explosion ne provoque pas un nouveau jaillissement de pétrole par les fissures ainsi artificiellement créées dans la roche.

Cette façon de procéder est à recommander dans beaucoup de cas, car elle permet d'éviter le travail toujours coûteux et difficile des puits profonds. On peut s'y prendre de diverses manières : l'une des plus simples consiste à déposer simplement sur le fond du puits une forte charge d'explosif et à y mettre le feu par l'électricité.

On peut encore suspendre des charges à diverses hauteurs, en commençant par le bas, et

les faire successivement exploser jusqu'à ce qu'on ait déterminé des ruptures internes livrant passage à l'eau qui remplit les diaclases de la roche perméable.

Et si l'eau vient à diminuer, on essaiera de provoquer de nouvelles venues par d'autres explosions.

Les charges peuvent être augmentées sans inconvénient à mesure qu'on pénètre en profondeur. L'explosion d'une charge libre de 10 à 15 kilogrammes de dynamite, à partir de 15 mètres de profondeur, ne produira aucun accident à la surface du sol si le puits est creusé de 10 mètres au moins en terrain rocheux, et si la partie supérieure est consolidée par un boisage approprié ou un muraillement en maçonnerie.

Pour de plus grandes profondeurs, 50 ou 60 mètres, on peut faire exploser sans danger des charges de 25 à 40 kilogrammes de dynamite. Toutefois il importe de ne laisser descendre aucun ouvrier avant d'avoir longuement ventilé le fond du puits, car les dynamites fournissent de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone en même temps que des gaz nitrés qui n'éteignent pas la lumière d'une chandelle et sont néanmoins dangereux à respirer.

b) **TERRAINS ÉBOULEUX.** — Lorsque le sol est ébouleux, on fore le puits au pic et à la pelle, mais il faut garnir les parois avec des boisages pour éviter des éboulements pendant le cours des travaux.

Au point de vue de l'exécution d'une semblable fouille et de la rapidité avec laquelle on doit effectuer le boisage, on peut consulter le tableau suivant qui indique la hauteur-limite à laquelle un terrain découpé verticalement peut se tenir en équilibre instable.

Sable sec et gravier, hauteur maxima.	0,35 m.
Sable mouillé,	— . 0,60 à 1,00 m.
Sol argileux bien drainé,	— . 1,50 à 3,00 —
Argile bien drainée,	— . 2,50 à 3,75 —
Sol compact graveleux,	— . 3,00 à 4,00 —

Au delà de ces hauteurs, le terrain ne peut pas se tenir verticalement, même pendant un temps très court.

Bien entendu, ces chiffres n'ont rien d'absolu et ne sont donnés qu'à titre de renseignement. Il est d'ailleurs facile de les préciser pour chacun des cas particuliers qui se présentent.

Pour faire le boisage, on dispose de distance en distance des *rouets* ou cadres polygonaux, solidement et invariablement assemblés, et qu'on

relie par des pièces verticales ou *chandelles*. La distance qui sépare les rouets et les chandelles dépend du plus ou moins de consistance du terrain.

Si les suintements d'eau ne se produisent qu'à la base du puits, on pourra se contenter du boitage de soutènement pour garnir les parois. Mais s'ils se manifestent sur toute la hauteur du puits, il sera nécessaire d'établir un boitage plus complet et même, dans quelques cas, un muraillement de briques ou de moellons.

Celui-ci se construit par fragments superposés ou *couronnes* dont la hauteur varie, de 1 à 3 ou 4 mètres, selon que le terrain se prête plus ou moins à leur descente. On établit d'abord un solide rouet en chêne qu'on pose dans la fouille, à 1 ou 2 mètres au-dessous du sol, en ayant soin de l'encastrier, aussi solidement que possible, par ses extrémités saillantes. On reprend ensuite par dessous une nouvelle couronne placée elle-même sur un rouet, et on la raccorde avec la première après avoir enlevé le rouet de séparation ; et ainsi de suite.

Afin d'éviter des ruptures ou des cassures dans les parois du puits, il est bon de ménager de distance en distance des sarbacanes pour

écouler les eaux qui s'amoncelleraient entre le terrain et la maçonnerie et produiraient des poussées considérables. Ces cavités, convenablement disposées, procurent un moyen de descente facile et rapide.

Il faut éviter d'employer des matériaux per-

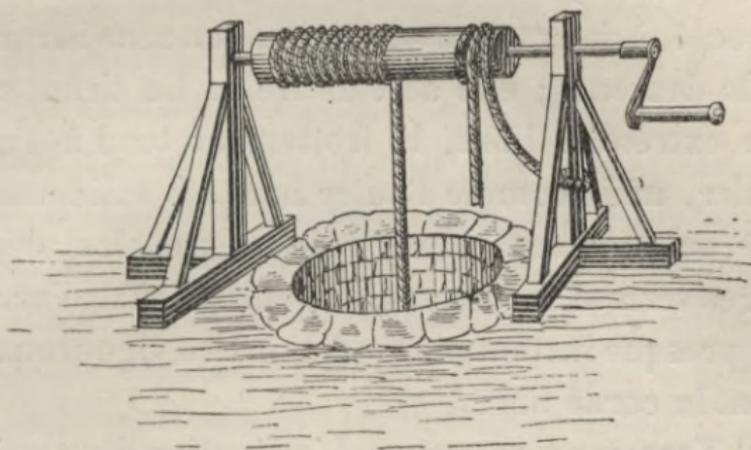


Fig. 75. — Treuil de puisatier.

méables ou susceptibles de subir les effets érosifs de l'eau ; à ce point de vue, on proscriera les moellons en pierre à plâtre, les briques tendres ou mal cuites, les schistes argileux ou gypseux, les pierres gélives et celles qui se délitent, etc. D'ailleurs, un maçon quelque peu expérimenté renseignera exactement sur la qualité des matériaux du pays ; toutefois il est prudent, quand le

travail doit être exécuté à forfait, de prévoir la responsabilité de l'entrepreneur.

Les opérations d'approfondissement et de déblaiement sont facilitées par l'emploi du treuil de puisatier (fig. 75) qui comporte la particularité suivante :

Une corde, fixée sur l'un des montants, est enroulée à deux tours sur le treuil en sens inverse de la descente ; elle sert de frein. En tirant sur son extrémité libre, le frottement tend à l'enrouler, mais comme l'autre bout est solidement fixé au montant, il en résulte que les deux spires serrent fortement le treuil. L'effet d'arrêt est presque instantané lorsqu'on tire vigoureusement la corde libre.

c) TERRAINS COULANTS. — L'exécution d'un puits en terrain coulant demande de grandes précautions. Comme dans le cas précédent, il faut boiser ; mais alors les cadres doivent être très rapprochés et complètement garnis contre le terrain pour retenir les sables ou les terres.

Ce garnissage se fait au moyen de *palplanches* ou planches jointives.

Mais le plus sûr et le plus prudent est de maçonner immédiatement.

Dans ce but, on fait une première excavation

de 1 à 2 mètres de profondeur, dont le fond a le diamètre que l'on veut donner au cuvelage.

On installe d'abord un solide rouet, ne présentant aucune saillie, et sur lequel on monte la maçonnerie jusqu'à 1 mètre environ au-dessus du sol. Quand ce travail est fait, un ou deux ouvriers, autant que le permet la section du puits, piquent le sable avec des pioches sous le rouet. Celui-ci descend d'une certaine hauteur, entraînant avec lui la couronne maçonnée que l'on recharge d'autant à la partie supérieure. Avec un peu de soin, on réussit à obtenir une descente régulière et suffisamment horizontale ; de cette manière on arrive, peu à peu, à garnir le puits sur toute la profondeur voulue.

Comme dans le cas précédent, il faut ménager, dans les parois maçonnées, des sarbacanes pour écouler les eaux qui les compriment sur leur parement extérieur. Mais si les sables sont trop fluents, il faut garnir ces ouvertures de plaques poreuses ou de tampons en toile d'amiante, afin d'éviter l'entraînement, avec les eaux filtrées, de sables qui viendraient à la longue combler le puits.

Malgré toutes ces précautions, les sables, particulièrement lorsqu'ils sont très fins, finissent

par remplir le puits, et il est nécessaire de procéder à de fréquents curages.

Pour remédier à ces inconvénients, M. Ed. Lippmann a imaginé le *cuvelage filtrant*, dont la première application a été faite, en 1888, à Rambouillet.

La région qui entoure la ville est formée d'un banc d'argile recouvrant une couche de sables siliceux très fins qui reposent eux-mêmes sur la marne.

Le plus simple, *a priori*, dans un semblable cas, et conformément aux règles et principes que je viens d'exposer, était d'aller chercher l'eau dans la craie perméable ; et, pour y arriver, de forer un puits maçonné, à travers les sables coulants, en le faisant pénétrer le plus avant possible dans la roche perméable sous-jacente.

Mais ce procédé usuel présentait, en l'espèce, les plus sérieux inconvénients. Il aurait fallu, d'abord, creuser un puits parfaitement étanche dans la traversée sablonneuse, et le pousser jusqu'à 50 ou 60 mètres de profondeur ; d'autre part, les eaux puisées dans la craie sont calcaires et par suite eussent pu être impropres aux usages domestiques.

M. Lippmann a résolu le problème en murail-

lant un puits jusqu'aux sables et descendant, à partir de là, dans la nappe aquifère sableuse, un forage à plaques poreuses filtrantes¹. Celui-ci constitue un petit cuvelage de 0,40 m. de diamètre sur 3,50 m. de hauteur. La base du cuvelage est à 12 mètres seulement de profondeur, et l'eau monte jusqu'à 5 mètres du sol.

Toutefois, le procédé est coûteux, et l'on préfère actuellement créer un cuvelage imperméable en ciment, en injectant à l'aide de l'air comprimé un lait de ciment.

ENTRETIEN DES PUIITS

Telles sont les règles générales qui peuvent servir de guide pour la construction des puits ordinaires. Ces règles sont utiles à connaître, car l'inexpérience des puisatiers et des hommes que l'on occupe à ces travaux est une cause de fréquents accidents qu'il faut toujours prévoir et surtout s'efforcer de prévenir.

Mais, quelle que soit la méthode employée pour l'établissement d'un puits, il convient toujours de recouvrir sa margelle d'un couvercle

¹ *Cuvelage filtrant les eaux troubles et impures*, par M. de Nansouty. *Génie Civil*, t. XIII, p. 390.

en bois, pour éviter l'introduction de poussières organiques, de feuilles mortes et autres souillures qui amènent à la longue la corruption de l'eau.

L'emploi de chaînes et seaux, cause constante de contamination, disparaît peu à peu. On surmonte le puits d'une pompe simple, robuste et facile à manœuvrer; qu'elle soit à levier, à manivelle ou même à main.

Mais il faut prévoir un démontage aisé de la pompe, afin d'effectuer de temps à autre le curage du puits.

Si l'eau est trouble, cas assez fréquent, il faut la filtrer avant d'en faire usage; mais si elle est mauvaise, ou même simplement suspecte, on ne doit pas la boire avant de l'avoir fait bouillir, car elle occasionnerait des fièvres, l'anémie, le rachitisme, la goutte, quelque maladie des os, etc.

Dans les cas ordinaires et aux époques de grande chaleur, il est de bonne précaution de jeter dans le puits un seau de braise de boulanger, en gros morceaux soigneusement dépoussiérés, ou encore un litre de dissolution faible de permanganate de potassium.

J'aurai d'ailleurs l'occasion de revenir plus longuement sur cette question des eaux potables.

Quoiqu'ils soient très nombreux en France, particulièrement dans les campagnes, l'hygiène moderne, si exigeante, s'accommode mal des puits ; partout on tend à les remplacer par le *puits instantané Norton* qui va recueillir l'eau, jusqu'à 9 mètres de profondeur, à l'abri des souillures de la surface.

SAUVETAGES EN CAS D'ÉBOULEMENT OU D'ASPHYXIE DANS UN PUIT

En dépit de toutes les précautions, il arrive que des éboulements dangereux se produisent ou que des gaz nocifs asphyxient des ouvriers puisatiers.

Lorsqu'on doit effectuer un sauvetage, après éboulement, on cherche immédiatement à établir une communication de fortune, pour procurer aux ensevelis de l'air frais et des aliments. Dans ce but, on pousse un forage, sous un angle convergent, avec une tarière creuse que l'on manœuvre avec précaution ; dès que l'on arrive à se faire entendre des ouvriers, on se laisse guider par eux pour l'avancement et la direction de l'outil.

En même temps, on creuse un nouveau puits

aussi rapproché que possible de l'ancien. Afin d'arriver vite, car c'est essentiel, il faut employer de bons outils de sondeur, boiser et même coffrer rapidement si c'est nécessaire au fur et à mesure de l'avancement; puis, à la profondeur voulue, creuser une petite galerie, ou un simple boyau, vers les hommes à dégager.

La dernière partie du sauvetage est délicate et il ne faut avancer qu'avec les plus minutieuses précautions afin d'éviter tout déplacement brusque des éboulis.

S'il s'agit d'explorer un puits abandonné, ou mal entretenu, il faut prévoir les asphyxies. On commence par descendre à la corde une chandelle allumée; si elle s'éteint, c'est que l'atmosphère du puits est pleine d'acide carbonique, gaz irrespirable. Mais il est d'autres gaz, également irrespirables, qui ne produisent pas cet effet d'extinction; on reconnaît leur présence en descendant une cage contenant un oiseau ou un lapin qui, dans un cas dangereux, est promptement asphyxié. Dès que l'on a constaté le danger, on jette vivement dans le puits plusieurs seaux d'eau tenant en dissolution de la potasse ou de la chaux afin de dissoudre l'acide carbonique et déplacer les gaz méphitiques.

Le mieux est de jeter au fond du puits quelques morceaux d'oxylithe (bioxyde de sodium Na^2O^2), sorte de pierre blanche que l'on trouve dans le commerce et qui, au contact de l'eau, se décompose en donnant de l'oxygène respirable et de la soude capable d'absorber l'acide carbonique.

En dernier ressort, l'homme qui descend dans un puits suspect doit, toutes les fois que la chose est possible, se munir d'un bidon d'oxygène pur.

Voici, à titre de renseignement, les premiers secours à donner à un asphyxié. Le coucher à l'ombre, en plein air, en lui tenant la tête un peu haute, déboutonner ses vêtements, provoquer la respiration par de légères pressions à la main sur le bas de la poitrine et par des mouvements rythmés de la langue ; lui faire respirer de l'ammoniaque, lui jeter de l'eau fraîche au visage, l'envelopper dans une couverture de laine et lui faire de légères frictions aux tempes avec un linge imbibé de vinaigre.

II

MARES, ÉTANGS

BARRAGES DE RUISSELLEMENT

Dans les pays où les eaux phréatiques ne circulent qu'à une profondeur relativement grande et, par suite, ne peuvent être captées économiquement par un puits ordinaire, on recueille les eaux pluviales dans une dépression naturelle ou un bassin quelconque ; on forme ainsi des mares, des étangs.

Mais ces eaux ne sont utilisables que pour l'irrigation, car elles se corrompent assez vite à l'air, comme toutes les eaux stagnantes.

Toutefois si la dépression est établie sur une émergence de source, l'eau est partiellement renouvelée et l'étang peut servir aux animaux.

Les eaux de ruissellement sont dans le même cas ; on utilise les pentes dénudées pour établir des bassins de retenue au moyen de barrages en cascade. Ces barrages se construisent en maçonnerie ou en pisé, selon leur importance, et l'on détermine leur épaisseur au moyen de la formule indiquée plus loin pour les réservoirs.

On les utilise pour une foule d'usages, soit qu'ils servent comme réservoirs de retenue ou comme bassins de réserve pour les besoins en eau potable pendant la saison sèche, soit encore qu'ils constituent des barrages de submersion pour la culture.

III

CITERNES

Quand les eaux sont destinées à la boisson, on les conserve dans des citernes ou réservoirs.

Le meilleur type de citerne est la citerne voûtée ou à simple toiture, avec des parois maçonnées et un trop-plein d'écoulement.

Pour empêcher l'eau de devenir malodorante ou croupissante, on rejette au dehors les premières eaux de pluie et l'on maintient la citerne dans une obscurité complète tout en assurant une ventilation suffisante. Il est indispensable de procéder de temps à autre à un curage complet.

Une citerne doit être construite de façon à contenir la provision de quatre mois au moins ; il faut donc calculer la surface de toiture nécessaire en se basant sur la moyenne annuelle des pluies locales, constatée au pluviomètre.

La toiture se fait en ardoises, laves, carton goudronné ou ciment armé.

Les parois sont en pierres, briques ou ciment armé. Elles doivent être bien étanches, enduites au mortier de ciment de Portland et recouvertes d'un badigeonnage au goudron. On leur donne une section trapézoïdale, la paroi mouillée restant verticale. Si la hauteur des murs est désignée par h , leur épaisseur e sera :

$$\text{à la base : } e = \frac{2}{3} h$$

$$\text{au sommet : } e' = \frac{1}{3} h.$$

La pression de l'eau p s'applique normalement au tiers de la hauteur à partir de la base et a pour valeur en kilogrammes :

$$p = 1.000 \frac{h^2}{2} .$$

On creuse la citerne à 4 ou 5 mètres de profondeur dans le sol, et la partie supérieure est recouverte d'une bonne couche de terre; on la munit d'un tuyau de ventilation de 0,10 à 0,15 de diamètre.

Le rejet des premières eaux de pluie se fait au moyen d'un tuyau de déversement à robinet et genouillère. On déplace la genouillère au début

de la pluie et on ouvre le robinet ; puis, lorsqu'on estime que le lavage des toits est complet, on ramène le conduit à la citerne.

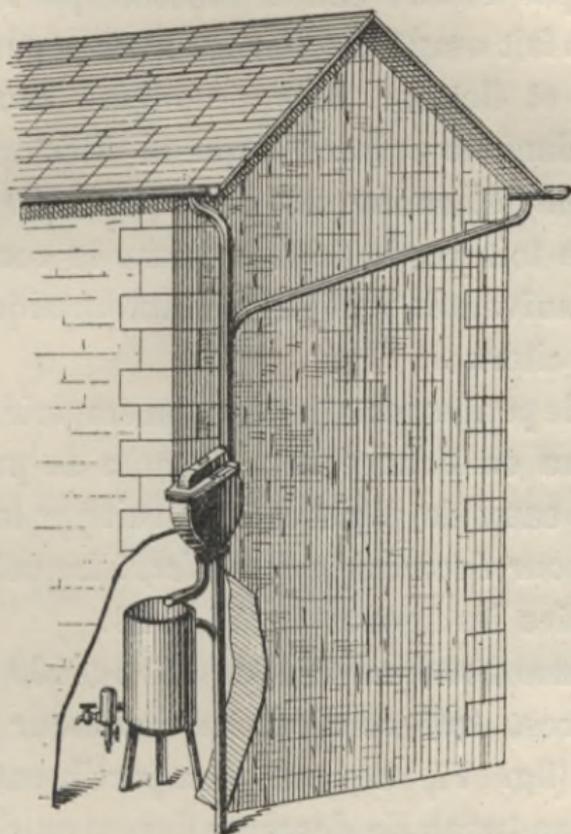


Fig. 76. — Purificateur des eaux de pluie.

Mais il est préférable de confier le travail de séparation à un appareil automatique à bascule ou à flotteur et levier. Tels sont les **séparateurs Fauconnier**, ou les appareils anglais connus sous

les noms de **Buck's percolator** et **Robert's rain-water percolator**.

Ainsi, à l'île de Bréhat (Côtes-du-Nord), où l'on n'a pas d'autre eau de boisson que l'eau de pluie, on fait usage de citernes avec séparateurs à levier et flotteur. Les premières eaux sont rejetées dans un puisard et quand elles occupent un volume déterminé, 250 litres pour 500 mètres carrés de toiture, le flotteur ferme le conduit et les eaux suivantes sont dirigées automatiquement dans les citernes.

Pour de petites installations, on emploie l'appareil connu en France sous le nom de **purificateur des eaux de pluie** et construit par la *Compagnie pour l'éclairage des villes*, à laquelle sont empruntées les figures 76, 77 et 78.

C'est une boîte en tôle de $570 \times 130 \times 365$ millimètres, qui contient un tambour basculeur T (fig. 77) à deux compartiments. On l'adapte au tuyau de descente des eaux de pluie et il peut communiquer soit avec l'égout S, soit avec un réservoir S'.

Les premières eaux vont directement à l'égout, mais en en laissant passer, par la grille G, de petites quantités qui s'amoncellent dans le tambour mobile et finissent par le faire basculer

(fig. 78); à partir de ce moment, toute l'eau pluviale est dirigée dans le réservoir par le tuyau S'.

Quand la pluie cesse, le basculeur reprend sa position primitive pour se remettre en mouvement à la première averse.

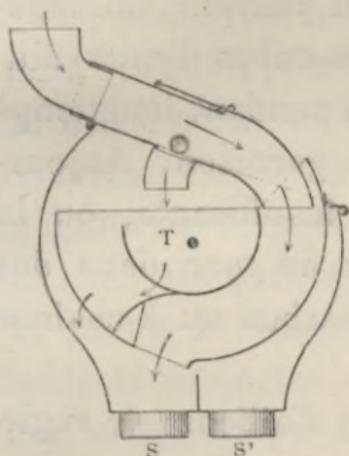


Fig. 77.

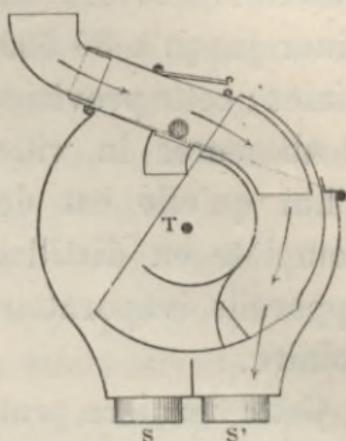


Fig. 78.

Ces appareils séparateurs rendent de bons services; mais ils doivent être parfaitement entretenus afin d'être toujours prêts à fonctionner.

On puise l'eau des citernes à la pompe. Quelquefois on ménage, en leur partie centrale, un puits poreux qui agit comme un filtre et fournit une eau potable.

Les eaux de citernes sont bonnes quand leur construction est soignée et qu'on maintient les toits en état de propreté.

Elles constituent, en beaucoup de pays, l'unique ressource des habitants. Dans leur colonie d'Aden, où les pluies donnent à peine 8 ou 10 millimètres d'eau par an, les Anglais ont construit, sur un grand versant dénudé, de vastes réservoirs étagés qui peuvent emmagasiner jusqu'à 80.000 mètres cubes d'eaux pluviales ; cette provision a suffi pendant longtemps à alimenter la ville et la garnison. Aujourd'hui qu'elle est devenue insuffisante, on la complète en distillant l'eau de mer dans des appareils évaporatoires à charbon ou à chaleur solaire.

Cette dernière pratique est d'ailleurs de règle sur la côte égyptienne de la mer Rouge, et en particulier, à Hodeidah et à Kosseir où la pluie est pour ainsi dire inconnue.

IV

RÉSERVOIRS

Le réservoir a principalement pour but de recueillir en un point élevé, à l'intérieur ou à l'extérieur des habitations, l'eau qui lui est envoyée d'un puits, d'une citerne ou d'une rivière,

au moyen d'une pompe ou d'un béliet hydraulique.

Il permet de constituer une grande provision d'eau que l'on distribue sous pression et au robinet pour les divers services de l'habitation, de la ferme ou de l'usine.

Les petits réservoirs se font en tôle galvanisée ; mais dès qu'ils prennent une certaine importance, on les construit en tôle de fer qu'on enduit intérieurement d'une couche d'huile de lin bouillante et d'une ou deux couches de peinture au blanc de zinc. On peut également les recouvrir d'un fin enduit de ciment qu'on applique au pinceau, en trois ou quatre couches successives, et que l'on consolide par un recouvrement de goudron ou de peinture à l'huile sans céruse.

DIMENSIONS DE RÉSERVOIRS EN TOLE

CONTENANCE en litres.	RÉSERVOIRS CYLINDRIQUES			RÉSERVOIRS RECTANGULAIRES			
	Dia- mètre.	Hauteur.	Poids en kg.	Lon- gueur.	Largeur.	Hauteur.	Poids en kg.
100	0,470	0,650	33	0,500	0,350	0,650	38
500	0,800	1,000	110	0,800	0,650	1,000	128
1.000	1,020	1,200	165	1,000	1,000	1,000	180
1.500	1,230	1,300	220	1,500	1,000	1,000	250
2.000	1,120	2,000	300	2,000	1,000	1,000	330
3.000	1,750	2,100	600	2,500	2,000	1,000	670
10.000	2,350	2,300	1.060	3,860	2,000	1,300	1.200

Le tableau ci-dessus donne des renseignements sur les dimensions qu'il convient de donner aux réservoirs d'eau selon leur contenance et leur forme.

En principe, le plomb doit être exclu autant que possible de tout contact avec les eaux de consommation, cependant il n'y a pas d'inconvénient à l'utiliser pour les conduites, lorsque la circulation est continue ou, tout au moins, ne subit jamais de longs arrêts, ou encore lorsque l'eau est très chargée de sels calcaires.

L'eau des réservoirs destinée à la boisson doit être filtrée; mais, si elle provient d'une source suspecte, cette précaution ne suffit pas et il ne faut pas hésiter à la faire bouillir, malgré les nombreux inconvénients que présente cette opération. Cette question sera d'ailleurs traitée lorsque je parlerai des eaux potables et de la stérilisation des eaux de boisson.

CHAPITRE XIII

EAUX MINÉRALES ET THERMO-MINÉRALES

I

ORIGINE DES EAUX MINÉRALES ET THERMO-MINÉRALES

Les sources qui émergent du sous-sol présentent des caractères extrêmement variés. Elles peuvent être presque pures ou très impures, froides ou chaudes, potables ou insalubres, peu minéralisées ou chargées de sels, médicamenteuses ou nocives, etc.

Les unes sont acides ou alcalines, d'autres sont neutres, et presque toutes possèdent des propriétés radioactives plus ou moins accentuées.

Les eaux chaudes ou **thermales** sont le plus minéralisées, c'est pourquoi on les désigne sous le nom de **thermo-minérales** ; on les utilise comme agents médicamenteux.

Leur échauffement, à l'émergence, est parfois considérable et les eaux bouillantes ne sont pas rares. On en trouve en Italie, en Asie Mineure, au Japon, aux États-Unis, au Mexique, au Venezuela, etc.

Voici quelques-unes des sources réputées les plus chaudes :

Grand Geyser d'Islande.	127° C.
Etuves de Lipari.	100 —
Soffioni de Monte-Cerboli (Toscane)	100 —
Hammam-Meskoutine (Algérie)	95 —
Pouzzoles (Etuves de Néron).	86 —
Pantellaria	75 —
Carlsbad.	74 —

En France, les principales sources chaudes sont celles de :

Chaudes-Aigues (s. du Parc).	81° C.
Ax-les-Thermes.	77 —
Plombières (Robinet romain)	71 —
Bourbonne-les-Bains	68 —
Bagnères-de-Luchon	66 —
Dax (Fontaine Chaude).	61 —
Bourbon-Lancy	56 —
La Bourboule	52 —
Lamalou (s. Chaude).	46 —
Vichy (Puits Carré).	44 —

L'échauffement des eaux dépend de la profon-

deur du gisement d'où elles tirent leur origine. On sait, en effet, que les eaux météoriques s'échauffent peu à peu en pénétrant dans le sein de la terre.

Quoiqu'on ne connaisse pas exactement la loi de variation des températures dans l'intérieur du globe, on admet généralement que pour des profondeurs inférieures à 4 ou 5 kilomètres, le thermomètre monte d'un degré tous les 30 à 35 mètres. C'est ce qui résulte d'observations recueillies jusqu'à 200 mètres de profondeur¹, et l'on dit que le *degré géothermique* est de 33°C.

Dans cet ordre d'idées, une eau qui circule à 1.000 mètres de profondeur aurait une température de 30°, ou plus exactement de 42°, car il faut tenir compte de la température moyenne superficielle qui est de 12°. A 2.000 mètres, elle accuserait 72° C.

Toutefois cette règle usuelle, utile pour certaines évaluations, est loin d'être une loi. Il semble qu'on puisse en faire état sans grand risque d'erreur jusqu'à 4.000 ou 5.000 mètres ; mais, plus loin, son application conduirait à ces

¹ Les sondages les plus profonds sont ceux de Sperenberg en Allemagne et les forages récents effectués en Californie pour la recherche du pétrole. Ils atteignent à peine 2.000 mètres.

chiffres énormes dont se prévalaient les anciens théoriciens du *feu central*.

Il faut donc se garder de la généraliser, pas plus d'ailleurs que la loi des pressions internes dont l'exagération a conduit quelques géologues à affirmer l'impossibilité de l'existence d'eau liquide aux grandes profondeurs.

J'ai, pour ma part, émis l'opinion¹ que, dans des circonstances favorables, les eaux météoriques peuvent pénétrer à de grandes profondeurs en s'insinuant par gravité dans les couches voisines du sol, plus bas par capillarité et enfin par affinité chimique dans les roches chaudes.

On sait, par des expériences souvent répétées, que les roches silicatées se ramollissent vers 300° C. quand elles se trouvent en présence d'eau surchauffée; or, si l'on applique la règle précédemment énoncée, cette température correspondrait à une profondeur voisine de 10 kilomètres. Les roches commenceraient donc à se ramollir à une dizaine de kilomètres du sol, sous l'influence de l'eau qui n'a pas encore atteint sa température critique.

Or si les eaux descendantes réussissent à péné-

¹ Paul F. Chalon. *Sur la genèse des gisements métallifères et des roches éruptives*. Congrès de Liège, 1905.

trer jusqu'au magma pâteux sous-jacent, origine des roches éruptives, elles doivent être arrêtées dans leur descente par cette *pastosité*¹ même.

Mais alors elles agissent par affinité chimique et provoquent la formation de roches nouvelles par hydratation et dissolution.

« Si l'eau, dit Arrhénus², parvient à des couches dont la température est de 365° C. — qui est sa *température critique* — elle ne peut plus exister à l'état liquide. Quoique transformée en vapeur, elle continue quand même à pénétrer plus avant en profondeur si elle trouve un chemin. Quand elle aura atteint la masse ignée (*pâteuse*), elle sera absorbée par celle-ci avec une grande énergie. La raison en est qu'à partir de 300° C., l'eau devient un acide plus puissant que l'acide silicique lui-même. »

Les roches résultant de l'attaque par l'eau du magma pâteux se gonflent et provoquent ainsi, dans les roches solides superposées, des ruptures d'équilibre, des poussées en tous sens, qui se tra-

¹ J'emploie à dessein ce mot qui est plus expressif que ramollissement.

² Syante Arrhénus. *L'évolution des Mondes*, traduction Seyrig, p. 49. Paris, 1910.

duisent par des soulèvements, des dislocations et des projections superficielles. Puis, à travers les fentes et cassures s'échappent des gaz et des vapeurs, particulièrement des vapeurs d'eau qui se condensent et montent en eaux chaudes. Ces roches nouvellement formées se solidifient par refroidissement et se laissent à leur tour pénétrer par les eaux d'origine météorique qui reviennent ainsi constamment à l'attaque du magma pâteux sous-jacent.

Cette attaque lente et continue du magma pâteux interne le transforme peu à peu en roches qui accroissent d'une façon continue l'épaisseur de la croûte solide du globe et produit, d'autre part, une émission constante de gaz et d'eaux chaudes.

Telle est probablement l'origine, ou du moins l'une des origines des eaux thermo-minérales.

Ce n'est pas la seule, en effet, car l'observation signale nettement deux catégories d'eaux : les unes à *débit variable*, les autres à *débit régulier*.

Les premières sont, en tous points, assimilables aux sources ordinaires et sont, comme elles, influencées par les conditions climatériques superficielles ; elles doivent donc avoir également

une origine météorique et leur échauffement s'explique par un long séjour en profondeur ; ce sont des sources issues d'un gisement aquifère qui circule, dans les roches perméables, au-dessus d'un niveau imperméable.

Quant aux autres, elles ont une origine éruptive, comme je viens de l'indiquer ; c'est pour quoi leur régime n'est pas influencé par les incidents météorologiques. Leur débit pourrait peut-être présenter une certaine constance s'il n'était influencé à la longue par diverses circonstances telles que l'engorgement des issues d'écoulement à la suite d'incrustations et dépôts de sels, par certaines modifications que les actions dynamiques de la croûte terrestre apportent au volume des griffons aquifères, à l'émission des gaz et à la force ascensionnelle des eaux, etc.

Ces eaux, d'origine très profonde, sont désignées par les qualificatifs de **nouvelles** ou **juvéniles** (*Juvenile quellen* des Allemands). Elles circulent en *griffons* dans les roches éruptives, ou s'épanchent par des failles et autres cassures dans les strates sédimentaires qui affleurent au jour.

D'après certains auteurs (Brun, Stutzer, Suess, etc.), les eaux nouvelles seraient formées

par des combinaisons de gaz hydrogène d'origine interne, et d'oxygène résultant de la décomposition des oxydes métalliques des roches.

Or la présence de l'eau dans toutes les roches est indéniable. Elle a été reconnue par M. Armand Gautier¹ dont les expériences ont prouvé qu'outre leur eau de carrière, les roches éruptives renferment une eau constitutionnelle. Il est parvenu à éliminer celle-ci, en opérant dans le vide à une température de 400 à 450° C., après avoir chassé l'eau de carrière vers 150° C.

Le tableau suivant indique quelques-uns des résultats obtenus en opérant sur un kilogramme de roche pulvérisée.

NATURE DES ROCHES .	PERTE D'EAU DANS LE VIDE	
	Eau de carrière entre 150 et 200°C.	Eau de constitution entre 200° et le rouge.
Granite de Vire ou de Normandie	2,29 gr.	7,35 gr.
Porphyre de l'Esterel.	5,80 —	12,40 —
Ophite de Villefranche	»	15,06 —
Lherzolite de Lherz	»	16,80 —

¹ A. Gautier. La genèse des eaux thermales et ses rapports avec le volcanisme. *Annales des Mines*. Paris, 1906.

A. Gautier. Origine des eaux thermales et de leur minéralisation. *Revue scientifique*, 2 et 9 novembre 1907.

Le granite a fourni en outre près de 2.700 centimètres cubes de gaz divers : hydrogène, acide carbonique, oxyde de carbone, azote, acide sulfhydrique, gaz ammoniac, gaz rares, hydrocarbures, etc.

En partant de ces données expérimentales, M. A. Gautier calcule qu'à la température du rouge un kilomètre cube de granite de Vire pourrait émettre 26 millions de mètres cubes d'eau constitutionnelle et 7 milliards de mètres cubes de gaz ramenés à la température de 45° C.

Mais cette déduction théorique est superflue, car il est bien certain qu'en aucune circonstance, une aussi colossale émission de vapeurs n'est possible, puisque la roche vit avec son eau de constitution.

Il semble donc bien établi que les eaux dites *nouvelles* ou *juvéniles* sont émises par les roches profondes. Elles se chargent ensuite d'éléments minéraux et radioactifs et acquièrent ainsi cette double activité physiologique et thérapeutique qui les caractérise. Leur gisement en griffons présente une grande analogie avec les filons métallifères et diffère essentiellement de celui qui caractérise les eaux d'origine météorique,

lequel est quelque peu analogue aux gisements métallifères en couches dits *interstratifiés*.

Il existe bien une troisième catégorie d'eaux thermales, les **eaux chaudes volcaniques**, mais celles-ci ont une origine très différente.

Les laves rejetées par les volcans procèdent du magma pâteux et s'écoulent au sol avec une température comprise entre 1.000 et 1.200°C. Mais en traversant les couches rocheuses de l'écorce terrestre, elles provoquent l'émission de leurs eaux d'hydratation et de constitution, et les vapeurs entraînées se condensent en eaux chaudes qui finissent par trouver un écoulement au dehors.

Ce ne sont donc pas des *eaux nouvelles*, pas plus d'ailleurs que des eaux d'infiltration de la mer comme l'ont admis Daubrée, Arrhénius et quelques autres géologues.

II

COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS DES EAUX THERMO-MINÉRALES

En principe, toutes les eaux souterraines contiennent des matières minérales en dissolution.

Ce sont des carbonates, sulfates, chlorures ou oxydes de calcium, aluminium, potassium, sodium, magnésium, etc., ou des gaz comme l'acide sulfhydrique, ainsi que les gaz rares et le méthane.

Il arrive quelquefois que la proportion de ces éléments étrangers est considérable. Ainsi, l'eau saline de Kochbrunnen, à Wiesbaden, contient jusqu'à 18 corps différents : chlore, brome, iode, acides sulfurique, carbonique et borique, oxydes de silicium, de plomb, d'arsenic, de sodium, de potassium, de lithium, de calcium, de strontium, de baryum, de magnésium, de fer et de manganèse.

Il est bien évident que la composition d'une eau minéralisée doit varier avec la nature des terrains qu'elle a traversés avant d'arriver au jour. C'est ainsi qu'elle empruntera aux roches sédimentaires des éléments calcaire, magnésien, gypseux, ferrugineux, etc., tandis que des terrains éruptifs surgiront des eaux chaudes, des sources gazeuses, sulfureuses, acides, etc.

D'autre part, la proportion des éléments dissous dans l'eau dépend de leur coefficient de solubilité et celle-ci varie beaucoup, comme je vais le montrer.

Pour les gaz, par exemple, 100 litres d'eau pure peuvent dissoudre :

100	litres d'acide carbonique ;
2,9	— d'oxygène ;
2,4	— d'oxyde de carbone ;
1,9	— d'hydrogène ;
1,8	— d'air ;
1,5	— d'azote.

L'azote est le plus souvent accompagné de gaz rares inertes, comprenant la série des gaz lourds : *argon*, *krypton* et *xénon*, et celle des gaz légers : *hélium* et *néon* ; on le trouve en abondance dans les eaux thermales de Cauterets, Luchon, Plombières, Aix-la-Chapelle, Gastein, etc.

Le bicarbonate de calcium est soluble en toutes proportions dans l'eau pure, mais il est précipité, vers 75° C., par la mise en liberté partielle de son acide carbonique. L'eau du Puy de la Poix, en Auvergne, en contient près de 3 grammes par litres.

Le carbonate de calcium n'est soluble que dans la proportion de 1 à 2 p. dans 100.000 p. d'eau pure, à la température de 15° C., et à la pression de 760 millimètres (Schlœsing) ; il est éliminé quand l'eau est chauffée entre 100 et 150° C.

C'est un des éléments minéraux le plus commun dans les eaux souterraines.

Le carbonate de magnésium est dans les mêmes conditions; 100.000 p. d'eau en dissolvent 3 à 4 p. Il est précipité à 150° C.

Le carbonate de fer se dissout surtout à la faveur de l'acide carbonique qui le transforme en *bicarbonate soluble*; c'est pourquoi les eaux bicarbonatées renferment presque toujours du fer. Au contact de l'air, l'eau perd son acide carbonique et précipite un oxyde hydraté de fer.

Certaines eaux qui contiennent du carbonate de fer en dissolution deviennent aimantées et peuvent communiquer l'aimantation à des morceaux d'acier. On connaît plusieurs sources minérales (Fort Wayne, Lebanon, etc., aux États-Unis) qui jouissent de cette singulière propriété. Mais celle-ci disparaît quand l'acide carbonique de l'eau est expulsé, et le précipité présente les caractères d'un oxyde de fer magnétique.

La solubilité du sulfate de calcium varie avec la température. Elle est de :

2	grammes	par	litre	à	0° C.
2,40	—	—	—	20	—
2,54	—	—	—	30	—

Elle augmente quand l'eau contient d'autres

sels en dissolution et, plus particulièrement, des chlorures.

En présence des matières organiques, le sulfate dissous est décomposé ; il se forme du sulfure de calcium avec dégagement d'hydrogène sulfuré.

Le sulfate de magnésie ou sel d'Epsom est soluble dans la proportion de 3 p. pour 10 p. d'eau à la température ordinaire ; la solubilité augmente avec la température.

On trouve également des sulfates d'aluminium, de fer, de manganèse, de sodium, de potassium, etc.

Les chlorures de calcium, magnésium, sodium et potassium sont très solubles et assez fréquents ; les chlorures de baryum, de lithium sont plus rares.

Les nitrates sont également très solubles.

La silice et les silicates sont presque insolubles dans l'eau froide. Dans les eaux très chaudes, la silice se dissout en petites quantités sous forme de silice hydratée. Les sources de Royat, la Bourboule, Chatelguyon, Saint-Nectaire, en renferment de 10 à 13 centigrammes par litre.

Les eaux chaudes les plus chargées en silice sont celles des geysers. On sait que les geysers

sont des sources très chaudes, dégageant de l'acide carbonique et de l'hydrogène sulfuré, qui jaillissent par intermittences à des hauteurs parfois considérables et déposent des couches épaisses d'un tuf siliceux désigné sous le nom de *geysérite*.

Les eaux acides contiennent des acides sulfurique, chlorhydrique et borique. Un grand nombre d'entre elles sont riches en acide carbonique qu'elles empruntent aux couches profondes et aux strates voisines du sol.

Enfin, certaines eaux minérales renferment de l'arsenic à l'état d'arséniates (Bourboule, Saint-Nectaire); du soufre à l'état de sulfure, hyposulfite, acide sulfureux ou hydrogène sulfuré (Enghien, Barèges, Luchon, etc.); des traces d'iode (Vichy), de brome (Cauterets), de lithium (Royat, Vichy, Bourboule), de cuivre, de nickel, de manganèse, etc.

Dans les eaux ferrugineuses de Lamalou (Hérault) on a trouvé du cuivre, du nickel, du manganèse et du baryum. Ces éléments variés communiquent aux eaux minérales certaines propriétés thérapeutiques; c'est ainsi qu'elles sont diurétiques, sudorifiques, laxatives, etc., ou encore qu'elles dissolvent les dépôts formés

dans la vessie, les reins, les articulations, etc.

Mais l'effet médicamenteux des eaux thermo-minérales n'est pas seulement dû à leur température et aux éléments gazeux et salins qu'elles tiennent en dissolution, elles le doivent aussi à leur radioactivité¹.

L'action physiologique du radium et de son émanation sur l'organisme humain explique certains effets thérapeutiques des eaux minérales qui sont presque toutes radioactives, comme il résulte des études de MM. Curie et Laborde².

Il existe même des eaux thermo-minérales, considérées comme *indifférentes* ou *indéterminées* parce qu'elles sont à peine minéralisées, et qui, cependant, possèdent des propriétés thérapeutiques remarquables dues à la radioactivité. Leur action, intense à l'émergence de la source, disparaît par la mise en bouteilles³.

M. Charles Moureu, à qui l'on doit de remar-

¹ La radioactivité est une propriété des corps d'émettre des rayons spéciaux (Becquerel) Röntgen, X., etc.) qui rendent l'air conducteur de l'électricité, impressionnent les plaques photographiques et produisent des effets chimiques et physiologiques.

² Paul Besson. *Le radium et la radioactivité*. Paris, 1904. Paul Besson. *Communications à la Société des Ingénieurs civils de France, sur le radium et la radioactivité*, 1905 et 1909.

³ Paul Besson. *Op. cit.* Paris, 1905, p. 25.

quables études sur la question¹, a démontré que la presque totalité des sources thermo-minérales renferment, avec l'azote, les gaz rares inertes. Ces gaz sont accompagnés de l'émanation du radium qu'on peut assimiler à un véritable gaz, non plus inerte mais doué, au contraire, d'une action chimique intense. Les expériences de M. Moureu ont porté sur 57 sources; voici quelques-uns des résultats obtenus.

*Emanations du radium en milligrammes-minutes
dans 10 litres d'eau prise à l'émergence.*

Bad-Gastein (source Gratenbüker)	79,2
La Bourboule (s. Choussy)	22
Bagnères-de-Luchon (s. Bordeu n° 1)	18,36
La Chaldette	12,80
Plombières (s. Vauquelin)	11,80
Grisy (s. n° 2)	4,41
Bains-les-Bains (s. Savonneuse)	3,52
Ax-les-Thermes (s. Viguerie)	2,32
Bagnères-de-Bigorre (s. Salies)	2,32
Bourbon-Lancy (s. Lymbe)	2,06
Luxeuil (Bain-des-Dames)	1,24
Vichy (s. Chomel)	0,56

A la longue, la radioactivité s'atténue et disparaît en même temps que l'émanation.

¹ C. Moureu. Recherches sur les gaz rares des sources thermales. *Revue scientifique* du 15 juillet 1911.

L'exposition à l'air produit le même résultat ; elle fait perdre aux eaux thermo-minérales non seulement leurs propriétés radioactives, mais encore celles qui sont imputables à leur température et à leur composition chimique.

Aussi, une eau chaude qui se refroidit abandonne les sels qu'elle tenait en dissolution ; une eau gazeuse perd ses gaz, s'oxyde et dépose ; l'eau très minéralisée précipite ses sels ; une eau acide et chaude se charge de silice, etc.

On conçoit dès lors l'impérieuse nécessité de capter les eaux à l'abri de l'air et de toute contamination et de les utiliser à leur émergence même.

III

CLASSIFICATION DES EAUX MINÉRALES

Il semble assez difficile de classer les eaux minérales et d'établir entre elles des démarcations bien tranchées.

Au point de vue de leur genèse, on peut les faire rentrer en deux catégories :

1° Les sources dites **nouvelles, juvéniles, ou filoniennes**, qui sont en corrélation avec les roches éruptives profondes ;

2° Les sources dites **interstratifiées** qui procèdent de roches sédimentaires ;

Physiquement, elles sont chaudes ou froides.

L'habitude est de les classer d'après leur composition chimique et de la manière suivante :

Les **sources chlorurées** contiennent surtout des chlorures de sodium ou de magnésium. Ce sont des sources froides ;

Les **sources sulfatées**¹ dans lesquelles prédominent des sulfates de sodium, calcium, magnésium, aluminium et fer ;

Les **sources carbonatées**, caractérisées par de l'acide carbonique libre et des carbonates de calcium, magnésium, sodium, etc. ;

Les eaux alcalines à carbonate de sodium sont des dissolvants très actifs ;

Les **sources siliceuses** contiennent de la silice et des silicates ;

Les **sources acides** sont assez rares ; elles renferment de l'acide sulfhydrique, de l'acide chlorhydrique ou de l'acide sulfurique ;

Les **sources ferrugineuses**, à oxydes de fer, sont abondantes ; ce sont des eaux froides, contenant au moins 2 milligrammes de fer par litre ;

¹ On désigne aussi, sous le nom générique d'*eaux salines*, les eaux riches en chlorures ou en sulfates.

Les sources sulfurées sont froides et contiennent principalement du sulfure de sodium ou de l'hydrogène sulfuré;

Les sources indifférentes, indéterminées ou alpestres, sont très faiblement minéralisées; elles renferment au maximum 0,300 gr. de substances minérales par litre, mais elles sont caractérisées par leur haute température et leur radioactivité.

On peut encore citer les eaux dites volcaniques qui sont très chaudes, chargées en acide carbonique et en chlorures.

Cette classification usuelle a perdu de sa valeur depuis la découverte de la radioactivité dans les eaux. Il est utile cependant de la connaître puisqu'on attribue des propriétés thérapeutiques et médicamenteuses spéciales à chacun de ses termes, ceux-ci pouvant être d'ailleurs subdivisés eux-mêmes en plusieurs sous-termes.

IV

CAPTAGE DES EAUX MINÉRALES

Les principes de captage des eaux minérales sont les mêmes que ceux des eaux souterraines

ordinaires, comme ils ont été exposés au chapitre X. Mais en raison de la grande diversité des gisements, on peut dire que chaque cas comporte une étude et une application spéciales.

Le but du captage est d'amener au jour la plus grande quantité d'eau possible sans modifier ni altérer les conditions de composition et de température qu'on lui a reconnues dans son gisement.

Il convient donc, lorsque la source n'émerge pas au dehors, de l'atteindre par un drain, un puits, une galerie ou des trous de sonde, et de la capter dans les meilleures conditions d'isolement et de conservation.

Mais, avant tout, il est nécessaire de déterminer le débit maximum probable sur lequel on pourra compter; soit que la source, d'origine interstratifiée ou filonienne, émerge en un point d'affleurement, soit qu'elle constitue un griffon sans issue connue, mais qu'un sondage préliminaire a permis de localiser.

Dans l'un et l'autre cas, on mesure le débit par seconde en recevant l'eau dans un récipient gradué ou en la faisant couler sur un déversoir en tôle de 0,40 m. de largeur.

La formule des déversoirs indiquée précédemment, donne pour valeur du débit Q :

$$Q = 0,450 lh\sqrt{2gh}.$$

Le débit des sources est très variable ; ainsi, et pour ne citer que deux cas extrêmes, les sources *Lucas* et *Vesse*, à Vichy, fournissent 20 mètres cubes par jour, tandis que la source de *Louèche*, dans le Valais, en donne 10.000.

Comme dans le cas des eaux souterraines ordinaires, le débit varie avec le niveau de captage et il y a toujours intérêt à capter la source le plus bas possible, lorsque les circonstances locales le permettent.

Les travaux de recherche, d'approche, de reconnaissance et de prise d'eau diffèrent naturellement suivant que celle-ci est d'origine filonienne ou forme un gisement interstratifié. C'est une technique difficile, non pas seulement à exposer, mais encore à résumer dans un ouvrage hydrologique d'ordre général ; mais comme elle a été déjà établie dans un grand nombre de cas particuliers, on consultera avec profit les ouvrages spéciaux qui décrivent les installations connues.

Je reproduis cependant, à titre d'indication

générale, l'intéressant tableau suivant emprunté à M. de Launay¹ et qui montre, par de nombreux exemples, les diverses méthodes de captage employées selon le mode d'émergence.

Ce tableau, qui donne une idée de la variété et de la complexité des cas, montre la difficulté d'une étude de captage dans une région hydrologiquement peu connue. Il résume clairement les divers travaux publiés sur la matière dans les ouvrages suivants :

J. FRANÇOIS. — Mémoire sur Luchon. *Annales des mines*. Paris, 1842.

J. FRANÇOIS. — Les eaux minérales dans leurs rapports avec la science de l'ingénieur. Paris, 1860.

J. FRANÇOIS. — Travaux d'aménagement des eaux minérales françaises. *Annales des mines*. Paris, 1860.

J. FRANÇOIS. — Travaux de captage des eaux minérales. *Etablissements thermaux. Exposition universelle de 1867*. Paris, 1868.

DURAND-FARDEL ET FRANÇOIS. — Dictionnaire des eaux minérales. Paris, 1860.

VOISIN. — Mémoire sur Vichy. *Annales des mines*. Paris, 1879.

RIGAUD. — Notice sur les travaux exécutés à Bourbonne-les-Bains. *Annales des mines*. Paris, 1880.

L. DRU. — Rapport sur les eaux minérales du Caucase. Paris 1884.

¹ L. de Launay. *Recherche, captage et aménagement des sources thermo-minérales*. Paris, 1899, p. 437.

a) Captage en roche dure, dans une fosse murillée ou dans un simple cuvelage en bois, avec pompage au besoin (*Bourbon-l'Archambault, Geleznovodsk, Schinz-nach, Maizières*).

Captage en terrain perméable par tranchées et puits (*Aulus*), ou par enceintes successives (*Euzet, Saint-Gervais*).

Captage par fosses, excavations, petits puits, tubes ascensionnels ou courts trous de sonde . . .

Captage en terrains marneux, dans une enceinte en 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 (*Pfaffers*).

Emploi de trous de sonde pour des sources gazeuses (*Chatelguyon*).

c) Captage dans une fosse murillée avec précautions spéciales pour éviter la fuite à l'aval (*Evauz, Nérès*).

Captage par un réservoir appliqué au coteau (*Sources froides de Geleznovodsk*).

SOURCES
FILONIENNES
ARRIVANT

Captage par puits
et sondages . . .

1° Griffon atteint par puits (*Vichy*).

2° Griffon capté par puits d'isolement, entourant un tube ascensionnel (*Vittel, Contrexéville, Fumades*).

DUFOND PAR UNE
FRACTURE QUEL-
CONQUE

Captage par galeries de mines, travers-bancs, sondages horizontaux, etc. . .

3° Griffon formé de fissures multiples, atteint par un sondage (*La Bourboule*).

1° Galeries de drainage avec puits (*Uriage*).

2° Travers-bancs allant recouper le griffon (*Saint-Jean-du-Gard, Pfaffers, Cauterets*).

3° Travers-bancs, parfois accompagné de galeries de drainage en direction (*Plombières, Lamalou, Pouzzoles*).

Captage par le jeu des pressions.
Emploi ascensionnel des enceintes successives

a) Emploi d'une couverture en béton ou d'une nappe d'eau (*Pfaffers, Plombières, Bourbonne, Evauz, 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 (*Englihen*).

Cas d'une strate perméable

Captage par puits ou sondages (*Vichy, Saint-Yorre, Vals, etc.*)

SOURCES
INTERSTRATI-
FIÉES

Cas d'une strate fissurée

Captage par puits ou sondages, avec précautions spéciales (*Pougues, Vittel, Contrexéville, Fumades*).

DAUBRÉE. — Les eaux souterraines. Paris, 1888.

LAURANS. — Congrès d'hydrologie et de géologie de Clermont, 1897.

V

LÉGISLATION DES EAUX MINÉRALES

La recherche, la concession, la protection, le captage et l'exploitation des eaux minérales, en France, sont régis par le décret du 8 mars 1848 et la loi du 14 juillet 1856.

OUVRAGES A CONSULTER

DURAND-FARDEL, LE BRET, LEFORT ET FRANÇOIS. — Dictionnaire des eaux minérales. Paris, 1860.

DAUBRÉE. — Les eaux souterraines aux époques anciennes et actuelles. Paris, 1888.

JACQUOT ET WILM. — Eaux minérales de la France. Paris, 1894.

AD. CARNOT. — Analyses des eaux minérales françaises. *Annales des mines*. Paris, 1894.

L. DE LAUNAY. — Recherche, captage et aménagement des sources thermo-minérales. Paris, 1899.

F.-W. CLARKE. — The data of Geochemistry. Mineral Wells and Springs. Washington, 1908.

M. HANRIOT. — Les eaux minérales de l'Algérie. Paris, 1910.

LÉGISLATION DES EAUX MINÉRALES EN FRANCE.

L. AGUILLON. — Loi prussienne du 14 mai 1908 relative, à la protection des sources minérales. *Annales des mines*. Paris, 1908.

DEUXIÈME PARTIE
STÉRILISATION DES EAUX

CHAPITRE PREMIER

EAUX POTABLES

I

EAUX DE SOURCE ET DE RIVIÈRE

On sait déjà que les eaux sont plus ou moins impures selon leur provenance ; certains hygiénistes affirment même que toutes les eaux destinées à la boisson ont besoin d'être stérilisées : c'est une exagération.

Certainement, les eaux de source étaient plus pures quand une épaisse végétation couvrait les versants et les plateaux. L'eau de pluie se purifiait au contact des feuilles et des racines et, quand elle arrivait au bassin de réception, elle avait subi un double filtrage chimique et mécanique.

Les conditions ont considérablement changé ; néanmoins on peut encore considérer qu'une

eau de source, captée à son point précis d'émergence, est potable si elle n'a pas traversé des terrains très fissurés ou à réservoirs intérieurs. C'est qu'en effet elle a subi plusieurs formes d'épuration :

1° Un filtrage à travers des terres et des sables ;

2° Une oxydation jusqu'à la profondeur où s'exerce l'action de l'air atmosphérique ;

3° Une sédimentation par circulation lente dans son bassin de réception.

D'autre part, les torrents, en pays montueux et boisés, écoulent des eaux réputées pour leur pureté. Dans ce cas, l'agent purificateur est le soleil, ou même simplement la lumière solaire, qui oxyde les matières organiques ; l'air agit avec d'autant plus d'efficacité sur les filets liquides que ceux-ci sont sans cesse agités aux chutes, aux cascades et par le frottement des roches et des pierres. Ces diverses circonstances favorisent la déminéralisation et la purification chimique ; et comme les versants boisés ne se laissent pas entamer et ne cèdent ni terre ni sables, l'eau coule claire et limpide.

Mais, en général, les eaux de ruisseaux, de rivières et de dérivations sont toujours plus ou

moins contaminées et doivent être purifiées et stérilisées avant d'être livrées à la consommation.

Les eaux destinées à des usages industriels peuvent être impropres. Il en est même qui perdraient leurs qualités spéciales si on les épurait.

Ainsi, l'eau des rivières est généralement bonne pour la cuisine et le savonnage ; l'eau séléniteuse, dont le degré hydrométrique est inférieur à 50, est recherchée pour la teinture, la brasserie, etc. D'autres eaux conviennent plus particulièrement pour le blanchissage des tissus, la préparation des nitrocelluloses (soie artificielle, fulmicoton, coton nitré soluble, celluloïd).

Toutefois une eau trop dure est nuisible pour la production de la vapeur, parce qu'elle encrasse rapidement les chaudières ; et comme sa dureté résulte d'une teneur exagérée en sels de chaux et de magnésie, on l'adoucit en précipitant les carbonates et sulfates de calcium et de magnésium.

Les eaux employées par l'industrie n'ont donc pas nécessairement besoin d'être potables ; tout ce qu'on leur demande, le cas échéant, c'est d'être adoucies par un procédé quelconque ou, tout au moins, d'être épurées par sédimentation, filtra-

tion ou autrement; les eaux destinées à la boisson, seules, doivent être purifiées et stérilisées suivant les circonstances qui les caractérisent.

Les caractères des eaux potables sont de nature physique, chimique et bactériologique.

II

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES EAUX POTABLES

Une bonne eau de source doit être fraîche, claire, limpide, incolore, aérée, sans odeur ni saveur désagréable.

Ces qualités décèlent sa pureté apparente, mais les analyses chimique et bactériologique seules indiquent sa valeur hygiénique et économique; car il ne suffit pas, pour une eau potable, d'être *pure*, il faut surtout qu'elle soit *saine*.

La limpidité doit être constatée par diverses épreuves; il est certain, en effet, qu'une source, dont les eaux se troublent après la pluie, est mauvaise, car c'est l'indication qu'elle subit un filtrage insuffisant. Il en est de même d'une eau qui perd sa transparence par ébullition.

L'aération est une chose indispensable; tout

le monde sait que l'eau bouillie est fade et lourde. Une eau bien aérée doit dégager des bulles gazeuses dès qu'on la chauffe, et contenir au moins 25 centimètres cubes de gaz composés principalement d'oxygène, d'acide carbonique et d'azote.

Les signes extérieurs fournissent quelques renseignements sur la pureté d'une eau, ils peuvent également donner des indications sur sa salubrité. Celle-ci, en effet, se reconnaît à la présence de certaines plantes aquatiques et de quelques mollusques particuliers.

Ainsi les *nénuphars*, les *joncs*, les *patiences*, les *salicaires* vivent dans les eaux médiocres, tandis que le *cresson de fontaine* ne pousse que dans les eaux très saines. Dans les eaux suffisamment pures, on trouve l'*épi d'eau*, la *véronique mourron*, la *véronique beccabunga*.

Les indications fournies par les mollusques sont aussi nettes; la *physa fontinale* (lymnéidée) ne vit que dans les eaux vives; dans les eaux ordinaires on rencontre la *lymnée des étangs*, la *lymnée ovale*, le *planorbe marginé*. La *cyclade cornée* et la *bythynie impure* vivent dans les eaux mauvaises ou stagnantes.

III

CARACTÈRES CHIMIQUES
DES EAUX POTABLES

Les eaux renferment en dissolution une grande quantité de matières minérales dont j'ai déjà indiqué l'origine et la variété. Ces substances ont souvent un effet physiologique sur l'organisme humain et donnent aux eaux minérales leurs propriétés médicamenteuses.

Je vais les passer rapidement en revue.

Carbonates de chaux et de magnésie. — Les eaux contenant une certaine quantité de ces sels sont dites *dures*; elles ne sont pas nuisibles à la santé, comme on l'a dit quelquefois, car la chaux et la magnésie sont utiles au développement des tissus et des os, ainsi qu'à la conservation des dents. On croit cependant qu'un excès de calcaire favorise la formation des nodosités articulaires qui sont la conséquence de la *goutte*.

Une eau dure reste potable tant que son degré hydrotimétrique est inférieur à 30 ou même 40.

A partir de 30°, elle devient impropre aux usages domestiques et industriels tels que la cuisson des légumes ¹, le savonnage, la production économique de vapeur, la fabrication des mortiers de chaux et de ciment, les opérations de dissolution dans les industries chimiques, etc. C'est que les sels de chaux forment facilement des combinaisons insolubles qui sont indigestes dans l'alimentation et incrustantes ou nuisibles dans les applications industrielles ².

Si l'eau contient du bicarbonate de calcium dissous à la faveur de l'acide carbonique, elle se trouble à l'air.

La magnésie produit les mêmes effets que la chaux, et l'on dit qu'une eau devient *dure* et

¹ M. Ritter, de Nancy, a fait à ce sujet les expériences suivantes :

Tandis qu'il suffit d'une heure trente-cinq pour cuire des haricots avec l'eau distillée, résidu sec 0, il faut deux heures cinquante avec l'eau naturelle à 565 milligrammes de résidu sec, trois heures si le résidu est de 600 milligrammes et quatre heures s'il atteint 1950 milligrammes.

² Les industries qui se servent de savon en font toujours un excès de consommation quand l'eau est trop calcaire.

Les incrustations dans les chaudières ont beaucoup d'inconvénients ; elles obligent à des nettoyages fréquents et onéreux, et provoquent des *coups de feu* dont les conséquences sont souvent désastreuses. On a calculé qu'un dépôt incrustant de 1,5 mm. exige une dépense supplémentaire en combustible de 12 p. 100 ; la perte atteint 50 p. 100 quand l'incrustation a 10 millimètres d'épaisseur.

cesse d'être *douce* quand elle renferme plus de 450 milligrammes de sels calcaires et magnésiens par litre d'eau.

Pour diminuer la teneur en calcaire, on ajoute à l'eau un mélange, en proportions variables, de carbonate de soude, chaux pure et alun ; puis, après agitation, on sépare le précipité par décantation. C'est le principe des appareils d'épuration pour les générateurs à vapeur.

L'eau dure, en traversant les conduites de fer, les tapisse peu à peu d'une couche de calcaire qui les préserve de la rouille ; l'eau douce, au contraire, attaque le métal. Il semble donc qu'il y ait intérêt, lorsqu'on transporte les eaux potables par conduite de fer, de les enduire de chaux à l'intérieur ; la chaux fixe l'acide carbonique et neutralise ainsi son action oxydante.

Oxydes de fer et de manganèse. — Les oxydes de fer et de manganèse, généralement dissous dans l'eau à la faveur de l'acide carbonique, se déposent quand l'acide se dégage. Un fait analogue se produit avec le carbonate de fer ; l'eau se trouble et se colore en jaune d'abord, puis en brun.

Les eaux renfermant des oxydes de fer ont

une saveur métallique désagréable. Leur odeur devient même infecte quand la teneur en fer atteint 250 à 300 milligrammes par litre. La présence du fer favorise la décomposition des matières organiques.

Sulfates et acide sulfurique. — Les sulfates de chaux et de magnésie rendent l'eau *séléniteuse* ; celle-ci est impotable et impropre à certains usages.

La dureté de l'eau, qui n'est que *temporaire* quand elle est due aux bicarbonates de calcium ou de magnésium, est *permanente* quand elle est produite par les sulfates. Dans certaines conditions, particulièrement en présence des matières organiques, les sulfates se transforment en sulfures et rendent l'eau fétide.

Le maximum de teneur d'une bonne eau ne doit pas dépasser 30 milligrammes d'acide sulfurique.

Nitrates et acide nitrique. — Les composés de l'azote et les nitrates proviennent des agents atmosphériques, du lessivage des eaux sur certaines roches ou encore de la décomposition des matières organiques.

Les nitrates sont moins dangereux que les

nitrites qui sont l'indice d'une eau mauvaise, même à la teneur de quelques milligrammes seulement.

Ammoniaque. — La plupart des eaux contiennent de l'ammoniaque qui provient de la décomposition de matières animales et végétales, de la réduction des nitrates et des nitrites, de l'apport par les pluies, etc.

La nitrification qui s'opère dans le sol transforme l'ammoniaque en nitrates, c'est pourquoi les eaux profondes ne contiennent que de très faibles quantités d'ammoniaque libre.

Une eau est considérée comme *mauvaise* lorsqu'elle renferme plus de 1 milligramme d'ammoniaque par litre.

Chlorures et chlore. — La présence du chlore à une dose supérieure à 40 milligrammes rend l'eau impotable.

Le chlorure de sodium peut provenir de la salure du sol ou d'un lessivage de matières fécales ; le chlorure de calcium résulte d'infiltrations à la surface.

En général, la présence du chlore dénonce une contamination par des infiltrations d'origine

animale et l'on constate toujours qu'une eau renfermant du chlore et des matières organiques contient d'abondantes colonies microbiennes, aérobies et anaérobies.

Matières organiques. — Les matières organiques se trouvent dans l'eau en suspension, en dissolution, ou encore à l'état colloïdal qui correspond à celui de suspension extrêmement fine.

Ce sont des débris de végétaux, des sels solubles ou insolubles, des acides de l'humus et des combinaisons de ces acides avec l'azote de l'air.

Dans un puits, les matières organiques en suspension réagissent sur les sulfates contenus dans l'eau ; il se forme des carbonates avec dégagement d'hydrogène sulfuré que l'on reconnaît à son odeur désagréable d'œufs pourris.

On a remarqué que les eaux très chargées de matières organiques contiennent beaucoup de silice ; mais la réciproque n'est pas vraie.

Une eau souillée par des matières organiques cesse d'être potable quand elle exige plus de 24 milligrammes d'oxygène par litre pour les oxyder complètement.

Le Laboratoire municipal de Paris apprécie la qualité des eaux d'après leur teneur minérale, dans les termes suivants :

ÉLÉMENTS	EAU PURE	EAU POTABLE	EAU SUSPECTE	EAU MAUVAISE
Extrait sec à 180°.	»	»	> 500 ^{mmg}	»
Alcalinité en carbonate de chaux	»	»	> 250	»
Ammoniaque.	»	»	0 à 1	> 1
Chlorures en chlorure de sodium.	> 27	30 à 70°	80 à 160	> 160
Sulfates en sulfate de chaux	3 à 8	8 à 50°	50 à 85	> 85
Chaux totale.	»	»	> 200	»
Magnésie	»	»	> 30	»
Phosphate	»	»	traces	»
Hydrogène sulfuré	»	»	traces	»
Oxygène pour la matière organique	< 1	1 à 2	3 à 4	> 4
Degré hydrotimétrique.	5 à 15°	15 à 20°	> 30°	> 100°
Degré hydrotimétrique après ébullition	2 à 5°	5 à 12°	12 à 18°	> 20°

IV

COMPOSITION BACTÉRIOLOGIQUE DES EAUX POTABLES

L'examen bactériologique des eaux destinées à l'alimentation des villes est devenu indispensable depuis que l'on connaît le rôle et l'influence

des eaux sur l'économie dans les maladies et épidémies dites d'origine hydrique.

Il a pour but de numérer les germes microbiens, particulièrement ceux qui sont dangereux comme les bacilles du côlon, d'Eberth, du choléra et autres de nature typhique.

L'eau de pluie est presque complètement aseptique lorsqu'elle arrive au contact du sol, mais elle se charge dans la terre d'une multitude de bactéries dont elle se dépouille ensuite progressivement, par oxydation, en profondeur.

J'ai déjà indiqué que, théoriquement, il suffirait, pour purifier l'eau, de lui faire traverser une couche de 2 à 3 mètres de sable fin et homogène ; mais il n'en est pas ainsi dans la pratique courante, car les terrains filtrants sont des sables ou graviers peu homogènes, ou des roches perméables et diaclasiques. Aussi est-il impossible d'indiquer la profondeur à laquelle le sol devient aseptique.

Il est également difficile¹ d'établir le mode de répartition des bactéries dans le sol, car on ne connaît pas assez leurs conditions d'existence

¹ Les observations qui suivent sont en partie empruntées au remarquable ouvrage du Dr Imbeaux : *les Eaux potables et leur rôle hygiénique dans le département de la Meurthe-et-Moselle*. — Nancy, 1897.

dans les couches profondes. On sait seulement que les populations microbiennes du sol et des eaux souterraines sont fonction de la température, de l'humidité et du milieu spécial où elles vivent ; et comme les infiltrations aqueuses venues de la surface jouent également un rôle considérable, on est amené à supposer une relation entre les averses pluviales et les colonies de bactéries du sous-sol.

On sait, en effet, que les eaux ruisselantes entraînent toujours, avec les particules terreuses, des germes qui viennent infester les cours d'eau, de sorte qu'on peut dire qu'à toute crue de rivière correspond une recrudescence de microbes. Or cette même observation est applicable aux couches aquifères souterraines, car les eaux d'infiltration entraînent avec elles des parcelles solides organiques et minérales et par conséquent des microbes qui ne sont autre chose que des corpuscules en suspension.

L'expérience confirme cette manière de voir et montre d'une façon très nette que les colonies microbiennes et les matières organiques augmentent avec les pluies ¹.

¹ D'après M. Imbeaux, on a observé, à Nancy, que les recrudescences de fièvre typhoïde suivent, ordinairement à

Si tous les germes de la surface susceptibles de passer dans le sous-sol étaient des saprophytes ordinaires ou *bacilles saprogènes*, le mal ne serait pas très grand ; mais ces germes sont fréquemment *pathogènes*. C'est dans le sol, en effet, que l'on dépose, sans désinfection préalable, les matières fécales, les eaux ménagères souillées, les cadavres d'animaux, les liquides septiques, etc. Le voisinage des foyers de putréfaction de matières animales est particulièrement dangereux, car les produits et les agents de décomposition pénètrent dans les couches aquifères phréatiques.

Quand le bassin d'alimentation est boisé, les eaux du bassin de réception et les sources sont plus pures ; car les chances de contamination sont moindres là où, grâce à l'activité de la végétation, l'air et le sol sont préservés de l'infection microbienne. Ces mêmes avantages se retrouvent dans les prairies naturelles, quand elles ne sont pas souillées par le fumier ou les engrais d'origine animale.

une quinzaine de jours d'intervalle, la succession des vents d'Ouest et de Sud-Ouest, c'est-à-dire des vents de pluie, à ceux d'Est et du Nord ; et que le froid sec, la gelée et une longue sécheresse sont défavorables à la propagation de maladies d'origine hydrique.

On voit ainsi quel grand rôle hygiénique joue la végétation; les terrains boisés et gazonnés non seulement ont une influence sur le régime des eaux, mais encore contribuent à assainir celles-ci.

Les conditions hygiéniques des puits et des sources sont surtout déplorables dans les villages où les règles les plus élémentaires de l'hygiène sont généralement peu connues; les fumiers, les mares, les égouts et ruisseaux à l'air libre, les eaux boueuses, les cimetières sont autant de causes d'insalubrité et d'infection. Il faut y joindre l'incurie, la malpropreté et les habitudes routinières des gens de la campagne. Aussi ne devrait-on faire de captages et établir de fontaines qu'en amont du pays, en un point assez éloigné pour être complètement à l'abri des pollutions de l'agglomération humaine.

Si les accidents par contamination ne sont pas plus fréquents dans les campagnes, c'est parce que les eaux des puits ne sont pas *stagnantes*; elles coulent plus ou moins vite sur leur surface de drainage et, de cette façon, éliminent ou diluent tout au moins les souillures qui leur viennent du sol.

Dans les environs des villes, les causes

d'infection sont plus grandes, car on y fait souvent une culture maraîchère intensive à grand renfort d'engrais humains, de boues urbaines et d'épandage des eaux d'égout ou de vidange.

Enfin les eaux qui passent sous le sol des villes sont tellement souillées par les infiltrations de surface qu'il faut renoncer à y établir des puits pour les usages domestiques, à moins qu'ils ne soient très profonds et en relation avec une couche aquifère placée entre deux strates imperméables, c'est-à-dire hors de contact avec les eaux infestées du sol.

Les eaux des canaux et rivières souterraines sont aussi polluées que peuvent l'être celles des cours d'eau superficiels.

V

RECHERCHES DES EAUX SOUTERRAINES POTABLES

J'ai indiqué l'influence des terrains au double point de vue de leur perméabilité et de la composition des eaux ; il est utile de savoir dans quelle mesure ils contribuent à fournir des eaux saines et potables.

M. Imbeaux, après avoir fait l'étude des eaux qui circulent dans les divers terrains du département de Meurthe-et-Moselle, a établi quelques règles qui semblent pouvoir être généralisées dans les termes suivants :

1° Les sources et les couches aquifères sont généralement très pures quand elles sont issues d'un bassin alimentaire recouvert de forêts, de landes, ou de prairies qui ne reçoivent pas d'engrais animaux ;

2° Les grès filtrent parfaitement, même sous de faibles épaisseurs et donnent des eaux pures.

3° Les calcaires fissurés ne donnent des eaux pures que si leur épaisseur atteint au moins 50 mètres. Encore doit-on faire des réserves pour les sources vaclusiennes provenant le plus souvent de rivières souterraines ;

4° Les calcaires fissurés et minces ne donnent que des eaux douteuses dont le nombre de germes, comme le débit d'ailleurs, augmente rapidement à la suite de pluies intenses ;

5° Les alluvions ne donnent des eaux pures et sans souillures de la surface que si le gravier est assez fin et la couche suffisamment épaisse. Il ne peut pas y avoir de sécurité à moins d'un filtrage sur 6 mètres au moins d'épaisseur ;

6° Les eaux qui passent sous les éboulis sont exposées à la contamination ; en tout cas elles n'ont jamais la valeur de celles que l'on capte à leur sortie immédiate des terrains en place ;

7° Les sources qui naissent à peu de profondeur, dans l'intérieur des villages ou sous des habitations, sont généralement polluées ;

8° Dans les centres habités, les puits doivent être surveillés avec soin, protégés et nettoyés fréquemment, leur orifice ou margelle doit être recouvert. Aucun foyer d'infection : fumier, mare, puits perdu, fosse d'aisance ne doit être toléré dans un rayon assez étendu, surtout en amont. Les puits en nappes profondes et les puits artésiens sont généralement excellents.

Les règles qui précèdent sont un peu trop absolues pour la recherche des sources en terrains calcaires, surtout lorsque ceux-ci sont peu fissurés. On y trouve, en effet, des eaux potables s'ils ne sont pas traversés par des rivières souterraines et s'ils ne comportent pas de bétouilles.

En tout cas, ces terrains se prêtent généralement à la recherche en profondeur d'une seconde ou d'une troisième nappe aquifère moins suspecte que la nappe phréatique.

VI

ESSAIS DES EAUX

1° ANALYSE GÉNÉRALE. — L'analyse chimique d'une eau d'alimentation publique comprend les opérations suivantes prescrites par le Comité consultatif d'hygiène, en 1885 :

1° *Evaporer un litre d'eau au bain-marie, chauffer pendant quatre heures. Après dessiccation, peser et, sur le résidu, chercher les nitrates.*

2° *Evaporer la même quantité d'eau, chauffer le résidu au rouge sombre et peser. La différence entre cette pesée et la précédente est comptée comme matière organique et produits volatils. Dans le résidu, doser l'acide sulfurique.*

3° *Déterminer le degré hydrotimétrique.*

4° *Concentrer un litre d'eau à 50 centimètres cubes, doser le chlore et calculer en chlorure de sodium.*

5° *Faire bouillir, pendant dix minutes, 100 centimètres cubes d'eau avec 3 centimètres cubes de solution à 10 p. 100 de bicarbonate de sodium et 10 centimètres cubes de solution de permanganate titrée à 0,50 gr. par litre. Si le rose disparaît,*

ajouter du permanganate. Laisser refroidir, ajouter 2 centimètres cubes d'acide sulfurique pur et 5 centimètres cubes d'une solution titrée de 20 grammes de sulfate ferreux et 10 grammes d'acide sulfurique pur par litre, et ramener au rose par le permanganate. On recommence ensuite l'essai avec des quantités doubles et on calcule la quantité d'oxygène consommée par litre.

2° ANALYSE BACTÉRIOLOGIQUE. — La numération des germes microbiens dans l'eau, leur séparation et leur identification, constituent des opérations longues et difficiles que seuls peuvent entreprendre des spécialistes en la matière.

On s'en rendra facilement compte par le fait que les microbes organiques vivants sont d'une ténuité extrême; ainsi, pour n'en citer qu'un exemple, le *microbe de la rougeole* mesure à peu près 1 millionième de millimètre.

3° ANALYSE HYDROTIMÉTRIQUE. — L'analyse hydrotimétrique fait connaître rapidement le degré de dureté d'une eau; elle est basée sur la propriété du savon de former, avec les sels calcaires, des grumeaux ou précipités insolubles.

On fait usage d'une liqueur alcoolique de

savon¹ et d'une burette graduée de telle façon qu'à chaque degré corresponde un décigramme de savon pouvant neutraliser un centigramme environ de sel calcaire contenu dans un litre d'eau.

La burette est remplie de la liqueur de savon que l'on verse lentement dans un litre de l'eau à essayer ; on agite constamment et on cesse de verser quand il n'y a plus formation de grumeaux et qu'il se produit une mousse persistante. La quantité de liqueur employée est le degré hydrotimétrique.

Chaque degré correspond à l'une des quantités suivantes de sels calcaires et magnésiens :

Carbonate de calcium . . .	10 milligrammes.	
Sulfate — . . .	14	—
Chlorure — . . .	11	—
Carbonate de magnésium . .	8	—
Sulfate — . .	12	—

En multipliant le degré lu sur la burette par l'un des chiffres qui précèdent, on obtient la teneur de sel par litre d'eau.

Une eau dont le degré hydrotimétrique est inférieur à 30 est potable et bonne pour la cuisson

¹ On trouve dans le commerce des dissolutions alcooliques de savon toutes préparées pour essais hydrotimétriques.

des légumes, le blanchissage, etc. Entre 40 à 60°, elle est impropre aux usages domestiques mais elle peut encore être utilisée pour la production de vapeur.

Enfin, au-dessus de 60°, elle est mauvaise et impropre à tous usages domestiques ou industriels.

Et pour bien comprendre l'importance des analyses hydrotimétriques, il suffit de remarquer qu'à chaque degré hydrotimétrique correspond une perte de 100 grammes de savon par mètre cube d'eau avant d'arriver à une formation de mousse.

Les industries qui emploient le savon savent donc qu'elles en perdront un kilogramme par mètre cube d'eau, si celle-ci marque par exemple 10° à l'hydrotimètre, avant d'obtenir un effet utile ; ils savent aussi que ces grumeaux insolubles, à base de chaux et de magnésie s'attachent aux fibres textiles et aux tissus, de sorte qu'il est presque impossible de les éliminer complètement par des rinçages.

Les degrés hydrotimétriques varient suivant les pays ; ainsi le degré français correspond à 0,56 du degré allemand et 0,70 du degré anglais. Leur comparaison s'établit ainsi :

1° français	vaut	0°,56	allemand	ou	0°,7	anglais;
1° allemand	—	1°,79	français	—	1°,25	—
1° anglais	—	1°,43	français	—	0°,8	allemand.

VII

CONCLUSIONS

Toutes les eaux de source ne sont pas potables, quelques-unes même sont souvent douteuses ; il convient donc, avant de les capter ou les utiliser, surtout pour un grand service comme une alimentation de ville, d'en faire une reconnaissance préalable par des analyses chimiques et bactériologiques.

Ces analyses doivent être fréquemment renouvelées parce que toutes les eaux souterraines peu profondes sont influencées, non seulement par les conditions climatériques et les souillures de la surface, mais encore par les variations d'écoulement et même de température de la couche aquifère dans laquelle elles trouvent leur origine.

Et comme il est nécessaire de préciser très exactement leur composition et leurs qualités hygiéniques, il est prudent de ne confier leur analyse qu'à des chimistes spécialisés particulièrement en matière bactériologique.

OUVRAGES A CONSULTER

D^r IMBEAUX. — Les eaux potables et leur rôle hygiénique dans le département de Meurthe-et-Moselle. Nancy, 1897.

W. OHLMULLER. — Guide pratique pour l'analyse de l'eau. Traduction par le D^r L. Gauthier.

HALLER ET GIRARD. — Memento du chimiste. Paris, 1911.

DIÉNERT. — Eaux douces et eaux minérales. Paris, 1912.

CHAPITRE II.

PURIFICATION ET STÉRILISATION DES EAUX DE BOISSON EAUX DE PUIITS ET DE TABLE

Les procédés de purification diffèrent suivant qu'ils s'appliquent à des eaux de puits, à l'eau de table ou de ménage et aux eaux destinées aux grandes alimentations urbaines.

J'examinerai successivement chacun de ces cas, dans le présent chapitre et dans le suivant.

I

EAUX DE PUIITS

Quels que soient les moyens préconisés pour maintenir l'eau des puits à l'abri de toute contamination, il n'en est aucun dont l'efficacité soit absolue.

Si l'eau est troublée en temps de pluie, il faut la filtrer avant de la boire ; mais si elle est sus-

pecte, il convient de la faire bouillir, sauf à condamner résolument le puits si la corruption persiste.

Lorsque la vase et les matières organiques s'accumulent au fond, on fait un curage aussi soigné que possible et l'on s'assure que l'écoulement naturel de la nappe phréatique s'effectue correctement en aval à travers les parois du puits.

Pendant les époques de grande chaleur, l'eau a toujours une tendance à se corrompre; on y remédie en jetant au fond un seau de braise ou de charbon de bois en gros morceaux, ou bien encore en la purifiant par agitation avec un litre d'une dissolution faible de permanganate de potasse du commerce.

Dans le même ordre d'idées, on peut recommander le procédé suivant indiqué par M. le D^r Blarez, de la Faculté de médecine de Bordeaux.

On prépare une poudre avec les éléments et dosages suivants :

Permanganate de potasse.	25	grammes.
Sulfate d'alumine	250	—
Kaolin en poudre lavé.	725	—

On la délaie dans un seau qu'on plonge dans le puits en ayant soin de le monter et remonter

vivement à différentes reprises pour favoriser le délayage. On effectue ensuite un brassage avec une perche ou autrement.

L'action de cette poudre est très efficace; elle détruit les microbes pathogènes. L'eau, après ce traitement, a pris une légère teinte jaune. Mais elle est bonne à boire. Toutefois il convient de la laisser reposer trois à quatre jours avant d'en faire usage.

On emploie 200 grammes de poudre Blarez par mètre cube à stériliser.

Un autre moyen très efficace de stériliser l'eau provenant d'un puits suspect, c'est de la traiter par un hypochlorite, à raison de 1 à 2 milligrammes de chlore par litre. Mais, comme il reste un goût désagréable de chlore, on le fait disparaître en filtrant, comme l'a proposé M. Threst¹, sur une couche de 0,30 à 0,40 m. de copeaux de fer ou d'aluminium.

On achève la purification par un dernier filtrage sur la *polarite* qui retient l'oxyde de fer entraîné et les dernières traces de chlore, ou sur le charbon.

¹ John C. Threst. *Purification of Water for Potable Purposes by means of Chlorine or Hypochlorites*. Congrès de Chimie appliquée, Londres, 1909.

II

EAUX DE TABLE

On purifie les eaux de table par filtration, traitement chimique ou ébullition.

1° PURIFICATION PAR FILTRATION. — La purification des eaux de table dans des vases à parois filtrantes (grès, alcarazas, terre de pipe, etc.) est connue de toute antiquité.

L'ancien filtre en grès qui fut si longtemps en usage en France, surtout dans les campagnes, et qu'on a si malencontreusement déconsidéré dans l'opinion publique sous prétexte qu'il ne retient pas suffisamment les microbes, a rendu de très grands services. C'est un bloc de grès creusé en cuvette de 0,50 à 0,60 m. de diamètre, avec des parois filtrantes de 8 à 10 centimètres d'épaisseur.

Les bougies Chamberland, en porcelaine dégourdie ou en terre d'infusoires, sont des cylindres creux et fermés qu'on introduit dans l'eau ; celle-ci filtre à l'intérieur. La pâte poreuse de ces bougies comporte des fendillements et

des canaux plus ou moins sinueux qui arrêtent un grand nombre de microbes, mais se laissent

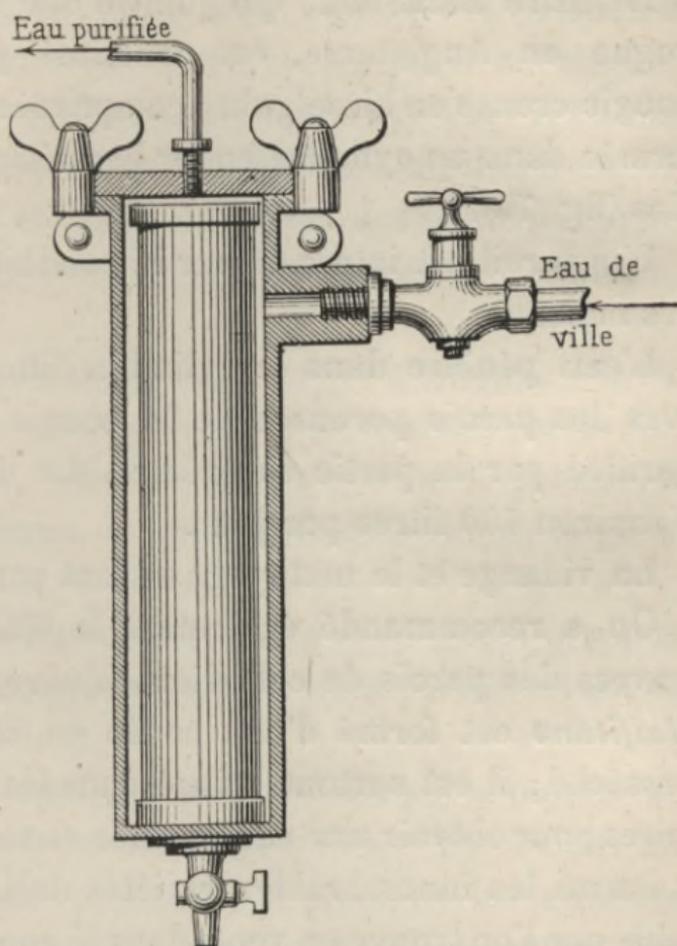


Fig. 79. — Filtre Berkefeld.

traverser par ceux qui sont d'une extrême ténuité; c'est pourquoi il convient de pratiquer de fréquents nettoyages par immersion des bou-

gies dans l'eau bouillante ou dans quelque solution antiseptique.

Le filtre Berkefeld, qui jouit d'une certaine vogue en Angleterre, est constitué par une bougie creuse en kieselguhr¹ comprimée et renfermée dans un cylindre en fer hermétiquement clos (fig. 79).

L'appareil est intercalé sur la conduite d'eau des maisons.

L'eau pénètre dans le cylindre, filtre à travers les parois poreuses de la bougie et sort purifiée par la partie supérieure. Le débit est d'environ 100 litres par jour.

La vidange et le nettoyage se font par le bas.

On a recommandé également la filtration à travers des parois de collodion. L'*ultrafiltre de Malfitano* est formé d'une poche en collodion desséché; il est surtout utilisé dans les laboratoires pour obtenir une eau purifiée et stérilisée.

Parmi les innombrables variétés de filtres de table que l'on trouve en vente dans le commerce, on peut citer le **filtre Maignen**, l'un des plus anciens et des plus efficaces. Il filtre l'eau à tra-

¹ La *kieselguhr*, ou simplement la *guhr*, est une farine siliceuse fossile, formée d'enveloppes tubulaires de diatomées, et qu'on trouve en gisements considérables à Oberlohe (Hanovre).

vers un tissu d'amiante sans coton et une couche de noir animal.

L'amiante filtre bien, quand le tissu est convenablement serré et, de plus, exerce une certaine action catalytique sur les solutions minérales ; quant au noir animal, il agit chimiquement et réduit les oxydes des sels métalliques (sels de plomb, cuivre, fer, etc.).

2° PURIFICATION PAR ACTION CHIMIQUE. — On réussit à adoucir l'eau en la traitant par le fer, l'alumine, l'alun, le permanganate de potasse, le lait de chaux, le phosphate de sodium, le phosphate acide de chaux, etc.

Les carbonates de chaux et de magnésie sont précipités, puis séparés par simple décantage ou par filtration.

Les Chinois, depuis un temps immémorial, clarifient leurs eaux de boisson par l'alun. Ce produit est inoffensif, il précipite les matières organiques et ne laisse dans l'eau aucun élément nuisible ou même susceptible d'altérer le goût. On l'emploie généralement à raison de 15 à 30 milligrammes par litre d'eau ; mais on peut, sans inconvénient, forcer la dose jusqu'à 60 et même 70 milligrammes.

Le permanganate de potassium, réducteur énergique, détruit les microbes et stérilise l'eau comme l'alun.

Les explorateurs et prospecteurs de mines qui ont pour principe de tenir toutes les eaux en suspicion ne les boivent qu'après une enquête sérieuse et, le cas échéant, après purification.

Toute eau contaminée n'est bonne à boire que si elle a été soumise à l'ébullition ou stérilisée avec une pincée de permanganate de potassium ou d'alun.

Naturellement, les eaux impures ou même saumâtres sont toujours utilisables pour préparer le café, le thé, ainsi que pour tous les usages de la cuisine, parce qu'elles sont purifiées par le fait de l'ébullition prolongée.

Le professeur D^r Vaillard a mis à la disposition des troupes coloniales un mode de stérilisation très pratique et qui s'applique aux eaux réputées malsaines ou même simplement suspectes.

Les soldats reçoivent des pastilles comprimées du poids de $\frac{1}{3}$ gramme chacune et numérotées 1, 2 et 3.

Le comprimé n° 1 est composé de :

iodure de potassium	10 p. en poids
iodure de sodium	1,5 —

Le n° 2 est de l'acide tartrique, à raison de 10 p. en poids, et le n° 3 de l'hyposulfite de sodium pour 11,5 parties.

Dans un quart de litre d'eau on fait successivement dissoudre une pastille n° 1, puis une pastille n° 2. La liqueur obtenue est suffisante pour stériliser un litre d'eau en dix minutes.

L'eau est stérilisée et rendue potable ; toutefois elle conserve encore quelques traces d'iode dont l'absorption pourrait à la longue fatiguer l'organisme ; c'est pourquoi l'on recommande de ne pas faire usage de cette eau pendant plus de quinze jours consécutifs.

Si l'on veut se borner à adoucir l'eau, on peut employer la *permutite*, du D^r Gans de Berlin ; ce produit se prépare en fondant ensemble du quartz, du kaolin et du carbonate de soude, et traitant ensuite par l'eau qui sépare un silico-aluminate de sodium, analogue aux zéolites naturels.

C'est la *permutite sodique*.

Le D^r Gans prépare également des permu-

tites calcique, potassique, manganésique, etc.

L'adoucissement de l'eau se fait en la filtrant à travers une certaine quantité de permutite contenue entre deux couches de graviers.

Si la dureté est due au bicarbonate de calcium et de magnésium, il se forme, par *permutation*, du bicarbonate de sodium; lorsqu'elle est causée par des sulfates, c'est du sulfate de sodium qui permute.

Le filtre à permutite donne une eau adoucie, mais non stérilisée.

PURIFICATION PAR ÉBULLITION. — Pasteur a établi, le premier, qu'aucun germe vivant ne pouvait résister à une température de 110 à 120°C., et qu'une eau maintenue à cette température pendant un quart d'heure était complètement stérilisée.

C'est pourquoi, en temps d'épidémie, on recommande, comme mesure impérieuse et urgente, de faire bouillir l'eau destinée à la boisson.

Or l'ébullition à l'air libre est absolument insuffisante et on ne peut obtenir d'effet complet que si l'on maintient l'eau à une température voisine de 110° C.

Mais s'il est vrai que l'eau bouillie, dans les circonstances que je viens d'indiquer, est stérilisée, il faut reconnaître toutefois qu'elle ne répond plus aux conditions d'une bonne eau potable. Elle est devenue fade et indigeste; elle n'a plus de gaz en dissolution et les sels minéraux qu'elle convoyait sont détruits ou transformés. Bref, elle a perdu ses qualités de fraîcheur et de potabilité.

Pour y remédier, on a proposé de la chauffer sous pression entre 110 et 115° sans la faire bouil-

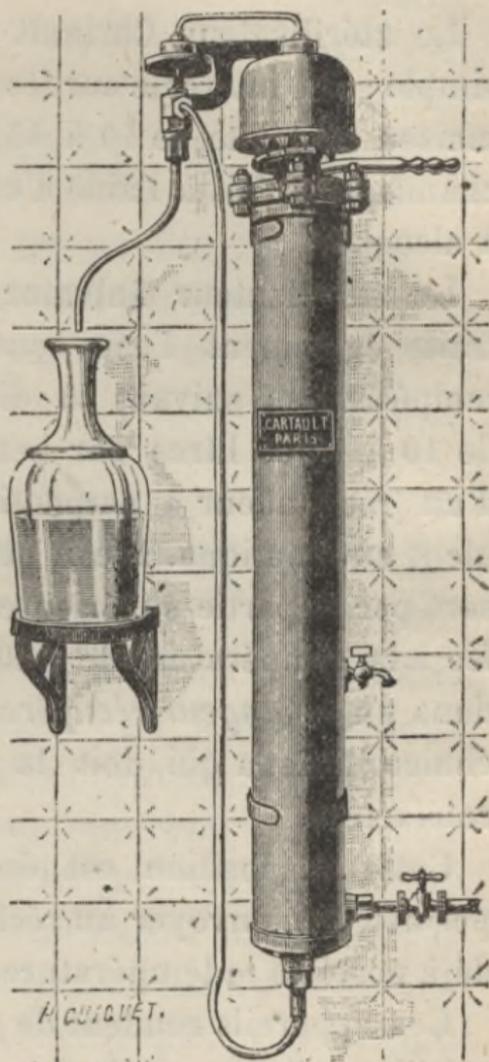


Fig. 80. — Filtre Cartault.

lir ; c'est le but des appareils Cartault et Vaillard.

Le stérilisateur Cartault (fig. 80) est assez simple ; il s'intercale sur les conduites d'eau de maison et débite de 10 à 15 litres à l'heure. Le chauffage se fait à l'aide d'un brûleur à gaz ou à alcool.

Le stérilisateur Salvator, système Vaillard, traite également l'eau sous pression à haute température ; suivant sa dimension, il débite de 10 à 1.000 litres par heure. Il se compose d'un réchauffeur à serpentin et à fonctionnement automatique. L'eau qui arrive par le bas sort par la partie supérieure après s'être échauffée à la température de 110° ; elle passe alors dans un *échangeur-récupérateur* où elle cède sa chaleur à l'eau qui doit la remplacer dans le caléfacteur.

Cette disposition est économique car elle permet de n'envoyer au réchauffeur qu'une eau déjà portée à la température de 90 à 95° .

Ces appareils rendent de grands services ; ils stérilisent l'eau sans la faire bouillir et en lui conservant la majeure partie de ses gaz et de ses sels.

CHAPITRE III

PURIFICATION ET STÉRILISATION DES EAUX DE BOISSON EAUX DE VILLES

I

UTILISATION DES EAUX DE RIVIÈRE

L'alimentation en eaux potables des grandes agglomérations humaines est l'un des plus importants problèmes de l'hygiène moderne.

La simple épuration, que l'on considérait comme suffisante avant les grandes découvertes de Pasteur, doit être maintenant complétée par la stérilisation, car les eaux de toute provenance renferment des germes microbiens, propagateurs des épidémies. Il semble établi, en effet, que l'eau véhicule les germes de la fièvre typhoïde, du choléra, de la dysenterie, etc. « L'eau souillée, a dit le D^r Brouardel, crée à la fois

des épidémies à extrême diffusion qui embrassent toute une ville et des infections localisées à une maison, à une famille, ou même à un seul individu. »

On sait que le sol recèle des micro-organismes de tous genres. Les uns, utiles à la végétation, fixent l'azote de l'air, décomposent le nitrate et les matières organiques ; les autres, sortis de matières en décomposition ou en putréfaction, sont au contraire très nuisibles.

Un hygiéniste allemand, M. Fraenkel, a conclu de ses recherches relatives à la dissémination des bactéries dans le sol que celles-ci décroissent en nombre à mesure qu'on pénètre en profondeur et peuvent même disparaître à quatre ou cinq mètres de la surface. Mais il constate, d'autre part, qu'un sol stérile peut rapidement, en quelques mois, se peupler de bactéries et que le froid de l'hiver qui diminue les germes à la surface du sol produit peu d'effet en profondeur.

Toutefois, le fait important est la disparition des bactéries en profondeur, fait que l'on connaît d'ailleurs depuis longtemps, et c'est la raison pour laquelle on a toujours recherché les eaux profondes pour l'alimentation des villes. Malheureusement ces eaux ne sont pas toujours abon-

dantes et, d'autre part, elles peuvent ne pas répondre à toutes les exigences de l'hygiène.

C'est ainsi que l'on se trouve forcément amené à faire usage des eaux de surface qu'il faut alors purifier et stériliser, car elles sont polluées par des déjections de toutes sortes et convoyent en dissolution une grande variété de principes toxiques.

On a dit avec raison que la contamination des rivières, si considérable à leur sortie des villes, s'atténue en aval et finit même par disparaître. C'est qu'en effet le soleil, la lumière, l'air, l'agitation des vagues, les variations de température, etc., sont autant d'agents qui produisent la séparation et même la décomposition des matières véhiculées; d'autre part, les matières organiques entraînées sont consommées par les êtres vivants qui pullulent dans les cours d'eau ou oxydées par l'oxygène de l'air dissous.

C'est pour ces causes que le Rhin, si contaminé en sortant de Cologne, se trouve complètement purifié à 25 kilomètres plus bas. La Seine, dont le cours est lent, met plus de temps à se purifier, car les eaux de Paris ne sont potables qu'à 425 kilomètres en aval.

Or, si l'on veut utiliser ces eaux de rivière

avant que leur purification naturelle ait pu s'effectuer, il est de toute nécessité de les stériliser. On y parvient par divers procédés et, particulièrement, par la **filtration** et le **traitement chimique**.

II

PROCÉDÉS DE FILTRATION

Le filtrage a pour objet de réaliser artificiellement le travail de purification qui se produit dans la nature quand les eaux de pluie traversent des strates perméables et descendent sur un niveau d'écoulement imperméable. Ces eaux se clarifient et subissent une oxydation d'autant plus accentuée qu'elles filtrent sur une plus grande épaisseur de roches.

Les filtres industriels sont dits **noyés** ou **non submergés**, selon que l'eau recouvre les sables sur une certaine hauteur ou n'en remplit que les vides.

1° FILTRES A SABLE NOYÉS

L'idée des filtres industriels à sable, pour la purification des eaux, est due à l'ingénieur anglais Simpson qui les installa à Londres, en

1828, dans le but d'utiliser l'eau de la Tamise à l'alimentation de la ville.

La construction des bassins de filtrage est des

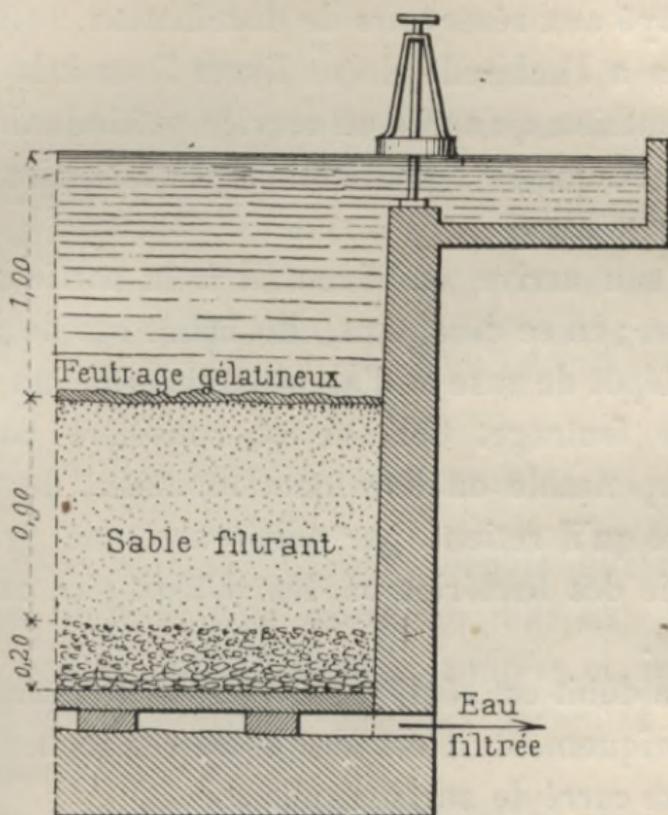


Fig. 81. — Filtre noyé.

plus simple. Le sable, tamisé au crible d'un demi-millimètre, forme une couche de 0,80 à 1 mètre d'épaisseur au-dessus d'un fond de graviers et de gros cailloux ou d'un drainage en briques (fig. 81).

L'eau recouvre le sable sur une hauteur d'au moins un mètre, hauteur indispensable pour fournir la pression de débit. Le liquide filtré est envoyé aux réservoirs de distribution.

On a l'habitude de ne livrer l'eau à la consommation qu'après un service préliminaire de trois ou quatre semaines, temps nécessaire pour laver le filtre.

L'eau arrive en éventail à la partie supérieure; en se décantant, elle laisse sur le sable un dépôt de vase et d'algues qui forme un véritable feutrage. Celui-ci est considéré comme indispensable au bon fonctionnement du filtre parce qu'il retient par adhérence une grande partie des bactéries ou les détruit par oxydation¹.

Le débit est réglé par la vitesse de filtration; théoriquement il est de 4 mètres cubes par mètre carré de surface sableuse.

Le nettoyage du filtre se fait à la raclette; il doit être fréquemment renouvelé.

¹ M. Dunbar explique ainsi l'effet stérilisant du feutrage. Cette matière gélatineuse possède une grande puissance d'absorption des gaz et se tapisse de micro-organismes qui se nourrissent de matériaux apportés par l'eau; d'ailleurs, sa surface active est considérablement augmentée du fait qu'elle est gondolée, crevassée, trouée de poches, conditions favorables à la multiplicité des contacts.

Un bon filtre noyé peut réduire à 25 ou 30 p. 100 la proportion des matières organiques de l'eau, mais il ne donne jamais une stérilisation complète.

Il présente d'assez graves inconvénients. Ainsi, par exemple, il se prête à la formation de *renards* dans la couche de sable quand l'eau la traverse trop rapidement ; d'autre part, si la filtration est très lente, l'eau devient plus ou moins stagnante et les algues, diatomées, spongi, etc., se développent facilement.

2° FILTRES NON SUBMERGÉS

Au filtre noyé on oppose, depuis quelques années, le filtre non submergé (fig. 82) dont l'effet bactéricide paraît plus complet et qu'on établit sur les principes suivants formulés par MM. Miquel et Mouchet¹.

1° La vitesse de passage de l'eau diminue avec la grosseur du sable et le volume d'eau distribué sur le filtre.

2° Le sable doit être uniforme et moyennement fin ; celui qui convient le mieux passe au tamis

¹ Nouveaux filtres à sable non submergés, par Félix Marboutin. *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils de France*, février 1909.

de 1,5 mm. Un sable trop fin favorise la stagnation de l'eau et présente une grande résistance au filtrage.

3° La couche de sable doit avoir une épais-

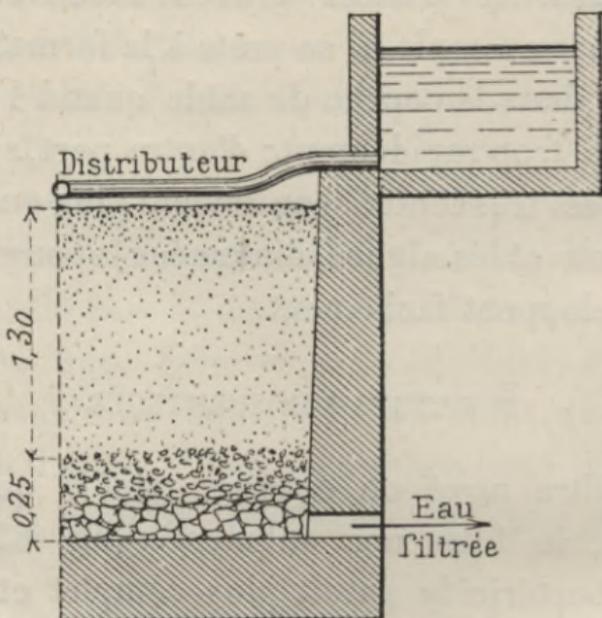


Fig. 82. — Filtre non submergé.

seur minimum de 1,20 m. Elle repose sur un drain de gravier et cailloux ou sur des dalles filtrantes au-dessus de murettes en briques.

4° Une bonne vitesse de filtration correspond à un passage de 6 à 7 mètres cubes d'eau par mètre carré de surface filtrante et par vingt-quatre heures.

Le filtre non submergé qui réalise ces diverses conditions fournit une eau claire, salubre et stérilisée à 1 ou 2 p. 100.

Il n'est pas exposé à la production de *renards* dans la masse sableuse et, si l'on a pris soin de le surmonter d'une couverture ou toiture, sa surface n'est jamais souillée par des formations d'algues.

Il paraît plus avantageux que le filtre noyé parce qu'il stérilise mieux; son débit est plus régulier et il ne contient jamais d'eaux stagnantes.

On calcule la capacité d'un filtre submergé d'après la quantité d'eau nécessaire pour remplir tous les vides de la couche sableuse et qu'on évalue en moyenne à 35 p. 100.

Une application intéressante en a été faite à Châteaudun, par M. Baudet, pour l'alimentation des eaux de la ville.

3° FILTRAGE MÉTHODIQUE

MM. Puech et Chabal ont perfectionné notablement le procédé du filtrage au sable en pratiquant la purification méthodique au moyen de trois opérations successives :

a) Un **dégrossissage** sur une superposition de

lits de graviers de moins en moins gros, pour retenir les matières en suspension.

b) Une filtration rapide ou préfiltration, qui arrête les oxydes métalliques, les algues et une partie des bactéries, et atténue notablement les teneurs en ammoniacque libre et en matières organiques.

c) Une filtration lente, sur filtre noyé ou non, qui produit une action oxydante.

Les dégrossisseurs qui commencent la clarification se salissent vite, mais ils sont faciles à laver; par contre, les préfiltres et les filtres résistent longtemps et peuvent fonctionner de six à douze mois sans nettoyage.

Les dégrossisseurs retiennent environ 90 p. 100 des micro-organismes, les préfiltres 98 p. 100 du restant et les filtres finisseurs 99,5 à 99,8 de ce qui arrive jusqu'à eux.

Le procédé Puech et Chabal a été appliqué à Magdebourg, Paris, Londres, Port-Saïd, Cherbourg, Valenciennes, Nancy, etc.

L'installation de Port-Saïd comprend.

Pour le dégrossissage. — Quatre jeux de filtres dégrossisseurs à 2 compartiments et d'une surface totale de 600 mètres carrés.

On les nettoie en les traversant de bas en haut par un violent courant d'eau et d'air comprimé ; c'est naturellement le premier dégrossisseur qui exige les plus fréquents nettoyages.

Pour la préfiltration. — Seize bassins pré-filtres remplis de gros sable au-dessus d'un drain en briques perforées.

La vitesse de préfiltration est de 10 mètres cubes par mètre carré de surface filtrante, en vingt-quatre heures.

Le nettoyage se fait par décroustage de la surface sur une épaisseur de 3 à 4 centimètres.

Pour la filtration. — La purification s'achève dans des filtres finisseurs renfermant une couche de sables fins d'un mètre d'épaisseur, sur un drain recouvert de 0,15 à 0,20 m. de gravier.

L'eau des préfiltres arrive par le haut, traverse les filtres et remonte dans des réservoirs surélevés de 34 mètres.

La vitesse de filtration correspond à un débit de 3,5 mètres cubes par mètre carré filtrant en vingt-quatre heures.

L'eau ainsi purifiée et destinée à la consommation ne contient plus qu'un très petit nombre de bactéries.

En résumé, la filtration mécanique par l'un quelconque des procédés que je viens d'indiquer, assainit et clarifie, mais n'élimine pas tous les germes virulents d'une eau originairement contaminée. Elle ne résout donc pas complètement le problème de la stérilisation réclamée aujourd'hui et imposée partout pour l'alimentation des grandes villes.

D'ailleurs les filtres à sable sont très dispendieux et leur installation comporte l'occupation d'un vaste terrain. On calcule, en effet, qu'une bonne clarification par filtre noyé, correspond pratiquement à un débit qui ne dépasse pas 2 mètres cubes par mètre carré de surface filtrante en vingt-quatre heures.

Pour alimenter en eau potable une population de 50.000 habitants par exemple, à raison de 150 litres par personne et par jour, ce qui représente 7.500 mètres cubes, il faudrait compter de 5.000 à 6.000 mètres carrés de terrain pour les filtres, sans préjudice des emplacements destinés aux décanteurs et aux divers services de l'entreprise.

III

PURIFICATION PAR TRAITEMENT
CHIMIQUE

Le moyen le plus sûr de stériliser complètement les eaux est de les soumettre à une action oxydante assez énergique pour détruire les matières organiques et les bactéries.

Dans ce but, on fait usage de certains produits chimiques comme l'alun, les hypochlorites, le chlorure de chaux commercial, ou bien encore on fait intervenir l'ozone et les rayons ultraviolets.

1^o CLARIFICATION PAR L'ALUN

L'emploi de l'alun à raison de 60 à 70 grammes par mètre cube, donne de bons résultats et ne présente aucun inconvénient, car le coagulant se précipite avec les matières en suspension; il n'en reste donc plus trace lorsque l'eau a été décantée et filtrée.

La stérilisation des eaux de la ville de Buenos-Ayres est faite avec l'alun dans des conditions

très satisfaisantes¹. Pour un traitement de 51.923.500 mètres cubes d'eau, il a été employé 3.115.409 kilos d'alun, ce qui correspond à 60 grammes par mètre cube.

2° STÉRILISATION PAR LE CHLORE ET LES HYPOCHLORITES

L'un des meilleurs procédés de stérilisation chimique des eaux est basé sur l'emploi de l'hypochlorite de chaux commercial, titrant 35 p. 100 de chlore.

En présence de l'acide carbonique dissous dans l'eau, l'hypochlorite donne de l'acide hypochloreux qui oxyde les matières organiques et détruit les germes pathogènes.

Le procédé ne clarifie pas l'eau et doit, par conséquent, s'appliquer à des eaux préalablement filtrées, mais il assure une stérilisation parfaite. Toutefois il présente l'inconvénient d'augmenter un peu la dureté des eaux et de leur laisser un léger goût de chlore désagréable au palais.

Il a été appliqué à la purification des eaux de

¹ Dr Lavallo. *Classification de certaines eaux potables de la République Argentine*. Congrès de Chimie appliquée tenu à Londres en 1909. (Section d'hygiène et de chimie médicale.)

la Rockaway River, pour l'alimentation de la ville de Jersey, aux États-Unis.

La dissolution d'hypochlorite s'effectue dans de petites cuves cylindriques de 2 mètres de diamètre et 1 mètre de profondeur ; elle est ensuite diluée dans de grands réservoirs de 45 mètres cubes de capacité. C'est ce mélange stérilisateur qu'on introduit par doses déterminées dans les conduites d'eau.

On obtient une stérilisation complète avec une dépense de 2 centimes environ par mètre cube.

Le même procédé a été essayé sur les eaux de la Seine, à Paris, pendant les grandes chaleurs de l'année 1911. Il se recommande surtout dans les cas urgents et l'on a pu reconnaître qu'il est très efficace au point de vue de la stérilisation.

On peut également faire usage de l'hypochlorite de sodium en solutions à 4 p. 100 ; dans l'un et l'autre cas, on calcule qu'il faut dégager 2 grammes de chlore par mètre cube d'eau.

Procédé Rouquette. — On fait réagir sur l'hypochlorite de sodium une solution de bisulfate de sodium à laquelle on ajoute de l'eau oxygénée concentrée.

Il se produit de l'ozone et des composés peroxydés du chlore qui assurent la stérilisation.

Un gramme de ce mélange par mètre cube d'eau permet d'obtenir une bonne stérilisation de fortune.

Procédé Duyk. — M. Duyk emploie, comme stérilisateurs, le chlorure de chaux et le sulfate d'alumine légèrement ferrugineux qui détruisent presque toutes les matières organiques sans laisser de résidus dangereux¹.

Dans l'eau, le sulfate d'alumine et de fer se transforme en alumine et oxyde de fer qui entraînent, par collage, les matières tenues en suspension.

Le chlorure de chaux commercial, dont la partie active est l'hyperchlorite de calcium et l'hydroxyde de fer, agit chimiquement.

On emploie 20 grammes de sulfate d'alumine et 2 à 4 grammes de chlorure de chaux par mètre cube d'eau à traiter.

La série des appareils Duyk comprend :

¹ Diénert. Le concours d'essai d'épuration de l'eau du canal alimentant la ville de Marseille. *Bulletin de l'Union des Services municipaux techniques*, juin, 1911.

Van der Made. *De la stérilisation industrielle des eaux potables en France*. Congrès de Chimie appliquée, Londres, 1909.

Un filtre dégrossisseur à silex concassés ;

Un décanteur ;

Un récipient pour les réactifs ;

Un réservoir pour le mélange et le malaxage des réactifs avec l'eau ;

Un filtre.

Le procédé Duyk donne une bonne clarification et une stérilisation satisfaisante ; il fonctionne actuellement à Middelkerke et Haselt en Belgique, à Lectoure et Larbresle en France.

On estime que le coût du traitement est d'environ 1 centime par mètre cube d'eau traitée ¹.

Le procédé Desrumeaux qui présente une certaine analogie avec le système Duyk est surtout employé à l'épuration des eaux industrielles.

3^o STÉRILISATION PAR L'AIR OZONISÉ

L'emploi de l'ozone pour stériliser les eaux est de date récente.

Tout le monde connaît les propriétés de l'ozone ou oxygène électrisé, dont l'odeur pénétrante se fait sentir dans l'air à l'infime teneur d'un millionième. Ce gaz est un oxydant des plus

¹ Van der Made. *Op. cit.*

énergiques lorsqu'il est humide ; il décompose les produits nitreux, oxyde l'ammoniaque et les matières organiques et détruit les micro-organismes.

L'expérience a montré que l'ozone débarrasse complètement l'eau du colibacille, ce que le filtrage au sable ne fait pas avec certitude. On peut dire, d'ailleurs, que l'ozonisation détruit tous les germes pathogènes et stérilise absolument l'eau.

L'opération est simple. L'air atmosphérique, préalablement desséché, passe dans des *ozoneurs* en batterie où des effluves électriques le transforment en ozone ; celui-ci est injecté, par le bas, dans un réservoir où l'eau est distribuée en jets très divisés.

Il faut compter de 1 à 3,5 mmg. d'ozone par litre d'air et 0,6 gr. par mètre cube d'eau.

On fait usage du courant électrique continu à 110 volts que l'on transforme en un courant de haute tension atteignant jusqu'à 20.000 volts avec cinq cents périodes et fournissant 1.000 décharges par seconde ; naturellement, le rendement en ozone est fonction de la fréquence des décharges.

Le premier modèle d'ozoneur industriel des-

tiné à la stérilisation des eaux date de 1893 ; il est dû à M. Tindal dont le procédé a été perfectionné par M. de Frise et porte maintenant le nom de *Tindal-de Frise*.

Postérieurement, d'autres appareils ont été établis par MM. Siemens et Halske, M. Marius Otto, MM. Marmier et Abraham, etc.

Mais quels que soient les appareils préférés, le procédé de stérilisation de l'eau, préalablement clarifiée et filtrée, comporte deux opérations consécutives.

1° L'ozonation de l'air sec, au moyen d'un appareil émetteur d'effluves qu'on appelle **ozoneur** ou **ozoniseur**.

2° Le brassage de l'air ozoné avec l'eau à stériliser dans un stérilisateur ou un émulseur.

Les ozoneurs sont des vases fermés contenant deux électrodes entre lesquelles circule l'air à ozoniser. Les uns sont à *diélectriques* (Otto, Marmier-Abraham, Siemens et Halske) ; les autres n'ont pas de diélectriques (de Frise).

Les diélectriques, qui sont généralement en verre, ont pour but d'empêcher la formation d'arcs qui donnent un mauvais rendement d'ozone.

L'ozoneur Siemens- de Frise porte des dié-

lectriques cylindriques en verre formant des électrodes extérieures reliées à la terre et contenant des cylindres en aluminium; on fait passer, dans les électrodes, un courant monophasé de 7.000 volts.

Dans l'ozoniseur à diélectrique de M. Otto, les électrodes sont des plaques de verre recouvertes d'étain et reliées alternativement au conducteur du courant à haute tension et à la terre. Ces plaques sont constamment refroidies.

L'ozoniseur Siemens est une combinaison des tubes de Berthelot et de Houzeau fonctionnant à 8.000 volts.

Dans les ozoniseurs sans diélectriques, les effluves jaillissent entre des pointes et des surfaces métalliques reliées à la terre; ces appareils sont plus robustes que les précédents, mais leur rendement est moindre.

Les divers procédés de stérilisation par l'ozone ne diffèrent entre eux que par leur façon d'opérer l'ozonisation et le brassage de l'eau.

SYSTÈME TINDAL-DE FRISE. — Le brassage de l'eau avec l'ozone s'effectue dans une colonne en fonte émaillée de 8 mètres de hauteur; l'eau et l'air ozonisé entrent ensemble par le bas et

sortent à la partie supérieure. Des cloisons horizontales en celluloid perforé favorisent les contacts et le mélange.

SYSTÈME OTTO. —

L'air ozonisé agit sur l'eau dans un émulseur et un stérilisateur à plateaux.

L'émulseur est une trompe dans laquelle l'eau provoque l'appel de l'ozone et son barbotage avec le liquide (fig. 83).

La stérilisation s'achève dans une colonne à plateaux de 3 mètres de hauteur où l'eau très divisée ruisselle dans

une atmosphère d'air ozoné. La figure 84 empruntée au journal *L'eau pure* du mois de juin 1910, montre la disposition générale d'une usine Otto.

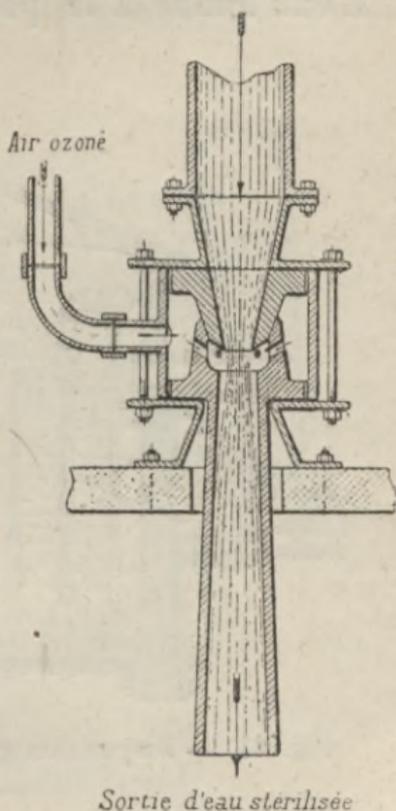


Fig. 83. — Emulseur Otto.

SYSTÈME MARMIER ET ABRAHAM. — La stérilisa-

tion s'effectue dans une colonne en maçonnerie de 7 à 8 mètres de hauteur remplie de pierres.

L'eau tombe à la partie supérieure en nom-

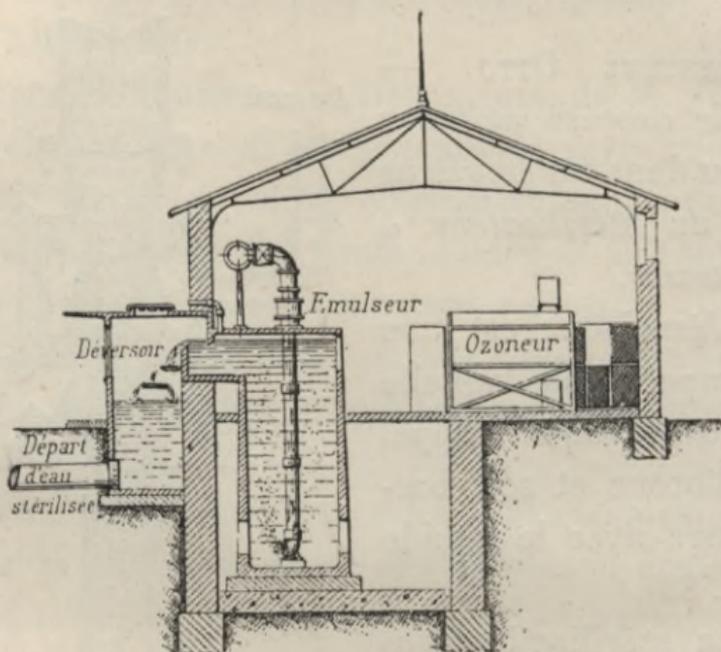


Fig. 84. — Disposition générale d'une usine Otto.

breux filets, traverse la colonne et se mélange à l'ozone qui vient en sens contraire.

La colonne Marmier et Abraham fonctionne seule ou avec un émulseur Otto ; elle a été primée au Concours de la Ville de Paris, en 1908.

La figure 85 montre l'appareil à colonne et émulseur qui a été utilisé à ce concours.

Ces divers procédés ne sont applicables qu'à une eau préalablement filtrée et un air desséché à 70 ou 75 p. 100 avant d'être envoyé aux ozoniseurs.

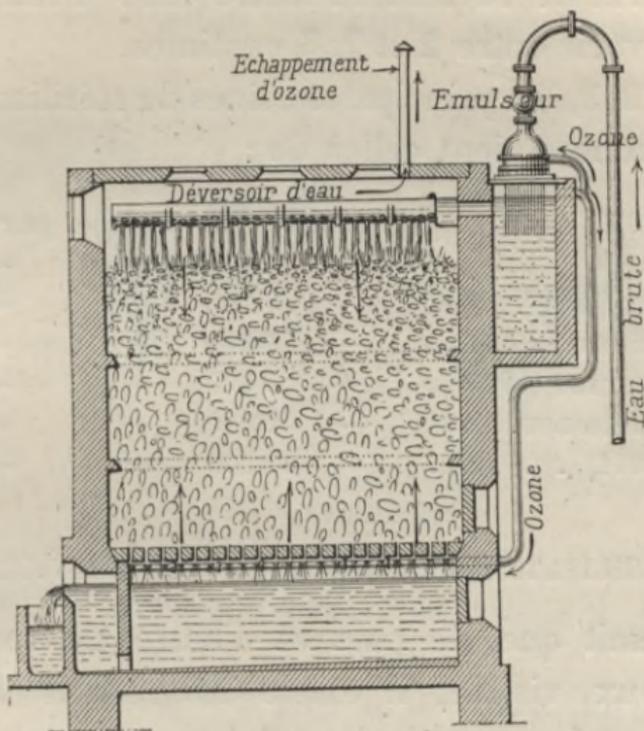


Fig. 85. — Colonne Marmier et Abraham, avec émulseur (d'après M. Bruère).

D'après M. Marmier¹, la dépense de courant électrique correspondant à la stérilisation de 4.000 mètres cubes d'eau filtrée est la suivante :

¹ L. Marnier. La stérilisation des eaux potables par l'ozone et par les rayons ultra-violetts. *Bulletin de l'Institut Pasteur*, 15 novembre 1911.

Par barbotage	80,00 kw-heure.	
— ruissellement.	64,86	—
— — avec émulseur. . .	100,26	—
— barbotage avec émulseur	77,36	—

Le prix de revient du mètre cube d'eau stérilisée varie entre 2 et 2, 5 centimes.

En 1913, les principales usines de stérilisation par l'ozone étaient celles de :

NICE (1905).	pour 38.000 m. cubes par jour.		
COSNE (1906)	— 2.400	—	—
CHARTRES (1908).	— 6.000	—	—
ARMENTIÈRES (1909)	— 3.600	—	—
HERMANNSTADT (1909)	— 3.800	—	—
SAINT-PÉTERSBOURG (1910).	— 52.000	—	—
PARIS (1911)	— 90.000	—	—

4^o STÉRILISATION PAR LES RAYONS ULTRA-VIOLETS

On sait que, de part et d'autre du spectre lumineux visible, il existe des rayons ultra-rouges et des rayons ultra-violets qui échappent à nos sens et jouissent de propriétés spéciales.

Les rayons ultra-violets, en particulier, possèdent une action chimique d'une grande nocivité et stérilisent l'eau aussi efficacement que l'ozone. On les met en œuvre au moyen de lampes en quartz, à vapeur de mercure, qui sont tantôt immergées dans l'eau à traiter (Pro-

cédé Triquet-Nogier), tantôt manœuvrées à l'air libre (Procédé Westinghouse); l'action bactéricide s'exerce jusqu'à la distance de 0,30 m. environ.

La stérilisation comporte une dépense de

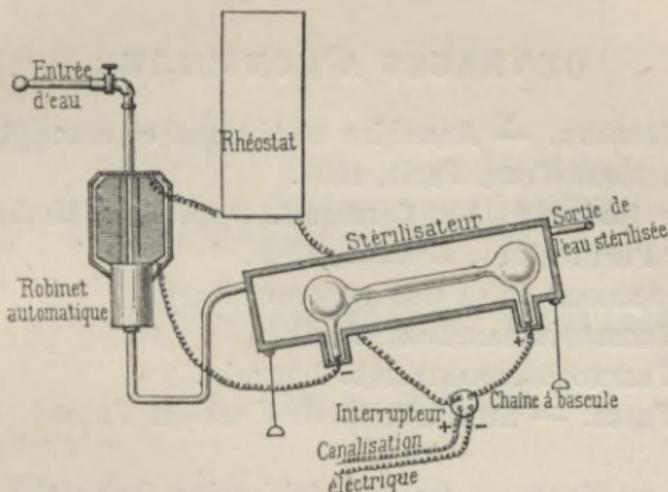


Fig. 86. — Schéma et coupe du stérilisateur Nogier.

50 à 60 watts-heure par mètre cube, lorsqu'on opère sur une eau parfaitement clarifiée.

Le petit stérilisateur Nogier (fig. 86), qui mesure 0,36 m. de longueur et 0,09 m. de diamètre, est un réservoir métallique portant une lampe en quartz sur laquelle s'étale la distribution d'eau que l'on règle au débit de 700 à 800 litres à l'heure.

Il semble établi que les rayons ultra-violets

produisent de l'ozone ; celui-ci se trouverait donc constituer le principe actif de la stérilisation. Toutefois on reprocherait au procédé de donner lieu à la formation de petites quantités d'eau oxygénée.

OUVRAGES A CONSULTER

D^r IMBEAUX. — Annuaire statistique et descriptif des distributions d'eau. Paris, 1909.

JOHN DON AND JOHN CRISHOLM. — Modern Methods of Water Purification. London, 1911.

LES ANNALES DE LA CONSTRUCTION. Paris.

LA TECHNIQUE SANITAIRE. Paris.

LA TECHNOLOGIE SANITAIRE. Louvain.

DE FRISE. — Stérilisation de l'eau par l'ozone. Paris, 1907.

VAN DE MADE. — De la stérilisation industrielle des eaux potables en France. *Congrès de chimie appliquée*. Londres, 1909.

GRIM ET WELDERT. — La stérilisation de l'eau au moyen des rayons ultra-violet. *Mitteilungen aus der K. Prüfungsanstalt für Wasserversorgung und Abwässerbesetz*. Berlin, 1911, fasc. 11.

TROISIÈME PARTIE

**LÉGISLATION DES SOURCES
ET DES EAUX**

LÉGISLATION DES SOURCES, EAUX PLUVIALES ET EAUX COURANTES

Le régime légal des sources et des eaux courantes est établi par les articles 552, 641, 642, 643 et 644 du Code civil, et surtout par la loi du 8 avril 1898 qui a apporté certaines modifications au texte de ces articles, mais sans rien innover en ce qui concerne les sources et leur propriété.

D'autre part, les sources et cours d'eau sont protégés contre les abus du déboisement et contre le défrichement par la loi du 18 juin 1859 qui modifie les dispositions transitoires des articles 219 et suivants du Code forestier, titre XV.

Enfin, la loi du 15 février 1902, relative à l'hygiène et à la santé publique, établit des dispositions spéciales pour protéger les sources, les puits, les captages et les galeries qui fournissent aux communes des eaux potables.

Le régime des sources en Algérie a été fixé par la loi du 16 juin 1851.

I

PROPRIÉTÉ DES SOURCES

ART. 552, 641, 642 ET 643 DU CODE CIVIL

ART. 552. — La propriété du sol emporte la propriété du dessus et du dessous.

Le propriétaire peut faire au-dessus toutes les plantations et constructions qu'il juge à propos, sauf les exceptions établies au titre des **Servitudes ou services fonciers**.

Il peut faire au-dessous toutes les constructions et fouilles qu'il jugera à propos et tirer de ces fouilles tous les produits qu'elles peuvent fournir, sauf les modifications résultant des lois et règlements relatifs aux mines et des lois et règlements de police.

Cet article 552 donne donc au propriétaire du sol la propriété des eaux souterraines qui passent sous son fonds, ainsi que le droit d'extraire ces eaux par sondages, puits et captages à telle profondeur qu'il lui plaît, et pour en disposer à son profit.

Ces droits sont spécifiés et particulièrement reconnus par les articles 641, 642 et 643 du Code civil, qui ont été remplacés et complétés par la loi plus générale du 8 avril 1898.

II

LOI DU 8 AVRIL 1898
SUR LE RÉGIME DES EAUX

TITRE PREMIER

EAUX PLUVIALES ET SOURCES

a) *Propriété des eaux de source et des eaux pluviales.*

ARTICLE PREMIER. — Les articles 641, 642 et 643 du Code civil sont remplacés par les dispositions suivantes :

« ART. 641. — Tout propriétaire a le droit d'user et de disposer des eaux pluviales qui tombent sur son fonds.

« Si l'usage de ces eaux ou la direction qui leur est donnée aggrave la servitude naturelle d'écoulement établie par l'article 640, une indemnité est due au propriétaire du fonds inférieur.

« La même disposition est applicable aux eaux de sources nées sur un fonds.

« Lorsque, par des sondages ou des travaux souterrains, un propriétaire fait surgir des eaux dans son fonds, les propriétaires des fonds inférieurs doivent les recevoir; mais ils ont droit à une indemnité en cas de dommage résultant de leur écoulement.

« Les maisons, cours, jardins, parcs et enclos attenants aux habitations ne peuvent être assujettis à aucune aggravation de la servitude d'écoulement dans les cas prévus par les paragraphes précédents.

« Les contestations auxquelles peuvent donner lieu l'établissement et l'exercice des servitudes prévues par ces paragraphes et le règlement, s'il y a lieu, des indemnités dues aux propriétaires des fonds inférieurs sont portées, en premier ressort devant le juge de paix du canton qui, en prononçant, doit concilier les intérêts de l'agriculture et de l'industrie avec le respect dû à la propriété.

« S'il y a lieu à expertise, il peut n'être nommé qu'un seul expert.

b) Restrictions au droit de propriété.

« ART. 642. — Celui qui a une source dans son fonds peut toujours user des eaux à sa volonté dans les limites et pour les besoins de son héritage.

« Le propriétaire d'une source ne peut plus en user au préjudice des propriétaires des fonds inférieurs qui, depuis plus de trente ans, ont fait et terminé, sur le fonds où jaillit la source, des ouvrages apparents et permanents destinés à utiliser les eaux ou à en faciliter le passage dans leur propriété.

« Il ne peut pas non plus en user de manière à enlever aux habitants d'une commune, village ou hameau, l'eau qui leur est nécessaire, mais si les habitants n'en ont pas acquis ou prescrit l'usage, le propriétaire peut réclamer une indemnité, laquelle est réglée par experts.

« ART. 643. — Si, dès la sortie du fonds où elles surgissent, les eaux de sources forment un cours d'eau offrant le caractère d'eaux publiques et courantes, le propriétaire ne peut les détourner de leur cours naturel au préjudice des usagers inférieurs. »

ART. 644 (conservé). — Celui dont la propriété borde une eau courante, autre que celle qui est déclarée dépendance du domaine public par l'article 558 au titre de la **Distinction des biens**, peut s'en servir à son passage pour l'irrigation de ses propriétés.

Celui dont cette eau traverse l'héritage peut même en user dans l'intervalle qu'elle y parcourt, mais à la charge de la rendre, à la sortie de ses fonds, à son cours ordinaire¹.

TITRE II

COURS D'EAU NON NAVIGABLES ET NON FLOTTABLES

CHAPITRE PREMIER

DES DROITS DES RIVERAINS

ART. 2. — Les riverains n'ont le droit d'user de l'eau courante qui borde ou qui traverse leurs héri-

¹ Il est d'usage, par la doctrine et la jurisprudence, que le droit d'usage, appartenant aux riverains sur les eaux qui bordent ou qui traversent leurs fonds, n'est en aucune façon restreint à la seule irrigation et qu'il s'étend à tout autre usage pourvu que le riverain n'absorbe pas une quantité d'eau supérieure à celle qui doit normalement lui revenir et qu'il s'abstienne de la contaminer.

tages que dans les limites déterminées par la loi. Ils sont tenus de se conformer, dans l'exercice de ce droit, aux dispositions des règlements et des autorisations émanées de l'administration.

ART. 3. — Le lit des cours d'eau non navigables et non flottables appartient aux propriétaires des deux rives.

Si les deux rives appartiennent à des propriétaires différents, chacun d'eux a la propriété de la moitié du lit, suivant une ligne que l'on suppose tracée au milieu du cours d'eau, sauf titre ou prescription contraire.

Chaque riverain a le droit de prendre, dans la partie du lit qui lui appartient, tous les produits naturels et d'en extraire de la vase, du sable et des pierres, à la condition de ne pas modifier le régime des eaux et d'en exécuter le curage conformément aux règles établies par le chapitre III du présent titre.

Sont et demeurent réservés les droits acquis par les riverains ou autres intéressés sur les parties des cours d'eau qui servent de voie d'exploitation pour la desserte de leurs fonds.

ART. 4. — Lorsque le lit d'un cours d'eau est abandonné soit naturellement, soit par suite de travaux légalement exécutés, chaque riverain en reprend la libre disposition suivant les limites déterminées par l'article précédent.

ART. 5. — Lorsqu'un cours d'eau non navigable et non flottable abandonne naturellement son lit, les

propriétaires des fonds sur lesquels le nouveau lit s'établit sont tenus de souffrir le passage des eaux sans indemnité; mais ils peuvent, dans l'année qui suit le changement de lit, prendre les mesures nécessaires pour rétablir l'ancien cours des eaux.

Les propriétaires riverains du lit abandonné jouissent de la même faculté et peuvent, dans l'année, poursuivre l'exécution des travaux nécessaires au rétablissement du cours primitif.

ART. 6. — Lorsque, par suite de travaux légalement ordonnés, il y a lieu d'élargir le lit ou d'en ouvrir un nouveau, les propriétaires des terrains occupés ont droit à une indemnité à titre de servitude de passage.

Pour la fixation de cette indemnité, il sera tenu compte de la situation respective de chacun des riverains par rapport à l'axe du nouveau lit, la limite des héritages demeurant fixée conformément aux dispositions du paragraphe 2 de l'article 3 ci-dessus, à moins de stipulations contraires.

Les bâtiments, cours et jardins attenants aux habitations sont exempts de la servitude de passage.

Les contestations auxquelles peuvent donner lieu l'application du paragraphe 2 du présent article et le règlement des indemnités sont jugées en premier ressort par le juge de paix du canton.

S'il y a lieu à expertise, il peut, dans tous les cas, n'être nommé qu'un seul expert.

ART. 7. — La propriété des alluvions, relais, atterrissements, îles et îlots qui se forment dans les

cours d'eau non navigables et non flottables est et demeure régie par les dispositions des articles 556, 557, 559, 561 et 562 du Code civil.

CHAPITRE II

POLICE ET CONSERVATION DES EAUX

ART. 8. — L'autorité administrative est chargée de la conservation et de la police des cours d'eau non navigables et non flottables.

ART. 9. — Des décrets rendus après enquête dans la forme des règlements d'administration publique fixent, s'il y a lieu, le régime général de ces cours d'eau, de manière à concilier les intérêts de l'agriculture et de l'industrie avec le respect dû à la propriété et aux droits et usages antérieurement établis.

ART. 10. — Le propriétaire riverain d'un cours d'eau non navigable et non flottable ne peut exécuter des travaux au-dessus de ce cours d'eau ou le joignant qu'à la condition de ne pas préjudicier à l'écoulement et de ne causer aucun dommage aux propriétés voisines.

ART. 11. — Aucun barrage, aucun ouvrage destiné à l'établissement d'une prise d'eau, d'un moulin ou d'une usine ne peut être entrepris dans un cours d'eau non navigable et non flottable sans l'autorisation de l'administration.

ART. 12. — Les préfets statuent après enquête sur les demandes ayant pour objet :

1° L'établissement d'ouvrages intéressant le régime ou le mode d'écoulement des eaux ;

2° La régularisation de l'existence des usines et ouvrages établis sans permission et n'ayant pas de titre légal ;

3° La révocation ou la modification des permissions précédemment accordées.

La forme de l'instruction qui doit précéder les arrêtés des préfets est déterminée par un règlement d'administration publique.

ART. 13. — S'il y a réclamation des parties intéressées contre l'arrêté du préfet, il est statué par un décret rendu sur l'avis du Conseil d'État, sans préjudice du recours contentieux en cas d'excès de pouvoir.

ART. 14. — Les permissions peuvent être révoquées ou modifiées sans indemnité, soit dans l'intérêt de la salubrité publique, soit pour prévenir ou faire cesser les inondations, soit enfin dans le cas de la réglementation générale prévue par l'article 9.

Dans tous les autres cas, elles ne peuvent être révoquées ou modifiées que moyennant indemnité.

ART. 15. — Les propriétaires ou fermiers de moulins et usines, même autorisés ou ayant une existence légale, sont garants des dommages causés aux chemins et aux propriétés.

ART. 16. — Les maires peuvent, sous l'autorité des préfets, prendre toutes les mesures nécessaires pour la police des cours d'eau.

CHAPITRE III

CURAGES, ÉLARGISSEMENTS ET REDRESSEMENTS

ART. 17. — Dans tous les cas, les droits des tiers sont et demeurent réservés.

ART. 18. — Le curage comprend tous les travaux nécessaires pour rétablir un cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur naturelles, sans préjudice de ce qui est réglé à l'égard des alluvions par les articles 556 et 557 du Code civil.

ART. 19. — Il est pourvu au curage des cours d'eau non navigables et non flottables et à l'entretien des ouvrages qui s'y rattachent de la manière prescrite par les anciens règlements ou d'après les usages locaux.

Les préfets sont chargés, sous l'autorité du ministre compétent, de prendre les dispositions nécessaires pour l'exécution de ces règlements et usages.

ART. 20. — A défaut d'anciens règlements ou usages locaux, ou si l'application des règlements et l'exécution du mode de curage consacré par l'usage présentent des difficultés, ou bien encore si les changements survenus exigent des dispositions nouvelles, il est procédé en conformité de la loi des 21 juin 1865-22 décembre 1888 sur les associations syndicales.

ART. 21. — Dans les cas où les tentatives faites en vue d'arriver à la constitution d'une association syndicale libre ou autorisée n'aboutiraient pas, il

est statué par un décret délibéré en Conseil d'Etat; chaque décret est précédé d'une enquête et d'une instruction dont les formes sont déterminées par un règlement d'administration publique.

ART. 22. — Le décret règle le mode d'exécution des travaux, détermine la zone dans laquelle les propriétaires intéressés, riverains ou non riverains et usiniers, peuvent être appelés à y contribuer, et arrête, s'il y a lieu, les bases générales de la répartition de la dépense d'après le degré d'intérêt de chacun à l'exécution des travaux.

ART. 23. — Dans tous les cas, les rôles de répartition des sommes nécessaires au paiement des travaux de curage ou d'entretien des ouvrages sont dressés sous la surveillance du préfet et rendus exécutoires par lui.

Le recouvrement est fait dans les mêmes formes et avec les mêmes garanties qu'en matière de contributions directes.

Le privilège ainsi créé prendra rang immédiatement après celui du Trésor public.

ART. 24. — Toutes les contestations relatives à l'exécution des travaux, à la répartition de la dépense et aux demandes en réduction ou décharge formées par les imposés, sont portées devant le conseil de préfecture, sauf recours au Conseil d'Etat.

ART. 25. — Les travaux d'élargissement, de régularisation et de redressement des cours d'eau non navigables et non flottables, qui seront jugés nécessaires pour compléter les travaux de curage, sont

assimilés à ces derniers, et leur exécution est poursuivie en vertu des articles précédents.

ART. 26. — S'il s'agit de terrains exceptés de la servitude de passage et si, à défaut d'accord, il est nécessaire de recourir à l'expropriation, il est procédé à cette expropriation et au règlement des indemnités conformément aux dispositions combinées de la loi du 3 mai 1841 et des paragraphes 2 et suivants de l'article 16 de la loi du 21 mai 1836.

ART. 27. — Pendant la durée des travaux, les propriétaires sont tenus de laisser passer sur leurs terrains les fonctionnaires et agents chargés de la surveillance, ainsi que les entrepreneurs et ouvriers.

Ce droit devra s'exercer autant que possible en suivant la rive du cours d'eau.

ART. 28. — Si les travaux de curage, d'élargissement, de régularisation et de redressement intéressent la salubrité publique, le décret ou l'arrêté qui les ordonne peut, après avis du Conseil général et des conseils municipaux intéressés, mettre une partie de la dépense à la charge des communes dont le territoire est assaini.

Dans ce cas, le décret ou l'arrêté détermine quelles sont les communes intéressées et fixe la part que chacune d'elles doit supporter dans la dépense.

ART. 29. — La loi du 14 floréal an XI est abrogée.

TITRE III**DES RIVIÈRES FLOTTABLES A BUCHES PERDUES**

ART. 30. — Les rivières et cours d'eau flottables à bûches perdues sont soumis aux dispositions contenues dans le titre précédent et aux dispositions spéciales suivantes.

ART. 31. — Le flottage à bûches perdues ne peut être établi sur les cours d'eau où il n'existe pas actuellement que par un décret rendu après enquête et avis des Conseils généraux des départements traversés par ces cours d'eau. Ce décret sera inséré au *Bulletin des lois*.

Le décret détermine les servitudes nécessaires pour l'exercice du flottage et règle les obligations respectives des propriétaires riverains, des usiniers et des flotteurs.

ART. 32. — L'indemnité due à raison de ces servitudes est fixée en premier ressort par le juge de paix du canton.

Il est tenu compte, dans le règlement de cette indemnité, des avantages qui peuvent résulter de l'établissement du flottage.

ART. 33. — Sont maintenus, tant qu'ils n'auront pas été révisés conformément aux dispositions des articles 31 et 32 ci-dessus, tous les règlements spéciaux relatifs aux rivières et cours d'eau sur lesquels se pratique le flottage à bûches perdues.

TITRE IV**DES FLEUVES ET RIVIÈRES NAVIGABLES OU FLOTTABLES****CHAPITRE PREMIER****DES DROITS DU DOMAINE ET DES RIVERAINS**

ART. 34. — Les fleuves et les rivières navigables ou flottables avec bateaux, trains ou radeaux, font partie du domaine public depuis le point où ils commencent à être navigables ou flottables jusqu'à leur embouchure.

Font également partie du domaine public :

1° Les bras même non navigables et non flottables, lorsqu'ils prennent naissance au-dessous du point où les fleuves et rivières commencent à être navigables ou flottables ;

2° Les noues et boires qui tirent leurs eaux des mêmes fleuves et rivières.

ART. 35. — Les dérivations ou prises d'eau artificielles établies dans des propriétés particulières ne font pas partie du domaine public, à moins qu'elles n'aient été pratiquées par l'Etat, dans l'intérêt de la navigation ou du flottage.

Ces dérivations sont régies par les dispositions des actes qui les ont autorisées.

ART. 36. — Des arrêtés préfectoraux rendus après enquête, sous l'approbation du ministre des Travaux publics, fixeront les limites des fleuves et rivières

navigables et flottables, ces limites étant déterminées par la hauteur des eaux coulant à pleins bords avant de déborder.

Les arrêtés de délimitation pourront être l'objet d'un recours contentieux. Ils seront toujours pris sous la réserve des droits de propriété.

ART. 37. — L'article 563 du Code civil est abrogé et remplacé par les dispositions suivantes :

« ART. 563. — Si un fleuve ou une rivière navigable ou flottable se forme un nouveau cours en abandonnant son ancien lit, les propriétaires riverains peuvent acquérir la propriété de cet ancien lit, chacun en droit soi, jusqu'à une ligne qu'on suppose tracée au milieu de la rivière. Le prix de l'ancien lit est fixé par des experts nommés par le président du tribunal de la situation des lieux, à la requête du préfet du département.

« A défaut par les propriétaires riverains de déclarer, dans les trois mois de la notification qui leur sera faite par le préfet, l'intention de faire l'acquisition aux prix fixés par les experts, il est procédé à l'aliénation de l'ancien lit selon les règles qui président aux aliénations du domaine de l'Etat.

« Le prix provenant de la vente est distribué aux propriétaires des fonds occupés par le nouveau cours, à titre d'indemnité, dans la proportion de la valeur du terrain enlevé à chacun d'eux. »

ART. 38. — Lorsque, à la suite de travaux légalement exécutés, des portions de l'ancien lit cesseront de faire partie du domaine public, les propriétaires

riverains pourront exercer le droit de préemption conformément à l'article 37 qui précède.

ART. 39. — La propriété des alluvions, relais, atterrissements, îles et îlots qui se forment naturellement dans les fleuves et rivières faisant partie du domaine public est et demeure réglée par les dispositions des articles 556, 557, 560 et 562 du Code civil.

CHAPITRE II

DES CONCESSIONS ET AUTORISATIONS

ART. 40. — Aucun travail ne peut être exécuté et aucune prise d'eau ne peut être pratiquée dans les fleuves et rivières navigables ou flottables sans autorisation de l'administration.

ART. 41. — Les préfets statuent, après enquête et sur l'avis des ingénieurs, et sauf recours au ministre, sur les demandes ayant pour objet de faire des prises d'eau au moyen de machines, lorsqu'il est constaté que, eu égard au volume des cours d'eau, elles n'auront pas pour effet d'en altérer le régime.

ART. 42. — Ils statuent également, sur l'avis des ingénieurs, sauf recours au ministre, sur les demandes en autorisation d'établissements temporaires sur les cours d'eau navigables ou flottables, alors même que ces établissements auraient pour effet de modifier le régime ou le niveau des eaux.

Ils fixent, dans ces cas, la durée de l'autorisation, qui ne devra jamais dépasser deux ans.

ART. 43. — Toutes autres autorisations ne peuvent

être accordées que par décrets rendus, après enquête, sur l'avis du Conseil d'Etat.

ART. 44. — Les concessionnaires sont assujettis à payer une redevance à l'Etat, d'après les bases qui seront fixées par un règlement d'administration publique.

ART. 45. — Les prises d'eau et autres établissements créés sur les cours d'eau navigables ou flottables, même avec autorisation, peuvent toujours être modifiés ou supprimés. Une indemnité n'est due que lorsque les prises d'eau ou établissements dont la modification ou la suppression est ordonnée ont une existence légale.

Toutefois, aucune suppression ou modification ne pourra être prononcée que suivant les formes et avec les garanties établies par les articles précédents.

CHAPITRE III

DES SERVITUDES

ART. 46. — Les propriétaires riverains des fleuves et rivières navigables ou flottables sont tenus, dans l'intérêt du service de la navigation et partout où il existe un chemin de halage, de laisser le long des bords desdits fleuves et rivières, un espace libre de 7^m,80 de largeur.

Ils ne peuvent planter d'arbres ni se clore par haies ou autrement qu'à une distance de 9^m,75 du côté où les bateaux se tirent et de 3^m,25 sur le bord où il n'existe pas de chemin de halage.

ART. 47. — Lorsque l'intérêt du service de la navi-

gation le permettra, les distances fixées par l'article précédent seront réduites par un arrêté ministériel.

ART. 48. — Les propriétaires riverains qui veulent faire des constructions, plantations ou clôtures, le long des fleuves ou rivières navigables ou flottables peuvent, au préalable, demander à l'administration de reconnaître la limite de la servitude.

Si, dans les trois mois à compter de la demande, l'administration n'a pas fixé la limite, les constructions, plantations ou clôtures faites par les riverains ne peuvent plus être supprimées que moyennant indemnité.

ART. 49. — Lorsqu'une rivière ou partie de rivière est rendue navigable ou flottable et que ce fait a été déclaré par un décret, les propriétaires riverains sont soumis aux servitudes établies par l'article 46; mais il leur est due une indemnité proportionnée au dommage qu'ils éprouvent, en tenant compte des avantages que l'établissement de la navigation ou du flottage peut leur procurer.

Les propriétaires riverains d'une rivière navigable ou flottable auront également droit à indemnité, lorsque, pour les besoins de la navigation, la servitude de halage sera établie sur une rive où cette servitude n'existait pas.

ART. 50. — Les contestations relatives à l'indemnité due aux propriétaires, à raison de l'établissement de la servitude de halage, sont jugées en premier ressort par le juge de paix du canton.

S'il y a expertise, il peut n'être nommé qu'un seul expert.

ART. 51. — Dans le cas où l'administration juge que la servitude de halage est insuffisante et veut établir le long du fleuve ou de la rivière un chemin dans des conditions constantes de viabilité, elle doit, à défaut du consentement exprès des riverains, acquérir le terrain nécessaire à l'établissement du chemin, en se conformant aux lois sur l'expropriation pour cause d'utilité publique.

ART. 52. — Il est interdit d'extraire, sans autorisation spéciale, des terres, sables et autres matières à une distance moindre de 41^m,70 de la limite des fleuves et rivières navigables ou flottables.

ART. 53. — Le curage des cours d'eau navigables ou flottables et de leurs dépendances faisant partie du domaine public est à la charge de l'État; néanmoins, un règlement d'administration publique peut, les parties intéressées entendues, appeler à contribuer au curage les communes, les usiniers, les concessionnaires des prises d'eau et les propriétaires voisins qui, par l'usage exceptionnel et spécial qu'ils font des eaux, rendent les frais du curage plus considérables.

III

LOI DU 15 FÉVRIER 1902

RELATIVE A LA PROTECTION DE LA SANTÉ PUBLIQUE

ART. 10. — § 1. Le décret déclarant d'utilité

publique le captage d'une source pour le service d'une commune déterminera, s'il y a lieu, en même temps que les terrains à acquérir en pleine propriété, un périmètre de protection contre la pollution de ladite source.

Il est interdit d'épandre dans ce périmètre, des engrais humains et d'y forer des puits sans l'autorisation du préfet.

L'indemnité qui pourra être due au propriétaire de ces terrains sera déterminée suivant les formes de la loi du 3 mai 1841 sur l'expropriation pour cause d'utilité publique, comme pour les héritages en pleine propriété.

§ 2. Ces dispositions sont applicables aux puits et galeries fournissant de l'eau potable empruntée à une nappe souterraine.

§ 3. Le droit à l'usage d'une source d'eau potable implique, pour la commune qui la possède, le droit de curer cette source, de la couvrir et de la garantir contre toutes les causes de pollution, mais non celui d'en dévier le cours par des tuyaux ou rigoles. Un règlement d'administration publique déterminera, s'il y a lieu, les conditions dans lesquelles le droit à l'usage pourra s'exercer.

§ 4. L'acquisition de tout ou partie d'une source d'eau potable par la commune dans laquelle elle est située peut être déclarée d'utilité publique par arrêté préfectoral, quand le débit à acquérir ne dépasse pas deux litres par seconde.

IV

LOI DU 18 JUIN 1859

SUR LE DÉFRICHEMENT DES BOIS DES PARTICULIERS

Titre XV du Code forestier.

ART. 219. — Aucun particulier ne peut user du droit d'arracher ou défricher ses bois qu'après en avoir fait la déclaration à la sous-préfecture, au moins quatre mois d'avance, durant lesquels l'administration peut faire signifier au propriétaire son opposition au défrichement.

ART. 220. — L'opposition au défrichement ne peut être formée que pour les bois dont la conservation est reconnue nécessaire :

1° Au maintien des terres sur les montagnes comme sur les pentes ;

2° A la défense du sol contre les érosions et les envahissements des fleuves, rivières ou torrents ;

3° A l'existence des sources et des cours d'eau ;

4° A la protection des dunes et des côtes contre l'érosion de la mer et l'envahissement des sables.

V

RÉGIME DES SOURCES EN ALGÉRIE

Loi du 16 juin 1851.

La loi du 16 juin 1851, spéciale au régime de la

propriété en Algérie, a classé les sources en deux catégories :

1° Celles qui appartiennent à des particuliers justifiant de droits d'origine antérieurs à la loi.

Elles rentrent dans la même catégorie que les sources de la métropole et sont régies par les mêmes lois.

2° Celles qui ne peuvent justifier d'aucun titre de propriété particulière et qui sont, de droit, propriété de l'État.

Elles sont inaliénables, imprescriptibles, et les concessions dont elles ont fait l'objet sont précaires et révocables; il en résulte qu'elles peuvent être reprises sans indemnité.

OUVRAGES A CONSULTER

L. COURCELLE ET E. DARDART. — Législation des eaux. Paris.

A. PICARD. — Traité des eaux. Droit et administration. Paris, 1895.

PAUL BOUGAULT. — Législation des chutes d'eau, sources, rivières, cours d'eau non navigables. Grenoble, 1902.



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

L'HYDROLOGIE SOUTERRAINE 1

Définition et utilité de l'hydrologie. — Sourciers, fontainiers et bacillogyres. — La raddomancie. — Procédé opératoire des bacillogyres. — Opinion de Chevreul. — Opinion de l'abbé Paramelle. — Services rendus par l'emploi de la baguette divinatoire. — Emploi des ondes électriques pour déceler les sources. — L'acoustelle de M. Diénert. — Les aquilèges romains et leurs ouvrages. — Travaux de l'abbé Paramelle, de Belgrand, etc. — Publications du *Geological Survey*.

PREMIÈRE PARTIE

RECHERCHE ET CAPTAGE DES EAUX SOUTERRAINES

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS DE GÉOLOGIE ET DE STRATIGRAPHIE APPLICABLES AUX RECHERCHES HYDROLOGIQUES

I. — LES ROCHES 15

1° Roches éruptives. — Leur définition. — Leur transformation par serpentinsation, ouralisation, chloritisation, latérisation, etc.

Roches granitoïdes : granites, syénites, diorites, diabases, gabbros.

Roches porphyroïdes: porphyres, porphyres quartzifères, amphiboliques, pyroxéniques; trapps, péridotites, serpentines.

Roches schistoïdes: gneiss, schistes cristallins.

2° **Roches volcaniques.** — Leur définition. — Trachytes, obsidiennes, ponces, laves, wackes, basaltes.

3° **Roches sédimentaires.** — Leur définition. — Roches siliceuses, argileuses, calcaires.

II. — STRATES ET TERRAINS STRATIFIÉS	22
Terrains de sédiments. — Consolidation des sédiments. — Origine des dépôts sédimentaires. — Schistosité apparente. — Définition et position des strates. — Pli monoclinal, synclinal, anticlinal, isoclinal, couché, en zig-zag. — Vallées monoclinales, anticlinales, synclinales. — Nappe de charriage. — Mort-terrain. — Failles. — Effets des failles. — Entonnoirs absorbants: bétoires, boit-tout, etc. — Relief topographique du sol. — Effets d'érosions et de transport. — Règles usuelles de stratigraphie.	
III. — CLASSIFICATION DES TERRAINS STRATIFIÉS.	38
Division en étages et sous-étages. — Terminologie géologique de la France.	

CHAPITRE II

CARTES TOPOGRAPHIQUES ET GÉOLOGIQUES

CARTES DE LA FRANCE 47

Terrains stratifiés et éruptifs constituant le sol de la France. — Cartes topographiques françaises. — Cartes de l'Algérie et de la Tunisie. — Agrandissement des cartes topographiques au pantographe ou par quadrillage. — Carte géologique de la France.

Ouvrages à consulter. 57

CHAPITRE III

ORIGINE DES EAUX SOUTERRAINES

SUR LES ROCHES ET LES SOLS

I. — ORIGINE DES EAUX SOUTERRAINES	59
Rôle et utilité des eaux souterraines. — Opinions	

des anciens sur la genèse des eaux souterraines. — Origine des couches aquifères et des sources. — Chutes d'eaux pluviales, moyennes annuelles au pluviomètre.

- II. — INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION. 64
 Formation des sources perpétuelles. — Sources accidentelles ou intermittentes. — Effet des forêts et des couvertes forestiales. — Le déboisement en montagne diminue les pluies et accentue les crues des rivières. — La houille blanche. — La conservation des forêts et le reboisement des versants entretient le régime des eaux souterraines.
- III. — ACTION DES EAUX SUR LES ROCHES. 69
 Les eaux pluviales absorbent les gaz de l'atmosphère. — Coefficients d'absorption dans un litre d'eau. — Composition des eaux météoriques. — Substances dissoutes par les eaux souterraines. — Nitrification naturelle. — Filtrage nitrifiant à travers les sables. — Effets d'hydratation de certaines roches. — L'affleurement des filons, chapeau de fer.
- IV. — NIVEAU HYDROSTATIQUE. 79
 Définition du niveau hydrostatique. — Ses variations d'allure et leurs causes.

CHAPITRE IV

CONDITIONS DE PERMÉABILITÉ OU D'IMPERMÉABILITÉ DES TERRAINS

- TERRAINS PERMÉABLES. 83
 Roches perméables. — Action des eaux de ruissellement. — Perméabilité des terrains. — Pouvoir absorbant par imbibition. — Eaux d'hydratation et de constitution des roches. — Coefficient d'imbibition et de saturation. — Absorption des eaux par remplissage des vides. — Pouvoir absorbant des roches fissurées. — Effet des failles. — Cassures produites par les racines des plantes. — Expériences de M. Sachs. — Effets des joints de stratification. — Le degré de perméabilité des roches varie avec leur âge géologique.

- II. — TERRAINS IMPERMÉABLES 98
 Les marnes et les roches massives et compactes sont imperméables. — Expériences de M. Pichard sur la résistance des sols argileux à l'imbibition. — Cas où les argiles forment un terrain imperméable. — Les glissements de roches sont dus à l'eau et à l'air emprisonné. — Énumération des roches perméables et des roches imperméables.

CHAPITRE V

LOIS GÉNÉRALES DE L'HYDROLOGIE SOUTERRAINE DÉDUITES DE LA CONFIGURATION DU SOL

- I. — RECONNAISSANCE DES TERRAINS IMPERMÉABLES 107
 Sols granitiques. — Plantes silicicoles. — Trachytes, schistes anciens et quartzites. — Porphyres. — Terrains marneux et argiles. — Plantes spéciales aux terres argileuses fortes.
- II. — RECONNAISSANCE DES TERRAINS PERMÉABLES. 110
 Terrains calcaires. — Plantes calcicoles. — Sols gréseux. — Champignons caractéristiques des divers terrains. — Indices fournis par la végétation en général.
- III. — LOIS GÉNÉRALES. 116
 Lois de l'hydrologie résultant de la configuration du sol et de la stratigraphie.

CHAPITRE VI

RÉGIME DES EAUX SOUTERRAINES ET DES SOURCES

- I. — ORIGINE DES SOURCES. 117
 Opinion de M. Daubrée. — Couches, gisements, nappes aquifères. — Eaux phréatiques. — Eaux artésiennes. — Modes de cheminement des eaux souterraines. — Débit des sources.
- II. — INFLUENCE DU MILIEU PERMÉABLE. 123
 Vitesse de cheminement des eaux souterraines. — Formule du professeur Uzielli.

- III. — INFLUENCE DES DÉNIVELLATIONS DU PLAN DE DRAINAGE. 123
Rôle du niveau de drainage. — Sources perpétuelles ou pérennes.
- IV. — COURS D'EAU ET LACS SOUTERRAINS. 130
Action des eaux dans les roches fissurées. — Rivières souterraines. — Spéléologie. — Eaux descendantes actives. — Eaux descendantes passives. — Rivières souterraines. — Barranes d'Opoul. — Glacières naturelles.

CHAPITRE VII

ÉTUDE ET DÉLIMITATION D'UN GISEMENT AQUIFÈRE

- I. — BASSINS HYDROLOGIQUES SUPERFICIELS ET SOUTERRAINS. 443
Bassins de réception. — Bassins d'absorption ou d'alimentation. — Bassins d'absorption accolés. — Vallée hydrographique.
- II. — RECONNAISSANCE ET DÉLIMITATION D'UN BASSIN D'ABSORPTION 446
Etude topographique d'un bassin d'absorption. — Les affleurements des strates varient suivant l'inclinaison. — Eclimètre. — Boussole de géologue. — Etude des plis synclinaux. — Signes conventionnels
- III. — CAPACITÉ HYDRAULIQUE D'UN BASSIN DE RÉCEPTION. . 452
Capacité d'absorption et capacité de retenue d'un terrain. — Capacité hydraulique d'un bassin. — L'absorption des eaux varie selon que le terrain est boisé ou dénudé. — Evaluation de la vitesse d'écoulement souterrain. — Emploi des colorants. — Jaugeage. — Théorème de Dupuit. — Formule de M. Pochet.
- IV. — BASSINS DE RÉCEPTION SUPERPOSÉS 460
Les gisements aquifères superposés sans communications. — Nappes profondes. — Nappes étranglées. — Nappes captives.
- V. — ALIMENTATION SUPPLÉMENTAIRE DES BASSINS DE RÉCEPTION. 162
On augmente la capacité hydraulique d'un bassin

de réception en retenant les eaux pluviales dans le bassin d'alimentation. — Puits absorbants. — Barrages et réservoirs. — Pratique des anciens aquilèges. — Méthode du Dry Farming.

CHAPITRE VIII

DÉBIT DES SOURCES ET DES PUIITS

- I. — DÉBIT DES PUIITS ORDINAIRES. 466
 Appel d'eau autour d'un puits. — Dépression produite. — Calcul du débit des puits par la formule de Prony. — Formule de Dupuit. — Méthodes de M. Brouhon, de M. Lembke, etc. — Conclusions de M. Pochet.
- II. — DÉBIT DES GALERIES FILTRANTES. 476
 Effet produit par l'ouverture d'une galerie. — Le débit normal d'une galerie de captage ne s'établit que très lentement
- III. — DÉBIT DES SOURCES. 477
 Procédés de jaugeage. — Déversoirs. — Formule de Bazin.
- IV. — EMPLOI DE LA FLUORESCÉINE. 480
 On détermine la vitesse des eaux souterraines au moyen des colorants. — Dosage de la fluorescéine selon les cas. — Expériences de M. Marboutin. — Fluorescope électrique.

CHAPITRE IX

RECHERCHE DES EAUX ET SOURCES PHRÉATIQUES

- I. — RECHERCHES SUR UN PLATEAU 487
 Position à donner aux puits. — Points où l'on peut rencontrer la couche aquifère. — Recherche de sources en pays de montagnes.
- II. — RECHERCHES SUR LES VERSANTS. 492
 Mode de circulation des eaux dans les versants. — On place les puits dans une dépression ou à l'origine d'un ravin, d'un pli, etc. — Effet des dykes imper-

méables. — Les affleurements de roche perméable se signalent par des suintements d'eau.

III. — RECHERCHES DANS LES VALLÉES ET LES PLAINES . . . 199

Vallées synclinales et monoclinales. — Puits profonds. — Le thalweg souterrain ne correspond pas nécessairement au thalweg de la vallée. — Nécessité d'effectuer la reconnaissance stratigraphique des versants. — Vallées fluviales. — Rivages maritimes. — On creuse les puits à l'origine du thalweg ou dans une dépression.

IV. — RÈGLES GÉNÉRALES POUR LES RECHERCHES D'EAU PAR PUIITS 212

Sols dans lesquels on évitera de faire des recherches. — Points où il convient de creuser des puits. — Tube Wells.

V. — PUIITS-CITERNES ET RÉSERVOIRS DE SUIITEMENT 214

Difficulté de mettre en pratique les règles de recherches d'eau. — Puits-citernes.

VI. — BARRAGES. 217

Utilité des barrages. — Bassins de réserve. — Barrages d'absorption. — Barrages d'imbibition.

VII. — RÉSERVOIRS-RÉGULATEURS. 218

VIII. — RECHERCHES BASÉES SUR LA CONSIDÉRATION DES SIGNES EXTÉRIEURS 219

Les règles de l'hydrologie doivent être complétées par l'examen des signes extérieurs. — Observation de la végétation. — Indices fournis par l'humidité persistante du sol, les insectes, etc. — Nécessité de contrôler sérieusement les signes extérieurs.

CHAPITRE X

CAPTAGE DES SOURCES. — GALERIES FILTRANTES. — DRAINS

I. — CAPTAGE DES EAUX DE SOURCE. 225

Définition de l'eau de boisson. — La pureté d'une eau dépend de la nature du sol dans lequel elle circule. — Avantage des terrains boisés. — Principes

guidant les recherches. — Nappes aquifères à un ou deux versants. — Etablissement d'une rigole de captage. — Etablissement de galeries de captage pour des eaux de ville; trois cas se présentent.

1° La couche perméable superficielle repose sur une roche imperméable;

2° Le sol perméable recouvre une roche fissurée épaisse.

3° Le sol meuble recouvre un terrain fissuré de peu d'épaisseur.

Galeries en béton ordinaire et en béton armé. — Composition du béton. — Amélioration d'une source par exhaussement en amont, ou par abaissement. — Principes des travaux de captage.

II. — RÉSERVOIRS D'ALIMENTATION	245
III. — GALERIES FILTRANTES D'EAU DE RIVIÈRE	247
Etablissement de galeries pour filtrer les eaux de rivière. — Conditions indispensables à leur bon fonctionnement. — Les galeries de Breslau.	
IV. — DRAINS ET DRAINAGES.	249
Objets des drainages. — Installations des drains d'écoulement. — Loi de 1834 sur les drainages.	
Ouvrages à consulter	250

CHAPITRE XI

EAUX ARTÉSIENNES

I. — THÉORIE DES PUIITS ARTÉSIENS.	253
Définition des sources artésiennes. — Eaux jaillissantes. — Puits artésiens. — Ancienneté des puits artésiens. — Explication de M. Daubrée. — Niveau piézométrique.	
II. — PUIITS ABSORBANTS	258
Fonctionnement et utilisation des puits absorbants ou boit-tout. — Puits perdus.	
III. — RECHERCHE DES EAUX ARTÉSIENNES.	260
Régions favorables aux recherches. — Conditions particulières. — Régularité de débit des eaux arté-	

siennes. — Suralimentation des puits artésiens. —
Procédé Richert.

IV. — ETABLISSEMENT DES PUIITS ARTÉSIENS. 265

Captage des eaux. — Installation de sondage. —
Puits Norton ou instantanés.

V. — APPLICATIONS DIVERSES DU CAPTAGE DES EAUX ARTÉ-
SIENNES. 272

Applications en Australie, en Californie, etc. —
Utilisation des eaux artésiennes en Algérie. — Sources
d'Aïn-Mzata. — Fontanili de Lombardie. — Puits
artésien de Grenelle.

CHAPITRE XII

CONSTRUCTION DES PUIITS, CITERNES ET RÉSERVOIRS

I. — PUIITS ORDINAIRES 277

Travaux d'établissement suivant la nature du
terrain.

a) **En terrains consistants** : Calcul des charges de
poudre ou d'explosif. — Exemple d'un tirage à la
poudre. — Exemple d'un tirage à la dynamite. — Pro-
cédé pour ramener l'eau dans un puits desséché.

b) **En terrains ébouloux** : Equilibre d'un terrain
découpé. — Construction d'un puits avec boisage. —
Matériaux utilisables. — Treuil de puisatier.

c) **En terrains coulants** : Garnissage en palplan-
ches. — Maçonnerie des parois. — Cuvelage filtrant.

Entretien des puits. — Correction des eaux. —
Avantages du puits instantané. — Sauvetage en cas
d'éboulement ou d'asphyxie. — Premiers secours à
donner à un asphyxié.

II. — MARES, ÉTANGS, BARRAGES DE RUISSELLEMENT. 298

Utilisation des eaux pluviales. — Réservoirs de
retenue. — Bassins de réserve. — Barrages de sub-
mersion.

III. — CITERNES 299

Construction des citernes. — Séparateurs d'eaux
pluviales. — Appareil Fauconnier. — Percolator
anglais. — Purificateur des eaux de pluie. — Bas-
sins d'Aden.

IV. — RÉSERVOIRS.	304
Construction des réservoirs. — Dimensions des réservoirs en tôle. — Précautions afférentes à l'usage des réservoirs.	

CHAPITRE XIII

EAUX MINÉRALES ET THERMO-MINÉRALES

I. — ORIGINE DES EAUX MINÉRALES ET DES EAUX THERMO-MINÉRALES.	307
Eaux chaudes. — Variations de température dans le sol. — Degré géothermique. — Pénétration des eaux en profondeur. — Roches hydropâteuses. — Origine des eaux thermo-minérales. — Eaux juvéniles ou nouvelles. — Expériences de M. Armand Gautier. — Eaux chaudes volcaniques.	
II. — COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS DES EAUX THERMO-MINÉRALES.	316
Matières minérales contenues dans les eaux. — Coefficients de solubilité des gaz. — L'azote et les gaz rares. — Carbonates, sulfates, nitrates, silicates, chlorures, arséniates, etc. — Eaux aimantées. — Eaux acides. — Eaux ferrugineuses. — Eaux médicamenteuses. — Radioactivité et émanation. — Études de M. Moureu. — Nécessité de capter les eaux à l'abri de l'air et de les utiliser à leur émergence.	
III. — CLASSIFICATION DES EAUX MINÉRALES.	324
Sources nouvelles, juvéniles ou filoniennes. — Sources interstratifiées. — Eaux chlorurées, sulfatées, carbonatées, siliceuses, acides, ferrugineuses, sulfurées. — Sources indifférentes. — Eaux volcaniques.	
IV. — CAPTAGE DES EAUX MINÉRALES.	327
But d'un captage. — Débit probable et jaugeage. — Diverses méthodes de captage.	
V. — LÉGISLATION DES EAUX MINÉRALES.	332
Ouvrages à consulter.	332

DEUXIÈME PARTIE

STÉRILISATION DES EAUX

CHAPITRE PREMIER

EAUX POTABLES

- I. — EAUX DE SOURCE ET DE RIVIÈRE. 335
 Nécessité de stériliser certaines eaux de source.
 Épuration naturelle. — Inconvénients des eaux
 dures. — Caractères des eaux potables.
- II. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES EAUX POTABLES. 338
 Qualités d'une eau de source pure et saine. — La
 pureté et la salubrité des eaux souterraines sont
 décelées par des signes extérieurs.
- III. — CARACTÈRES CHIMIQUES DES EAUX POTABLES 340
 Influences des sels dissous. — Sels de chaux et de
 magnésie. — Oxydes métalliques. — Sulfates. —
 Nitrates. — Ammoniaque. — Chlorures. — Matières
 organiques.
- IV. — COMPOSITION BACTÉRIOLOGIQUE DES EAUX POTABLES. 346
 Aseptie du sol. — Action des pluies. — Contami-
 nation des sols. — Les bassins boisés fournissent
 des eaux plus pures et plus saines. — Condition
 hygiénique des puits dans les campagnes et les
 villes.
- V. — RECHERCHE DES EAUX SOUTERRAINES POTABLES 351
 Influence du terrain. — Règles de M. Imbeaux. —
 Nappes profondes.
- VI. — ESSAI DES EAUX 354
 1^o Analyse générale : opérations prescrites par le
 Conseil d'hygiène.
 2^o Analyse bactériologique.
 3^o Analyse hydrotimétrique : Hydrotimétrie. —
 Degré hydrotimétrique. — Calcul des teneurs en
 sels minéraux.

VII. — CONCLUSIONS	358
Ouvrages à consulter.	359

CHAPITRE II

PURIFICATION ET STÉRILISATION DES EAUX DE BOISSON EAUX DE PUIES ET DE TABLE

I. — EAUX DE PUIES.	361
Difficulté de maintenir l'eau des puits à l'abri des contaminations. — Curage des puits. — Purification des eaux de puits. — Procédé du Dr Blarez. — Procédé de M. Threst. — Purification par ébullition. —	
II. — EAUX DE TABLE	364
1° Purification par filtration : Vases filtrants. — Alcarazas. — Bougies Chamberland. — Filtre Berkefeld. — Ultrafiltre de Malfitano. — Filtre Maignen.	
2° Purification par action chimique : Adoucissement de l'eau par le fer, l'alumine, l'alun, le permanganate de potasse, etc. — Ebullition des eaux suspectes. — Stérilisation par le procédé Vaillard. — Permutite.	
3° Purification par ébullition : Inconvénients de l'ébullition à l'air libre. — Chauffage sous pression. — Stérilisateur Cartault, Salvator-Vaillard.	

CHAPITRE III

PURIFICATION ET STÉRILISATION DES EAUX DE BOISSON EAUX DE VILLE

I. — UTILISATION DES EAUX DE RIVIÈRE	373
Les germes typhiques véhiculés par l'eau. — Dissémination des bactéries dans le sol. — Recherches de M. Fraenkel. — La contamination des rivières disparaît à leur sortie des villes. — Exemples du Rhin et de la Seine.	
II. — PURIFICATION DES EAUX DE RIVIÈRE PAR FILTRATION . .	376
1° Filtres noyés : Construction des bassins de filtrage. — Inconvénients du filtre noyé.	
2° Filtres non submergés : Principes établis par	

MM. Miquel et Mouchet. — Constructions des filtres non submergés.

- 1° **Filtrage méthodique** : Procédé Puech et Chabal. — Installation de Port-Saïd.

III. — PURIFICATION PAR TRAITEMENT CHIMIQUE. 387

- 1° **Clarification par l'alun** : Mode d'emploi. — Stérilisation des eaux de Buenos-Ayres.

- 2° **Stérilisation par le chlore et les hypochlorites** : L'hypochlorite de chaux du commerce. — Purification des eaux de Jersey, aux Etats-Unis. — Emploi à Paris en 1911. — Hypochlorite de sodium. Procédé Rouquette. — Procédé Duyk. — Procédé d'adoucissement des eaux de M. Desrumeaux.

- 3° **Stérilisation par l'air ozonisé** : Propriétés de l'ozone. — Ozonisation et ozoneurs. — Ozoneurs Tindal-de Frise, Siemens et Halske, Otto, Marmier et Abraham. — Divers procédés d'ozonisation de l'eau ; systèmes Tindal-de Frise, Otto, Marmier et Abraham. — Prix de revient.

- 4° **Stérilisation par les rayons ultra-violet** : Propriétés des rayons ultra-violet. — Procédés Triquet, Nogier et Westinghouse. — Petit stérilisateur Nogier.

Ouvrages à consulter. 398

TROISIÈME PARTIE

LÉGISLATION DES SOURCES ET DES EAUX

Législation des sources, eaux pluviales et eaux courantes	401
Propriété des sources	402
Loi du 8 avril 1897 sur le régime des eaux.	403
Loi du 15 février 1902 relative à la protection de la santé publique	419
Loi du 18 juin 1859 sur le défrichement	421
Régime des sources en Algérie	421
Ouvrages à consulter.	422

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Abîmes	134
Absorption des gaz par l'eau . . .	70
Acides des eaux	71
Activité chimique des racines des plantes	95
Adoucissement des eaux	337-389
Affleurement des filons	79
— des roches	148
— des strates	197
Alcarazas	384
Amélioration des sources par abais- sissement	242
Amélioration des sources par exhaussement	241
Analyse des eaux de boisson . . .	354
Anhydrite transformée en gypse . .	77
Aquilèges	7-9-163
Argiles (imbibition des)	100
Avens	134

B

Bacilles pathogènes	349
— saprogènes	349
Bacillogyres	2
Baguette divinatoire	2
Barrages	163-217
Barrages d'absorption	218
— d'imbibition	218
— de retenue	229
— de ruissellement	298

Barranc d'Opoul	135
Barrancs	9
Bassin d'absorption	143-146
— d'alimentation	143
— de réception	143-152
Bassins de réception superposés . .	160
— de réserve	217
Basaltes	20
Béthunes	16-29
Bétoires	16-29-134
Béton pour galeries de captage . .	240
Boit-tout	29-134-258
Bougies Chamberland	364
Boussole à éclimètre	150
— de géologue	150

C

Calcaires	84
Calcaires imperméables	98
— perméables	97
Capacité d'absorption des terrains .	152
— de retenue des terrains . . .	152
— hydraulique d'un bassin de réception	152
Captage des eaux artésiennes . . .	265
— — de source	225-244
— — minérales	326-329
Carbonates et bicarbonates . . .	71-318-340
Carte de Cassini	48
— de la France (Nouvelle) . . .	49
— de l'Algérie et de la Tunisie .	50
— de la Tunisie	50

Carte de l'Etat-major	48-54
— des environs de Paris	49
— en couleurs	50
Cartes géologiques	48-56
— topographiques	48
Cavités gazeuses dans les roches .	138
Champignons caractérisant les ter- rains	112
Chapeau de fer	79
Citernes	299
Clarification par l'alun	385
Classification des eaux minérales .	324
— des terrains stratifiés	40
Clinomètre	145
Composition des eaux météoriques .	71
— — minérales	316
Comprimés Vaillard	368
Concessions et autorisations d'eau .	416
Construction des cuvelages	287
— des puits ordinaires	277
Contamination des eaux	347
Couches aquifères	119
Cours d'eau lents	123
— — navigables et flottables	414
— — non navigables ou flottables . .	405
— — rapides	124
— — réguliers	124
— — souterrains	120-134-137
Couvertes forestiales et sous-bois .	65
Crues	124-210
Curage des cours d'eau	410
Cuvelage filtrant	292

D

Débit (amélioration du)	241
— des eaux minérales	327
— des galeries filtrantes	176
— des puits	166
— des sources	177
— des sources et des puits	165
— maximum	122
— minimum	122
— moyen	121
Déboisement	66
Degré géothermique	309
— hydrotimétrique	356
Dégrossissage des eaux	382

Dépressions artificielles	231
— naturelles	188-209-212
Déversoir de jaugeage	177
Diabase	18
Diaclases	93
Diélectriques	391
Diorites	18
Direction des strates	25
Distribution des eaux pluviales . .	154
Dolérites	19
Dosage des colorants	181
Drainage d'un marécage	223
— d'une tourbière	222
Drainages	249
Drains	249
Drains de captage	233
Dry Farming	164

E

Eau de carrière	88-314
— de constitution	88-314
— d'hydratation	88
— douce	337-342
— dure	114-337-340
— pure	225-338
— saine	338
— séléniteuse	337
Eaux acides	114
— aimantées	319
— artésiennes	120-253
— ascendantes	132
— chaudes volcaniques	316
— croupissantes	114
— descendantes	132
— de table	364
— (essai bactériologique des)	346-355
— (essai chimique des)	358
— (essai hydrotimétrique des)	395
— indifférentes	322
— industrielles	327
— jaillissantes	254
— juvéniles	313
— magnétiques	319
— météoriques	71
— minérales	307
— nouvelles	313

Eaux odorantes	114
— pétifiantes	114
— pbréatiques	119-253
— pluviales	61-69-154
— potables	335-338-351
— puantes	114
— radioactives	322
— séléniteuses	114
— thermales	307
— thermo-minérales	307-316
— tourbeuses	114
Eboulement de puits	295
— de terrains	104
Ebullition de l'eau	370
Eclimètre	149
Emanations du radium	323
Emulseur Otto	393
Entretien des puits	293
Epontes des failles	30
Erosion	35
Etangs	298
Evaporation des eaux	62
Expériences de M. Pichard	100

F

Failles	27-93
Falaises	34-95
Fausses strates	25
Feldspath transformé en kaolin	77
Filons métallifères	75-133
Filtration des eaux de table	364
Filtration mécanique	376
Filtre Berkefeld	365
— Cartault	371
— en grès	364
— Maignen	366
— non submergé	376-379
— noyé	376
— Puech et Chabal	381
Flore des terrains perméables	113
Fluorescéine	157-180
Fluorescope	157
— électrique	183
— Trillat	183
Fonçage des puits	279
Fontainier	2
Fontanili de Lombardie	275

Formule de Bazin	179
— de Brouhon	171
— de Dupuit	170
— de Lembke	173
— de Prony	169
— pour explosifs	280
Fossiles	37

G

Gabbros	18
Galleries de captage	239
— filtrantes	176
— filtrantes de rivière	247
— de réserve	241
<i>Geological Survey</i>	11
Géologie de la France	40
Gisements aquifères	119
Glacière de la Dobsina	140
— de la Schonbergalm	141
Glacières naturelles	140
Gneiss	19
Granites	17
Griffons d'eaux minérales	313

I

Imbibition des roches	87-92
— des sables	90-91
Imperméabilité des argiles	103
Inclinaison des strates	25
Indications fournies par la végétation	220
— — par les signes extérieurs	221
Influence du milieu perméable	123
Installation de sondage	267
— d'un sondage au trépan	268

J

Jaugeage d'une source	159
— par déversoir	177
Joints de clivage	96
— de schistosité	96
— de stratification	96
Joueurs de baguette	5

K

Kaolin	72-77
Kaolinisation	73

L

Lacs souterrains	124
Latérisation	17
Latérites	17
Laves	20
Législation des eaux minérales	332
— des sources	401
Ligne de charge	253
Lithoclastes	95
Loi du 8 juin 1859 sur le défriche- ment	421
Loi du 8 avril 1898 sur le régime des eaux	403
Loi du 15 février 1902 sur la santé publique	419
Loi sur la propriété des sources	402
Lois générales de l'hydrologie	116

M

Mares	298
Marnes	99
— argileuses	99
— calcaires	99
— magnésiennes	99
— sablonneuses	100
Matériel de sondage	266
Matières minérales des eaux	316-340
— organiques des eaux	345
Mélaphyre	18
Métamorphisme des roches	31

N

Nappe de charriage	27
Nappes aquifères à un versant	230
— — à deux versants	231
— captives	161
— d'eau	118
— étagées	161
— phréatiques	162
Nitrates et acide nitrique	320-343
Nitrifiants	76
Nitrification naturelle	76
Niveau de drainage	80-119-125
— hydrostatique	79
— piézométrique	253
Niveaux d'eau	118

O

Obsidiennes	20
Ophites	18
Opinions de Bernard de Palissy	60
— de Descartes	60
— de Lucrèce	59
— de Mariotte	60
Origine des eaux souterraines	59
— des eaux thermales	310
— des sources	117
Ouralitisation	17-73-78
Oxydes métalliques	71-342
Oxylythe	297
Ozonisation	392
— procédé Marmier-Abraham	393
— procédé Otto	393
— procédé Tindal-de Frise	392
Ozoniseurs	390

P

Pantographe	52
Paraclastes	93
Pendage des terrains	25
Pentes (détermination des)	149
Percolators	302
Péridotites	19
Perméabilité extérieure	87
— intérieure	87
— des argiles	103
Permutite	369
Plantes calcicoles	108
— silicicoles	109-111
Pli anticlinal	25-151
— isoclinal	26
— monoclinal	25
— synclinal	25-151
Pluies torrentielles	62
Polarité	363
Police et conservation des eaux	408
Ponces	20
Porosité	87
Porphyres	18
Poudre Blarez	362
Programme d'un captage d'eau	234
Propriété des sources	402-403
Puits abandonnés	296

Puits absorbants.	163-258
— abyssins	269
— artésiens	254
— artésien de Grenelle	276
— citernes.	214
— instantanés	269-295
— Norton	269
— ordinaires.	277
— perdus	259
— suspects.	297
Purification des eaux de puits.	361
— des eaux de table	364
Purificateur des eaux de pluie.	301-302
Pyrites dans les roches.	73

R

Rabdomancie	3
Radioactivité	322
Reboisement	68
Recherche des eaux par la baguette.	2
— — par le son	9
— — par les ondes électriques.	8
Recherches à l'origine d'un thalweg.	208
Recherches dans les dépressions.	209
— dans les plaines	199
— dans les vallées	199
— d'eau par puits	212
— des eaux artésiennes.	260
— des eaux phréatiques.	185
— sur des versants.	192
— sur un plateau	187
Reconnaissance des terrains	107
Régime des eaux souterraines	117
— des sources en Algérie.	421
Règles usuelles de stratigraphie	36
Relevés géologiques.	151
— topographiques	151
Réservoirs	163-304
— d'Aden	304
— d'alimentation.	214
— de suintements	214
— en tôle	305
— régulateurs	218
Rigoles de captage.	231
Rivage maritime.	207
Riverains (droits des)	414

Rivières flottables	413
— non navigables ni flottables	405
— souterraines.	134-137
Roches	16
— adiaclasiques	105
— à eaux potables	352
— argileuses.	21
— calcaires	21
— compactes.	104
— diaclasiques	87-97
— éruptives	16-21
— euritiques	18
— feldspathiques.	22-84
— fissurées	87
— fragmentaires.	87
— granitoïdes	17
— imperméables.	104
— massives	104
— noires	19
— perméables	83-96
— poreuses	87
— porphyroïdes	18
— primaires	21
— schistoïdes	19
— secondaires	21
— sédimentaires	21
— serpentineuses.	19
— siliceuses.	21-22-84
— vertes	17
— volcaniques	16-21

S

Sables salés.	108
Saturation des roches	89
Sauvetages dans les puits	295
Schistes	22-84
— bitumineux	99
— cristallins.	20
Secours aux asphyxiés.	297
Sédiments.	22
Séparateur Fauconnier.	301
Serpentines	17-19
Serpentinisation	17-73-78
Signes conventionnels	151
— extérieurs de la pureté des eaux.	339
— — des eaux souterraines.	219
Similitude des fossiles	37

- Sols argileux 109
 — calcaires 110
 — de quartzite 108
 — de schistes anciens 108
 — granitiques 107
 — gréseux 111
 — imperméables 99-104
 — marneux 109
 — perméables 83-97
 — porphyriques 109
 — trachytiques 108
 Sondage à la corde 268
 — à la tige rigide 267
 — au diamant 268
 — au trépan 268
 Sonde Davis-Calyx 268
 Sources accidentelles 65
 — acides 325
 — alpestres 326
 — (amélioration des) 241
 — artésiennes en Algérie 273
 — carbonatées 325
 — chaudes 308
 — chlorurées 325
 — ferrugineuses 325
 — indifférentes 326
 — intermittentes 65
 — interstratifiées 325
 — pérennes 64
 — perpétuelles 64
 — phréatiques 185
 — radioactives 322
 — sulfurées 326
 — vauclusiennes 138
 Sourciers 2-3
 Spéléologie 131
 — Stérilisateur Cartault 372
 — Salvator-Vaillard 372
 — Triquet-Nogier 396
 — Westinghouse 397
 Stérilisation chimique 385
 — des eaux de Buenos-Ayres 385
 — des eaux de rivière 375
 — des eaux de villes 373
 — des eaux de Jersey 387
 — des eaux de Paris 387
 Stérilisation par l'air ozonisé 389-396
 — par le chlore et les hypochlo-
 rites 386
 Stérilisation par le procédé Desru-
 meaux 389
 Stérilisation par le procédé Duyk 388
 — — Rouquette 387
 — par les rayons ultra-violet 396
 Strates 23-25
 Stratification concordante 27
 — discordante 27
 — en zigzag 26
 — transgressive 27
 Substances dissoutes dans les eaux 74
 Sulfates et acide sulfurique 71-320-343
 Suralimentation des eaux arté-
 siennes 263
 Surface piézométrique 257
 Syénites 17
- T**
- Terrains alluvionnaires 86
 — argileux 100
 — imperméables 98-107-115
 — perméables 83-110-114
 — sédimentaires 22
 — stratifiés 22-38
 — stratifiés de la France 47
 Terres argileuses fortes 111
 Thalweg de vallée 189-213
 — de souterrain 202-213
 Théorème de Dupuy 158
 Tirage à la dynamite 282
 — à la poudre 281
 Torrents 124
 Tourbes 24
 Trachytes 20
 — noirs 20
 Travaux de captage des sources 225
 — — des eaux minérales 329
 Treuil de puisation 289
 Tube-Wells 214
- U**
- Ultrafiltre de Malfitano 366

PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE DES DÉPARTEMENTS, AVEC INDICATION DES FEUILLES DE LA CARTE DE FRANCE AU 80000, QUI COMPOSENT CHAQUE DÉPARTEMENT.

État d'avancement
1^{er} Janvier 1913



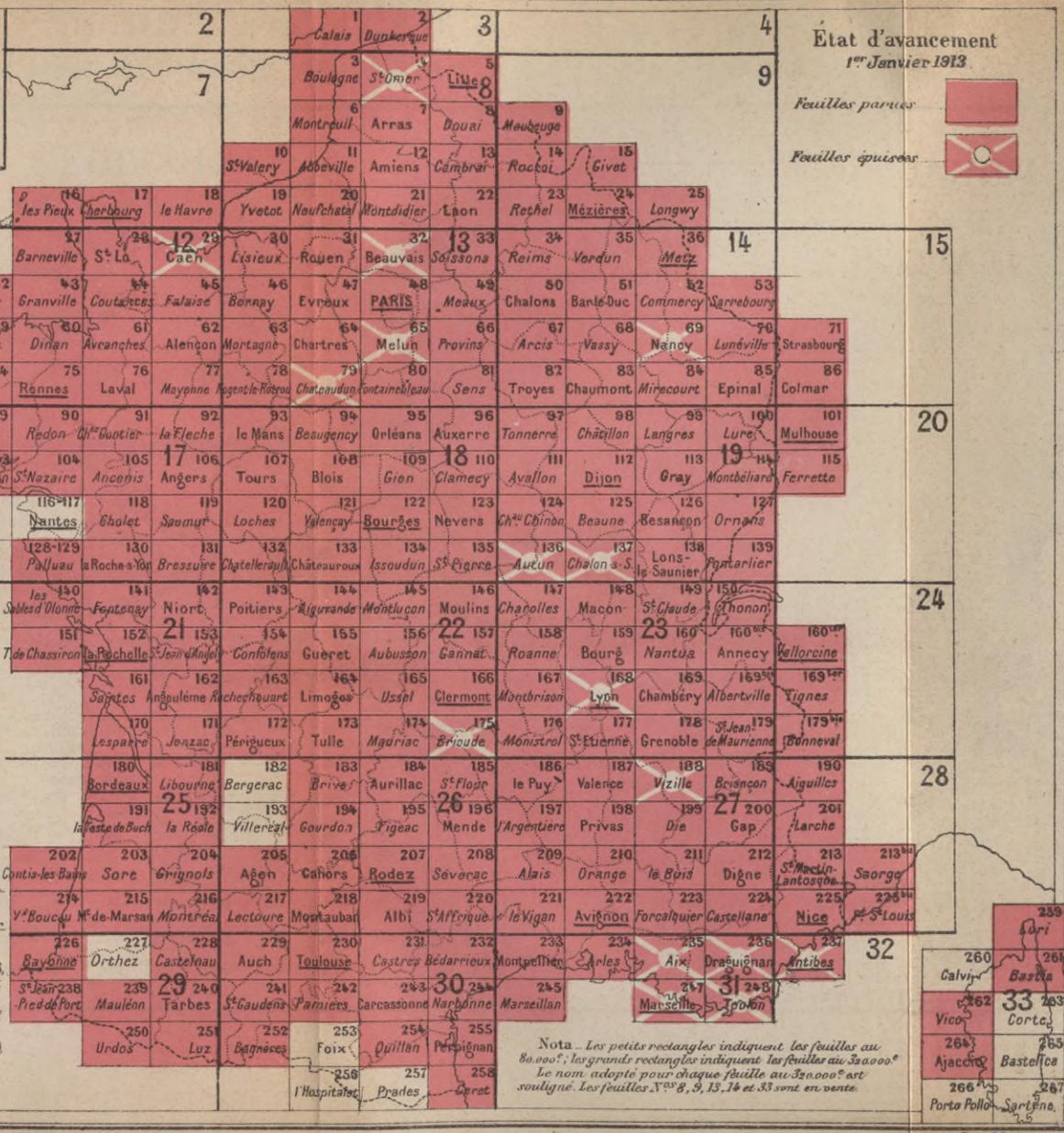
Table listing departments and their constituent map sheets (e.g., Ain, Alpes, Ardèche, etc.).

CH. BÉRANGER

Editeur
15, Rue des Saints-Pères,
PARIS

CARTE GÉOLOGIQUE
détaillée
DE LA FRANCE
au 80.000 et au 320.000
publiée par le
Ministère des travaux publics.

Prix de chaque feuille
accompagnée de sa notice explicative
En feuille 6^f
Collée sur toile et pliée 10^f
Pour l'expédition en province des cartes en feuilles, il faut ajouter 0^{fr}30 par envoi pour l'emballage et l'affranchissement.
Nota. Les feuilles n^{os} 2, 5, 15, 17, 40-56, 71, 86, 87, 88, 103, 139, 140, 160^{fr}, 169^{fr}, 179^{fr} qui sont moins chargées que les autres comptent comme demi-feuilles et coûtent en feuilles 3^{fr}; collées sur toile 7^{fr}.
Les feuilles n^{os} 1, 10, 18, 43, 53, 102, 115, 151, 190, 202, 203, 213^{bis}, 214, 225^{bis} comptent comme quarts de feuille et coûtent en feuilles 1^{fr}50; collées sur toile, 5^{fr}50.



Nota. Les petits rectangles indiquent les feuilles au 80.000; les grands rectangles indiquent les feuilles au 320.000. Le nom adopté pour chaque feuille au 320.000 est souligné. Les feuilles N^{os} 8, 9, 13, 14 et 33 sont en vente.

TABLEAU D'ASSEMBLAGE
 DE LA
 CARTE GÉOLOGIQUE D'ALGÉRIE
 au 50.000^e

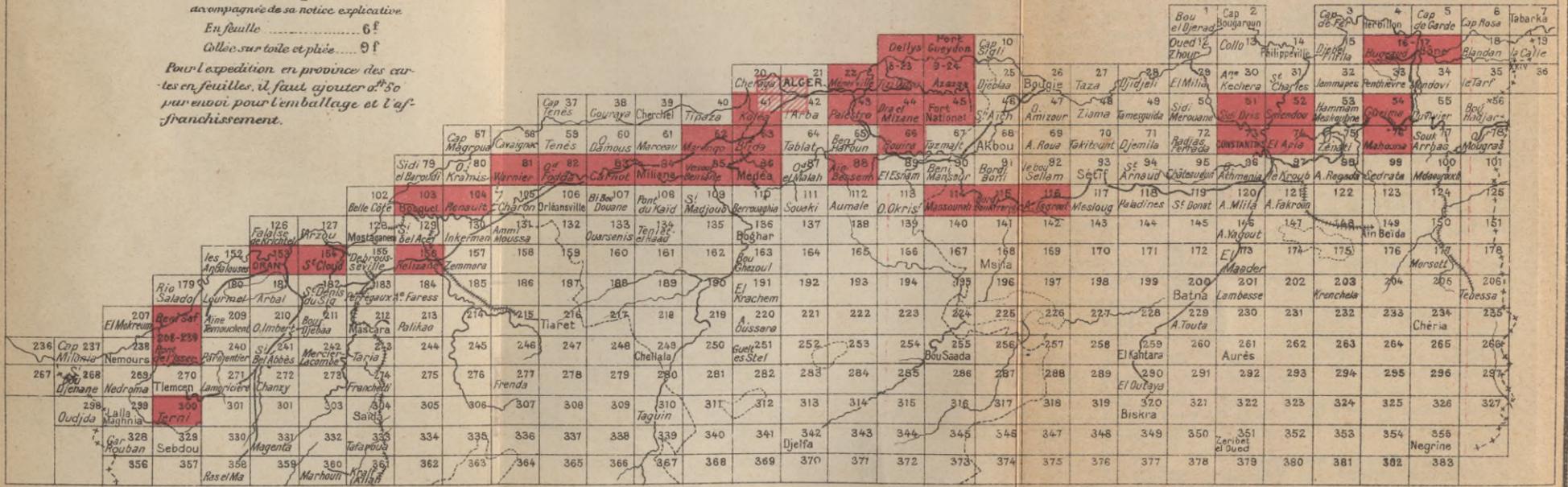
publiée par le
 Ministère des travaux publics.

Prix de chaque feuille
 accompagnée de sa notice explicative
 En feuille 6^f
 Collée sur toile et pliée..... 0^f
 Pour l'expédition en province des cartes
 et en feuilles, il faut ajouter 0^f.50
 par envoi pour l'emballage et l'affranchissement.

État d'avancement
 1^{er} Janvier 1913.

Feuilles parues 

Feuille d'Alger et ses environs 



OUVRAGES DE GÉOLOGIE

ET

D'HYDRAULIQUE

PUBLICATIONS DU SERVICE

DE LA

CARTE GÉOLOGIQUE DÉTAILLÉE DE LA FRANCE

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 74 centimètres sur 72 centimètres.

LISTE DES FEUILLES PARUES

Le signe (*) indique les feuilles épuisées.

Nos	Nos	Nos	Nos
1 Abbeville.	125 Beaune.	*79 Châteaudun.	15 Givet.
205 Agen.	*32 Beauvais.	73 Châteaulin.	194 Gourdon.
190 Aiguilles.	232 Bédarieux.	133 Châteauroux.	43 Granville.
144 Aigurande.	102 Belle-Ile.	132 Châtelleraut.	113 Gray.
*235 Aix.	46 Bernay.	98 Châtillon.	178 Grenoble.
264 Ajaccio.	126 Besançon.	83 Chaumont.	204 Grignols.
209 Alais.	108 Blois.	17 Cherbourg.	155 Guéret.
169 bis Albertville.	179 bis Bonneval.	118 Cholet.	128-9 Ile d'Yeu-Pallau.
219 Albi.	180 Bordeaux.	110 Clamecy.	134 Issoudun.
62 Alençon.	3 Boulogne.	166 Clermont.	171 Jonzac.
12 Amiens.	159 Bourg.	86 Colmar.	92 La Flèche.
105 Ancenis.	122 Bourges.	52 Commercy.	99 Langres.
106 Angers.	131 Bressuire.	154 Confolens.	41 Lannion.
162 Angoulême.	57 Brest.	202 Contis-les-Bains.	22 Laon.
160 bis Annecy.	189 Briangon.	44 Coutances.	201 Larches.
*237 Antibes.	*175 Brioude.	199 Die.	192 La Réole.
67 Arcis.	183 Brives.	212 Digne.	197 Largentière.
234 Arles.	*29 Caen.	112 Dijon.	130 La Roche-sur-Yon.
7 Arras.	206 Cahors.	60 Dinan.	152 La Rochelle.
156 Aubusson.	1 Calais.	8 Douai.	76 Laval.
229 Auch.	13 Cambrai.	*236 Drougignan.	211 Le Buis.
184 Aurillac.	243 Carcassonne.	2 Dunkerque.	217 Lectoure.
*136 Autun.	224 Castellanne.	85 Epinal.	18 Le Havre.
96 Auxerre.	228 Castelnau.	47 Evreux.	93 Le Mans.
111 Avallon.	231 Castres.	45 Falaise.	186 Le Puy.
222 Avignon.	258 Céret.	115 Férrette.	16 Les Pieux.
61 Avranches.	*137 Chalons s/Saône.	195 Figeac.	170 Lesparre.
252 Bagnères.	50 Châlons s/ Marne.	80 Fontainebleau.	140 Les Sables-d'Orlonne.
51 Bar-le-Duc.	169 Chambéry.	141 Fontenay.	221 Le Vigan.
27 Barneville.	148 Charolles.	223 Forcalquier.	181 Libourne.
1 Bastia.	64 Chartres.	157 Gannat.	5 Lille.
3 Bayonne.	124 Château-Chinon.	200 Gap.	164 Limoges.
94 Beaugency.	91 Château-Gontier.	109 Gien.	30 Lisieux.

N ^{os}	N ^{os}	N ^{os}	N ^{os}
120 Loches.	58 Morlaix.	254 Quillan.	53 Sarrebourg.
25 Longwy.	63 Mortagne.	72 Quimper.	119 Saumur.
138 Lons-le-Saunier.	146 Moulins.	90 Redon.	81 Sens.
88 Lorient.	*69 Nancy.	34 Reims.	208 Séverac.
70 Lunéville.	160 Nantua.	75 Rennes.	33 Soissons.
100-01 Lure-Mulhouse.	244-245 Narbonne -	23 Rethel.	203 Sore.
259 Luri.	Marseillan.	158 Roanne.	71 Strasbourg.
*168 Lyon.	20 Neufchâtel.	163 Rochechouart.	240 Tarbes.
148 Mâcon.	123 Nevers.	14 Rocroy.	191 Teste de Buch.
*247 Marseille.	225 Nice.	207 Rodez.	150 Thonon.
9 Maubeuge.	142 Niort.	31 Rouen.	169 <i>ter</i> Tignes.
239 Mauléon.	78 Nogent-le-Ro-	220 Saint-Affrique.	97 Tonnerre.
174 Mavriac.	trou.	59 Saint-Brieuc.	*248 Toulon.
77 Mayenne.	210 Orange.	149 Saint-Claude.	230 Toulouse.
49 Meaux.	95 Orléans.	177 Saint-Etienne.	151 Tour de Chassiron.
*65 Melun.	127 Ornans.	185 Saint-Flour.	107 Tours.
196 Mende.	242 Pamiers.	241 Saint-Gaudens.	42 Tréguier.
36 Metz.	48 Paris.	154 Saint-Jean d'Angély.	82 Troyes.
24 Mézières.	172 Périgueux.	179 Saint-Jean de	173 Tulle.
84 Mirecourt.	255 Perpignan.	Maurienne.	250 Urdos.
176 Monistrol.	140-56 Plouguerneu	238 Saint-Jean Pied	165 Ussel.
218 Montauban.	Ouessant.	de Port.	121 Valençay.
114 Montbéliard.	143 Poitiers.	28 Saint-Lô.	187 Valence.
167 Montbrison.	139 Pontarlier.	213 Saint-Martin de	160 <i>ter</i> Vallorcine.
21 Montdidier.	74 Pontivy.	Vésubie.	89 Vannes.
215 Mont-de-Mar-	87 Pont-l'Abbé.	104 Saint-Nazaire.	68 Vassy.
san.	225 <i>bis</i> Pont Saint-	*4 Saint-Omer.	35 Verdun.
145 Montluçon.	Louis.	135 Saint-Pierre.	262 Vieux.
233 Montpellier.	98 Privas.	10 Saint-Valéry.	216 Vicux Boucau.
216 Montréal.	66 Provins.	161 Saintes.	*188 Vizille.
6 Montreuil.	103 Quiberon.	213 <i>bis</i> Saorge.	16 Yvetot.

PRIX DE CHAQUE FEUILLE ACCOMPAGNÉE DE SA NOTICE EXPLICATIVE

En feuilles	6 fr.
Collée sur toile et pliée	10 fr.
— — et montée sur rouleaux	15 fr.

Nota. — Les feuilles n^{os} 2, 5, 15, 17, 40 et 56, 71, 86, 87, 88, 103, 139, 140, 160 *ter*, 169 *ter*, 179 *bis*, qui sont moins chargées que les autres comptent comme demi-feuilles et coûtent : en feuilles, 3 francs ; collées sur toile, 7 francs. Les feuilles n^{os} 1, 10, 18, 43, 53, 102, 115, 151, 190, 202, 203, 213 *bis*, 214, 225 *bis* comptent comme quarts de feuille et coûtent : en feuilles, 1 fr. 50 ; collée sur toile 5 fr. 50

Ajouter 0 fr. 50 par envoi pour l'emballage et l'affranchissement des cartes en feuilles.

PUBLICATIONS ANNEXES

- 1^o TABLEAUX DE GÉNÉRALITÉS : Titre, 2 francs. — Avertissement, avec tableau d'assemblage, 2 francs. — Légende technique, avec notice explicative, 2 francs. — Légende géologique générale, 6 feuilles à 2 francs chaque.
- 2^o COUPES LONGITUDINALES : Annexes aux feuilles de Meaux, Beauvais, Rouen et Evreux, Neufchâtel, Gray, 5 feuilles à 6 francs chaque.
- 3^o SECTIONS VERTICALES : Annexes aux feuilles de Meaux, Beauvais, 2 feuilles à 2 francs chaque.
- 4^o PERSPECTIVES PHOTOGRAPHIQUES : Annexe à la feuille de Paris, 4 feuilles à 2 francs chaque.

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 32 000^e comprendra le contenu de 16 feuilles de la carte au 80 000^e.

LISTE DES FEUILLES PARUES AU 1^{er} JANVIER 1912.

N^o 8. LILLE correspondant aux n^{os} 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 22 de la carte au 80 000^e.

N^o 9. MÉZIERES 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.

N^o 14. METZ correspondant aux n^{os} 34, 35, 36, 37, 50, 51, 52, 53, 67, 68, 69, 70, 82, 83, 84, 85 de la carte au 80 000^e.

Chaque feuille : collée sur toile et pliée 10 fr.
En feuille 6 fr.

N^o 33. CORSE correspondant aux n^{os} 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267 de la carte au 80 000^e.

Chaque feuille : collée sur toile et pliée 7 fr.
En feuilles 3 fr.

Ajouter 0 fr. 50 par envoi pour l'emballage et l'affranchissement des cartes en feuilles.

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, L. et M. Bertrand, Bigot, Boule, Bresson, Bureau, Carez, Delafond, Depéret, Dollfus, Douxami, Fournier, Gosselet, Grossouvre, Glangeaud, Haug, Kilian, Lacroix, de Launay, Lecornu, Le Verrier, de Margerie, Michel Lévy, Lugeon, Munier-Chalmas, Œlbert, Roussel, Seunes, Ternier, Vasseur, Vélain, Welsch, Zurcher, sous la direction de MM. MICHEL LÉVY, Inspecteur général des mines, Membre de l'Institut. Directeur du service et TERNIER, Ingénieur en chef des mines, adjoint à la Direction. 2^e édition complètement remise à jour. 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

Ajouter 0 fr. 85 par envoi pour l'emballage et l'affranchissement des cartes en feuilles, et 2 fr. 25 pour l'emballage et l'affranchissement des cartes montées sur rouleaux.

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.

Ajouter 0 fr. 85 par envoi pour l'emballage et l'affranchissement des cartes en feuilles, et 2 fr. 25 pour l'emballage et l'affranchissement des cartes montées sur rouleaux.

Carte géologique de la France au 500 millième.

Carte géologique de la France à l'échelle du 500 millième par DUFRENOY, et ELIE DE BEAUMONT, 6 feuilles de 1^m,15 sur 0^m,75, collées sur toile et pliées. . . 160 fr. 80

Explication de la carte géologique de la France.

Explication de la carte géologique de la France, publiée par le Ministère des Travaux publics.

Tome I^{er}. 1 volume in-4^o. *Epuisé.*

Tome II. 1 volume in-4^o. *Epuisé.*

Tome III (1^{re} partie). Craie, terrain tertiaire, chaîne des Pyrénées, terrain volcanique, par DUFRENOY. 1 volume in-4^o avec 18 figures dans le texte 4 fr.

Tome IV (2^o partie). 1 volume in-4^o. *Epuisé.*

Carte minière de la France.

Carte minière de la France à l'échelle du 1/1.250.000, par A. CAILLAUX, imprimée en 18 couleurs. Prix : en feuille, 20 fr. ; collée sur toile et pliée 25 fr.

Carte géologique de la France au 500 millième.

Carte géologique de la France à l'échelle du 500 millième, contenant en outre le Sud de l'Angleterre, la plus grande partie de la Belgique, le Luxembourg, les bords du Rhin jusqu'à Bonn et Francfort, l'Alsace-Lorraine, la Suisse occidentale, le Nord de l'Italie et le Nord de l'Espagne, par G. VASSEUR et L. CAREZ, docteurs ès sciences, comprenant 48 feuilles.

Prix de la carte complète en feuilles 100 fr.

— — — collée sur toile et pliée en 48 feuilles 140 fr.

— — — collée sur toile et montée sur rouleaux 140 fr.

* Chaque feuille séparément en feuille 4 fr.

— — — montée sur toile et pliée 6 fr.

N. B. — Les feuilles VII. N.O. — VII. S.O. — X. N.O. — X. S.O. — XIII. N.O. — XV. N.O., qui sont moins chargées que les autres, se vendent en feuille 2 fr. 50. — Collée sur toile, pliée 4 fr. 50.

Une légende sommaire donnant l'explication des teintes correspondant aux 50 divisions adoptées se vend séparément au prix de 2 francs en feuille et 3 francs collée sur toile et pliée.

MÉMOIRES POUR SERVIR A L'EXPLICATION

DE LA

CARTE GÉOLOGIQUE DÉTAILLÉE DE LA FRANCE

(Ministère des travaux publics.)

Géologie des Pyrénées françaises.

La géologie des Pyrénées françaises, par L. CAREZ, docteur ès sciences, collaborateur principal au service de la carte géologique de la France, ancien président de la Société géologique de France.

FASCICULE I. Index bibliographique : Feuilles de Bayonne, Saint-Jean-Pied-de-Port, Orthez, Mauléon, Urdos. 1 fort volume in-4^o 15 fr.

FASCICULE II. Feuilles de Tarbes et de Luz. 1 fort volume in-4^o, avec 9 planches hors texte 15 fr.

- FASCICULE III. Feuilles de *Bagnères-de-Luchon* et de *Saint-Gaudens*. 1 fort volume in-4° avec 2 cartes géologiques et 4 planches de coupes. 15 fr.
- FASCICULE IV. Feuilles de *Hospitalet*, *Foix*, *Pamiers*. 1 fort volume in-4° avec 25 figures dans le texte et 8 planches hors texte. 15 fr.
- FASCICULE V. Feuilles de *Prades*, *Quillan* et *Carcassonne*. 1 fort volume in-4° avec 29 figures dans le texte et 9 planches hors texte. 15 fr.
- FASCICULE VI. Feuilles de *Céret*, *Perpignan* et *Narbonne*. Structure générale (Supplément) avec la collaboration de M. BRESSON pour les coupes générales de la feuille d'Urdos. 1 fort volume in-4° avec 4 planches hors texte. 15 fr.

Géologie des Alpes occidentales.

Etudes géologiques dans les Alpes Occidentales. Contribution à la géologie des chaînes intérieures des Alpes françaises, par W. KILIAN, professeur à la faculté des sciences de l'Université de Grenoble, et J. RÉVIL, président de la Société d'histoire naturelle de Savoie, membre de l'Académie de Savoie.

Tome I. Description orographique et géologique de quelques parties de la Tarentaise, de la Maurienne et du Briançonnais septentrional. 1 volume in-4°, contenant 110 figures dans le texte, avec une carte géologique du Galibier et de ses environs, et 11 planches de cartes et de coupes géologiques. 30 fr.

Tome II (1^{er} fascicule). Description des terrains qui prennent part à la constitution géologique des zones intra-alpines françaises (terrains antéjurassiques). 1 volume in-4° contenant 26 figures dans le texte et 11 planches hors texte. 18 fr.

Géologie de la Corse.

Etude sur la constitution géologique de la Corse, par M. NENTIEN, ingénieur des mines. 1 volume in-4°, avec 31 figures dans le texte. 7 fr. 50

Les montagnes entre Briançon et Vallouise.

Les montagnes entre Briançon et Vallouise, écailles briançonnaises, terrains cristallins de l'Eychauda, massif de Pierre-Eyraultz, etc., par P. TERMIER, ingénieur en chef des mines, professeur à l'École des Mines. 1 volume in-4° contenant 25 figures et 13 planches encartées dans le texte et 1 carte en couleurs de la région avec coupes géologiques, montée sur toile, pliée, renfermée dans une pochette à la fin du volume. 12 fr.

Recherches sur la craie supérieure.

Recherches sur la craie supérieure, par A. DE GROSSOUVRE, ingénieur en chef des mines.

1^{re} partie. Stratigraphie générale, avec une monographie du genre *Micraster*, par J. LAMBERT. 2 volumes in-4° contenant 39 tableaux, 33 figures dans le texte et 3 planches hors texte. 30 fr.

2^e partie. Paléontologie. Les ammonites de la craie supérieure. 1 volume in-4° contenant 89 figures dans le texte et un atlas de 39 planches. 20 fr.

L'Ardenne.

L'Ardenne, par J. GOSSELET, professeur de géologie à la Faculté des sciences de Lille. 1 volume in-4° 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.

Pays de Bray.

Le pays de Bray, par A. DE LAPPARENT, ingénieur au corps des mines. 1 volume in-4° avec 20 figures intercalées dans le texte et 4 planches de cartes. 7 fr. 25

Le nummulitique alpin.

Etudes paléontologiques sur le nummulitique alpin, par JEAN BOUSSAC. Collaborateur adjoint au service de la carte géologique de la France. 1 volume in-4° et 1 atlas in-4° de 22 planches. 45 fr.

PUBLICATIONS DU SERVICE
DES
TOPOGRAPHIES SOUTERRAINES

(Ministère des Travaux publics.)

ÉTUDES DES GITES MINÉRAUX DE LA FRANCE

Minerais de fer oolithique de France.

Les minerais de fer oolithiques de France, par L. CAYEUX, professeur de géologie à l'École supérieure des mines et à l'Institut national agronomique.

Fascicule I. Minerais de fer primaires. 1 fort volume in-4° contenant 37 figures dans le texte et 19 planches hors texte. 15 fr.

Grès du tertiaire Parisien.

Structure et origine des grès du tertiaire Parisien, par L. CAYEUX, professeur à l'Institut national agronomique, professeur suppléant de géologie à l'École des mines. 1 volume in-4° avec 23 figures dans le texte et 10 planches hors texte . . . 9 fr.

Bassin houiller du Boulonnais.

Topographie souterraine du bassin houiller du Boulonnais au bassin d'Hardinghen, par A. OLRV, ingénieur en chef des mines. 1 volume grand in-4° contenant 44 figures dans le texte et 3 cartes en couleurs 15 fr.

Bassin houiller et permien de Blanzv et du Creusot.

Bassin houiller et permien de Blanzv et du Creusot. Fascicule 1^{er}. stratigraphie, par M. DELAFOND, inspecteur général des mines. 1 volume in-4°, contenant 29 figures et un atlas in-folio de 13 planches doubles 45 fr.

Fascicule II. Flore fossile par R. ZEILLER, inspecteur général des Mines. 1 volume in-4° et 1 atlas in-4° de 51 planches 36 fr.

Bassin houiller de la Loire.

Bassin houiller de la Loire, par L. GRÜNER, inspecteur général des mines, 2 volumes in-4°, et 1 atlas de 28 planches in-plano. 76 fr.

Bassin houiller de la Loire.

Nouvelles contributions à la topographie souterraine du bassin houiller de la Loire, par M. COSTE, ingénieur des mines, 1 volume in-4° et 1 atlas in-f° de 16 planches doubles. 50 fr.

Le texte se vend séparément au prix de 20 francs et l'atlas au prix de. . . 30 fr.

Cet ouvrage fait suite au *Bassin houiller de la Loire*, par GRÜNER.

Bassin houiller de Valenciennes.

Bassin houiller de Valenciennes (partie comprise dans le département du Nord), par A. OLRV, ingénieur en chef des mines. 1 volume in-4°, et 1 atlas de 12 planches in-plano. 52 fr.

Bassins houillers de Brioude, Brassac et Langeac.

Bassins houillers de Brioude et de Brassac, par J. DORLHAC, ingénieur civil des mines, et Bassin houiller de Langeac, par AMIOT, ingénieur au corps national des mines. 1 volume in-4° avec figure et 1 atlas de 18 planches in-folio. . . 37 fr. 50

Bassin houiller de Ronchamp.

Bassin houiller de Ronchamp, par E. TRAUTMANN, inspecteur général honoraire des mines. 1 volume in-4° et 1 atlas de 9 planches in-plano 15 fr. 50

Flore fossile du bassin houiller de Valenciennes.

Description de la flore fossile du bassin houiller de Valenciennes, par R. ZEILLER, ingénieur en chef des mines. 1 volume in-4° avec 45 figures dans le texte, 1 carte en couleur, et 1 atlas in-4° contenant 94 planches de dessins faits d'après nature et lithographiés par C. Cuisin 75 fr. 25

Bassin houiller et permien d'Autun et d'Épinac.

Bassin houiller et permien d'Autun et d'Épinac. Fascicule 1^{er}, Stratigraphie, par DELAFOND, ingénieur en chef des mines, avec 15 figures dans le texte, une planche et une carte géologique au 40 millième, par MICHEL LÉVY, DELAFOND et RENAULT 12 fr.

Fascicule II. Flore fossile (1^{re} partie), par R. ZEILLER, ingénieur en chef des mines. 1 volume in-4° et 1 atlas in-4° de 27 planches. 30 fr.

Fascicule III. Poissons fossiles, par le D^r SAUVAGE. 1 volume in-4° avec 5 planches. 4 fr.

Fascicule IV. Flore fossile (2^e partie), par B. RENAULT. 1 volume in-4°, avec 148 figures dans le texte, 2 planches et 1 atlas in-4° de 89 planches 50 fr.

Fascicule V. Poissons fossiles, par H. E. SAUVAGE, 1 volume in-4° avec 9 planches. 6 fr.

Carte géologique du bassin d'Autun.

Carte géologique du bassin d'Autun à l'échelle du 40 millième, par MICHEL LÉVY, DELAFOND et RENAULT, publiée par le Ministère des Travaux publics. 1 feuille de 1^m,05 sur 75 centimètres 6 fr.

Bassin houiller et permien de Brive.

Bassin houiller et permien de Brive. Fascicule 1^{er}, Stratigraphie, par GEORGES MOURET, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 volume in-4° avec 120 figures dans le texte, 2 planches et 1 carte géologique. — Fascicule II. Flore fossile, par R. ZEILLER, ingénieur en chef des mines. 1 volume in-4° avec 15 planches. Prix des 2 volumes 30 fr.

Terrains tertiaires de la Bresse.

Les terrains tertiaires de la Bresse et leurs gîtes de lignites et de minerais de fer, par F. DELAFOND, ingénieur en chef des mines et C. DÉPÉRET, professeur à la Faculté des sciences de Lyon. 1 volume in-4° avec 58 figures dans le texte et une carte géologique en couleurs, et 1 atlas in-4° de 19 planches 24 fr.

Bassin houiller du Pas-de-Calais.

Bassin houiller du Pas-de-Calais, par A. SOUBEIRAN, ingénieur des mines.

Première partie : Sous-arrondissement minéralogique d'Arras. *Epuisée.*

Deuxième partie : Sous-arrondissement minéralogique de Béthune. 1 volume in-4° et 1 atlas de 13 planches in-plano 36 fr.

Gîtes de charbon du Tonkin.

Flore fossile des gîtes de charbon du Tonkin, par R. ZEILLER, ingénieur en chef des mines, membre de l'Institut. 1^o Gîtes de charbon du Bas-Tonkin et de l'Annam. 2^o Gîtes de charbon de Yen-Baï. 3^o Gîtes de charbon de la Chine méridionale. 1 fort volume in-4° de texte contenant 4 figures et 6 planches et 1 atlas in-4° de 56 planches en phototypie 30 fr.

Assises crétacées et tertiaires du nord de la France.

Les assises crétacées et tertiaires dans les fosses et les sondages du nord de la France, par M. J. GOSSELET, membre correspondant de l'Institut, doyen honoraire de la Faculté des sciences de l'Université de Lille.

Fascicule I. Région de Douai, un volume in-4° avec 11 figures dans le texte et 1 atlas in-folio de 7 cartes et planches 15 fr.

- Fascicule II. Région de Lille, 1 volume in-4^o avec 11 figures dans le texte et 5 planches hors texte dont 4 de cartes et 1 de coupes en couleur 15 fr.
 Fascicule III. Région de Béthune, 1 volume in-4^o avec 27 figures dans le texte et 5 planches en couleurs hors texte 15 fr.

Bassin houiller de la Basse-Loire.

Bassin houiller de la Basse-Loire. Fascicule I. Histoire des concessions, pièces justificatives, description géologique par E. BUREAU, professeur honoraire au Museum d'histoire naturelle. 1 volume in-4^o contenant 10 figures, 2 planches et 1 carte géologique au 200/00^e, broché 48 fr.

BULLETIN DES SERVICES 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^o, 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.

Nous avons fait tirer à part un certain nombre d'exemplaires de chacun des bulletins destinés à être vendus séparément, aux prix suivants :

LISTE DES BULLETINS PARUS :

TOME I (N^{os} 1 à 10).

Mont Pilat et Plateau Central.

N^o 1. Etude sur le massif cristallin du Mont Pilat, sur la bordure orientale du Plateau central, entre Vienne et Saint-Vallier, et sur la prolongation des plis synclinaux houillers de Saint-Etienne et Vienne, par TERMIER, ingénieur des mines, professeur à l'École de Saint-Etienne. 1 brochure grand in-8^o avec 28 figures dans le texte et 2 planches 3 fr. 75

Environs de Lyon.

N^o 2. Note sur les terrains d'alluvions des environs de Lyon, par DELAFOND, ingénieur en chef des mines. 1 brochure grand in-8^o avec 1 planche 1 fr. 25

Pyrénées de l'Aude.

N^o 3. Note sur l'existence des phénomènes de recouvrement dans les Pyrénées de l'Aude, par L. CAREZ, docteur ès sciences. 1 brochure in-8^o, avec 1 planche. 1 fr. 25

Roches primitives de la feuille de Brive.

N^o 4. Note sur les roches primitives de la feuille de Brive, par L. DE LAUNAY, ingénieur des mines. 1 brochure grand in-8^o, avec 6 figures dans le texte. 0 fr. 75

Bassin tertiaire de Marseille.

N^o 5. Notes stratigraphiques sur le bassin tertiaire de Marseille, par CH. DEPÉRET, professeur à la Faculté des sciences de Lyon. 1 brochure grand in-8^o avec 6 figures dans le texte 1 fr. 50

Environs d'Annecy, la Roche, Bonneville, etc.

N° 6. Note sur la géologie des environs d'Annecy, la Roche, Bonneville et de la région comprise entre le Buet et Sallanches (Haute-Savoie), par G. MAILLARD, conservateur du musée d'Annecy. 1 volume grand in-8° avec 9 planches . . . 5 fr. 25

Éruptions du Menez-Hom (Finistère).

N° 7. Mémoire sur les éruptions diabasiques siluriennes du Menez-Hom (Finistère), par Ch. BARROIS, professeur adjoint à la Faculté des sciences de Lille. 1 volume grand in-8°, avec 23 figures dans le texte et 1 planche 4 fr.

Le nord de la France et le bassin de Paris.

N° 8. Relations entre les sables de l'éocène inférieur dans le nord de la France et dans le bassin de Paris, par J. GOSSELET, professeur à la Faculté des sciences de Lille, membre correspondant de l'Institut. 1 brochure grand in-8° avec 7 figures dans le texte 0 fr. 75

Roches des environs du Mont-Blanc.

N° 9. Etudes sur les roches cristallines et éruptives des environs du Mont-Blanc, par MICHEL LÉVY, ingénieur en chef des mines, directeur du service de la carte géologique de la France. 1 brochure grand in-8°, avec 4 planches en photogravure, une planche de coupes, et des figures dans le texte 2 fr. 50

Plateau central entre Tulle et Saint-Céré.

N° 10. Etude sur la stratigraphie du plateau central entre Tulle et Saint-Céré, par MOURET, ingénieur des ponts et chaussées. 1 brochure grand in-8°, avec 1 planche de coupes et une carte géologique 2 fr. 75

TOME II (N°s 11 à 20).

Roches de l'Ariège et de l'Auvergne.

N° 11. I. Contribution à l'étude des roches métamorphiques et éruptives de l'Ariège (feuille de Foix). — II. Sur les enclaves acides des roches volcaniques de l'Auvergne, par A. LACROIX, préparateur au Collège de France. 1 brochure grand in-8°, avec 12 figures dans le texte 3 fr.

Terrains Bressans. — Bassins de Blanzay et du Creusot.

N° 12. I. Nouvelle subdivision dans les terrains Bressans. — II. Bassin de Blanzay et du Creusot, par DELAFOND, ingénieur en chef des mines. 1 brochure grand in-8°, avec 16 figures dans le texte. 1 fr. 50

Éruptions du Velay.

N° 13. Les éruptions du Velay. I. Roches éruptives du Meygal. — II. Argiles métamorphosées par le phonolithe, à Saint-Pierre-Eynac, par P. THÉRIER, ingénieur des mines, professeur à l'École des mines de Saint-Etienne. 1 brochure grand in-8°, avec 11 figures dans le texte 1 fr. 50

Bassin de Paris.

N° 14. Recherches sur les ondulations des couches tertiaires dans le bassin de Paris, par GUSTAVE F. DOLLFUS. 1 brochure grand in-8° avec 16 figures dans le texte et une carte. 4 fr. 75

Forez et le Roannais.

N° 15. Note sur les formations géologiques du Forez et du Roannais, par LE VERRIER, ingénieur en chef des mines. 1 brochure grand in-8° avec 41 figures dans le texte et 4 planches. 4 fr. 75

Vallée d'Apt. — Le Pliocène à Théziers (Gard).

N° 16. I. Note sur les sables de la vallée d'Apt, par KILIAN, de la Faculté des sciences de Grenoble, et F. LEENHARDT, de la Faculté de théologie protestante de Montauban. — II. Note sur la découverte de l'horizon de Montaiguet à *Bulimus Hopei*, dans le bassin d'Apt, par DEPÉRET et LEENHARDT. — III. Note sur le pliocène et sur la position stratigraphique des couches à congéries de Théziers (Gard), par DEPÉRET, professeur à la Faculté des sciences de Lyon. 1 brochure grand in-8° avec 10 figures dans le texte et 1 planche 1 fr. 75

Structure des Corbières.

N° 17. Note sur la structure des Corbières, par EMM. DE MARGERIE. 1 brochure grand in-8° avec 3 figures dans le texte et 1 planche. 2 fr. 50

Chaîne de la Sainte-Baume.

N° 18. I. Note sur la continuation de la Chaîne de la Sainte-Baume (feuille de Draguignan), II, III, IV, V. Notes sur quelques points de la feuille de Castellane, par PH. ZUCHER, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 brochure grand in-8°, avec 22 figures dans le texte et 4 planches 3 fr. 25

Terrains tertiaires du Sud-Ouest.

N° 19. Contribution à l'étude des terrains tertiaires du sud-ouest de la France, par G. VASSEUR, professeur de géologie à la Faculté des sciences de Marseille, 1 brochure grand in-8°, avec 10 figures dans le texte 0 fr. 75

Massif de la Vanoise.

N° 20. Géologie et stratigraphie du Massif de la Vanoise, par TERMIER, ingénieur des mines, professeur à l'École de Saint-Etienne. 1 volume grand in-8°, avec 58 figures dans le texte, une carte géologique et 9 planches 10 fr.

TOME III (N°s 21 à 27).

Chaines subalpines entre Gap et Digne.

N° 21. Les chaines subalpines entre Gap et Digne. Contribution à l'histoire géologique des Alpes françaises, par EMILE HAUG, docteurs ès sciences, chef des travaux pratiques au Laboratoire de géologie de la Faculté des sciences de Paris. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte, 1 carte géologique et 3 planches 10 fr.

Environs d'Annecy.

N° 22. I. Note de M. Michel Lévy sur les derniers travaux de G. Maillard. II, III. Note sur les diverses régions de la feuille d'Annecy, par G. MAILLARD. 1 brochure grand in-8°, avec 45 figures dans le texte 2 fr. 50

Géologie de l'Oise. — Le trias de l'Ariège.

N° 23. I. Contribution à la géologie de l'Oise. Notice géologique de Beauvais, par H. THOMAS, contrôleur principal des mines, chef des travaux graphiques de la carte géologique de la France. II. Note sur le trias de l'Ariège et de l'Aude, par C. DE LACVIVIER, proviseur du lycée de Montpellier. 1 brochure grand in-8°, avec 12 figures dans le texte. 1 fr. 50

Massif d'Allauch.

N° 24. Le massif d'Allauch, au nord-ouest de Marseille, par M. BERTRAND, ingénieur en chef des mines, professeur de géologie à l'École nationale des mines. 1 brochure grand in-8°, avec 28 figures dans le texte et 2 planches 3 fr. 50

Craie des Corbières.

N° 25. Etude sur la craie supérieure. La craie des Corbières, par A. DE GROS-SOUVRE, ingénieur en chef des mines. 1 brochure grand in-8° avec 5 figures dans le texte. 0 fr. 75

Massifs du Chablais.

N° 26. Etude sur les massifs du Chablais compris entre l'Arve et la Drance (feuilles de Thonon et d'Annecy), par AUG. JACCARD, professeur de géologie à l'Académie de Neuchâtel. 1 brochure grand in-8°, avec 44 figures dans le texte. 2 fr. 25

La chaîne des Aiguilles rouges. — Roches du Flysch du Chablais.

N° 27. I. Note sur la prolongation vers le Sud de la chaîne des Aiguilles-Rouges (Montagnes de Pormenaz et du Prarion). — II. Etude sur les pointements de roches cristallines qui apparaissent au milieu du Flysch du Chablais, des Gets aux Fenils, par A. MICHEL-LÉVY, ingénieur en chef des mines. 1 brochure grand in-8° avec 18 figures dans le texte et 7 planches 3 fr. 50

TOME IV (N°s 28 à 34).

Description géologique du Velay.

N° 28. Description géologique du Velay, par MARCELLIN BOULE, agrégé de l'Université, docteur ès sciences. 1 volume grand in-8°, avec 80 figures dans le texte et 11 planches (*Epuisé*).

Contact du Jura méridional et de la zone subalpine.

N° 29. Contact du Jura méridional et de la zone subalpine aux environs de Chambéry (Savoie), par M. HOLLANDE. 1 brochure grand in-8° avec 23 figures dans le texte. 1 fr. 50

Vallée du Cher dans la région de Montluçon.

N° 30. Etude sur le Plateau central. — I. La Vallée du Cher dans la région de Montluçon, par L. DE LAUNAY, ingénieur des mines, professeur à l'École supérieure des mines. 1 brochure grand in-8° avec 23 figures dans le texte et 6 planches 3 fr. 50

Ophites et Lherzolites de l'Ariège.

N° 31. Note sur la distribution géographique et sur l'âge géologique des ophites et des lherzolites de l'Ariège, par C. DE LACVIVIER, proviseur du lycée de Montpellier. 1 brochure grand in-8° avec une figure dans le texte. 0 fr. 75

Le Môle et les collines de Faucigny.

N° 32. Le Môle et les collines de Faucigny (Haute-Savoie), par MARCEL BERTRAND, ingénieur en chef des mines, professeur de géologie à l'École des mines. 1 brochure grand in-8° avec 27 figures dans le texte et une carte en couleur. 2 fr. 25

Plissements siluriens du Cotentin.

N° 33. Sur les plissements siluriens dans la région du Cotentin, par L. LECORNU, ingénieur des mines, maître de conférences à la Faculté des sciences de Caen. 1 brochure grand in-8° avec 16 figures dans le texte. 1 fr. 50

Géologie de la vallée d'Aspe.

N° 34. Note sur la géologie de la haute vallée d'Aspe (Basses-Pyrénées), par J. SEUNES, professeur chargé de cours à la Faculté des sciences de Rennes. 1 brochure grand in-8° avec 15 figures dans le texte. 1 fr. 50

TOME V (N°s 35 à 37).

Etude stratigraphique des Pyrénées.

N° 35. Etude stratigraphique des Pyrénées, par JOSEPH ROUSSEL. 1 volume grand in-8° avec figures dans le texte et cartes. 17 fr. 25

Granite de Flamanville.

N° 36. Contribution à l'étude du granite de Flamanville et des granites français en général, par MICHEL LÉVY. 1 volume grand in-8° avec 6 figures dans le texte et 5 planches 2 fr. 25

Poudingues de Palassou dans le Tarn.

N° 37. I. Nouvelles observations sur l'extension des poudingues de Palassou dans le département du Tarn. — II. Observations au sujet d'une note de M. Caraven-Cachin, intitulée *Le Poudingue de Palassou dans le Tarn*. — III. Relations du terrain nummulitique de la montagne Noire avec les formations lacustres du Castrais, par G. VASSEUR, professeur à la Faculté des sciences de Marseille. 1 volume grand in-8°, avec une carte géologique et deux coupes 1 fr.

TOME VI (N°s 38 à 43).

Comptes rendus pour la campagne de 1893.

N° 38. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1893. 1 volume grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte et une planche. 7 fr. 75

Plateau infra-crétacé des environs de Nîmes.

N° 39. Le plateau infra-crétacé des environs de Nîmes, par TORCAPÈL, 1 volume grand in-8° avec 2 planches 2 fr. 75

Massif des Grandes-Rousses.

N° 40. Le massif des Grandes-Rousses, par M. P. TERMIER, professeur à l'École des mines de Saint-Etienne, ingénieur des mines. 1 volume grand in-8° avec 11 gravures dans le texte et 6 planches et une carte en couleurs. 8 fr.

Vallée des Déserts, près Chambéry.

N° 41. Etude stratigraphique des terrains tertiaires oligocènes de la Vallée des Déserts, près Chambéry, et leur extension dans la zone subalpine et le Jura méridional, par HOLLANDE, directeur de l'École préparatoire à l'enseignement supérieur de Chambéry. 1 brochure in-8°, avec 12 figures dans le texte. 1 fr. 50

Lherzolite et ophites des Pyrénées.

N° 42. Les phénomènes de contact de la lherzolite et de quelques ophites des Pyrénées, par A. LACROIX, professeur de minéralogie au Muséum d'histoire naturelle. 1 volume grand in-8°, avec 23 figures dans le texte et 3 planches. 6 fr. 75

Plateau de Lannemezan.

N° 43. Le plateau de Lannemezan et les alluvions anciennes des hautes vallées de la Garonne et de la Neste, par MARCELLIN BOULE. 1 brochure in-8°, avec 4 figures dans le texte et 4 planches. 2 fr. 50

TOME VII (N°s 44 à 49).

Comptes rendus pour la campagne de 1894.

N° 44. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1894. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte. 8 fr. 25

Leucotéphrite du Culm du Mâconnais.

N° 45. Leucotéphrite à pyroxène de la base du Culm du Mâconnais, par A. MICHEL LÉVY et A. LACROIX. 1 brochure grand in-8°, avec 2 figures dans le texte et 3 planches 0 fr. 75

Massif de Saint-Saulge.

N° 46. Etude sur le plateau central. — Le massif de Saint-Saulge et ses relations avec le terrain houiller de Decize, par L. DE LAUNAY, ingénieur des mines, professeur à l'École supérieure des mines. 1 brochure grand in-8° 3 fr.

Tectonique des hautes chaînes calcaires de Savoie

N° 47. Etude sur la tectonique des hautes chaînes calcaires de Savoie, par EMILE HAUG, chef des travaux pratiques de géologie à la Faculté des sciences de Paris. 1 volume grand in-8°, avec 13 figures dans le texte et 6 planches 7 fr. 25

Structure de la région de Castellane.

N° 48. Note sur la structure de la région de Castellane, par G. ZÜRCHER, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8°, avec 21 figures dans le texte et 6 planches 3 fr. 50

La Région de la Brèche du Chablais.

N° 49. La région de la Brèche du Chablais (Haute-Savoie), par MAURICE LUGEON, docteur ès sciences physiques et naturelles. 1 volume grand in-8° avec 58 figures dans le texte et 8 planches. 17 fr. 25

TOME VIII (N°s 50 à 55).

Le jurassique à l'ouest du Plateau Central.

N° 50. Le jurassique à l'ouest du Plateau Central. Contribution à l'histoire des mers jurassiques dans le bassin de l'Aquitaine, par PH. GLANGEAUD, agrégé de l'Université. 1 volume grand in-8° avec 45 figures dans le texte et une carte. 12 fr. 75

Feuille de Cahors.

N° 51. Le permien, le trias et le jurassique de la feuille de Cahors, par EUGÈNE FOURNIER. 1 brochure grand in-8°, avec 2 figures dans le texte 0 fr. 75

Massifs du Canigou et de l'Albère.

N° 52. Etude stratigraphique des massifs montagneux du Canigou et de l'Albère, par JOSEPH ROUSSEL. 1 brochure grand in-8°, avec 2 figures dans le texte, 2 planches et 1 carte en couleurs 3 fr.

Comptes rendus pour la campagne de 1895.

N° 53. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1895. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte 10 fr. 50

Cantal miocène.

N° 54. Le Cantal miocène, par MARCELLIN BOULE. 1 brochure in-8°, avec 16 figures dans le texte et 2 planches. 2 fr. 50

Roches éruptives de la chaîne de Belledonne.

N° 55. Note sur les roches éruptives basiques et sur les amphiborites de la chaîne de Belledonne, par LOUIS DUPARC, professeur de minéralogie et géologie à l'Université de Genève. 1 brochure grand in-8° 1 fr. 50

TOME IX (N°s 56 à 60).

Le nord des Alpes-Maritimes.

N° 56. Etude géologique du nord des Alpes-Maritimes, par LÉON BERTRAND, agrégé de l'Université, docteur ès sciences, chargé de conférences de pétrographie à la Faculté des sciences de Paris. 1 volume grand in-8°, avec 34 figures dans le texte et 8 planches 13 fr.

Porphyre bleu de l'Esterel.

N° 57. Mémoire sur le porphyre bleu de l'Esterel, par A. MICHEL LÉVY, membre de l'Institut, ingénieur en chef des mines. 1 volume grand in-8°, avec 18 figures dans le texte et 8 planches. 2 fr. 75

Tertiaire de la Sologne.

N° 58. Tertiaire de la Sologne. Oxfordien et rauracien de l'Est et du Sud-Est du bassin de Paris, par A. DE GROSSOUVRE, ingénieur en chef des mines. 1 brochure grand in-8°, avec 2 figures dans le texte 0 fr. 75

Comptes rendus pour la campagne de 1896.

N° 59. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1896. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte. 8 fr. 25

Bordure sud-ouest du Mont-Blanc.

N° 60. La bordure sud-ouest du Mont-Blanc, les plis couchés du Mont Joly et de ses attaches, par ETIENNE RITTER, docteur ès sciences. 1 volume grand in-8°, avec 38 figures dans le texte et 6 planches. 14 fr. 25

TOME X (N°s 61 à 69).

Massif du Haut-Giffre.

N° 61. Le massif du Haut-Giffre. Etude sur le raccord des plis couchés de la vallée de l'Arve avec ceux des Tours Salières et de la Dent du Midi, par ETIENNE RITTER, docteur ès sciences. 1 brochure grand in-8°, avec 8 figures dans le texte et 3 planches 3 fr.

Le Portlandien du bassin de l'Aquitaine.

N° 62. Le Portlandien du bassin de l'Aquitaine, par PH. GLANGEAUD. 1 brochure grand in-8°, avec 9 figures dans le texte et 1 carte 2 fr. 25

Comptes rendus pour la campagne de 1897.

N° 63. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1897. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte 8 fr. 25

Granite des Pyrénées. I.

N° 64. Le granite des Pyrénées et ses phénomènes de contact. Premier mémoire : *les contacts de la haute Ariège*, par A. LACROIX, professeur de minéralogie au Muséum d'histoire naturelle. 1 brochure grand in-8°, avec 14 figures dans le texte et 3 planches 3 fr. 75

Plateau des Déserts, près Chambéry.

N° 65. Note sur les terrains tertiaires du plateau des Déserts, près Chambéry (Savoie), par H. DOUXAMI, docteur ès sciences, et J. RÉVIL, président de la Société d'histoire naturelle de Savoie. 1 brochure grand in-8°, avec 2 figures dans le texte. 1 fr. 50

Dôme de la Grésigne.

N° 66. Le Dôme de la Grésigne (feuille de Montauban), par E. FOURNIER, chargé de cours à l'Université de Besançon. 1 brochure grand in-8°, avec 2 figures dans le texte 0 fr. 75

Le Gabbro du Pallet.

N° 67. Le Gabbro du Pallet et ses modifications, par M. A. LACROIX. 1 volume grand in-8° avec 14 figures dans le texte et 1 planche 3 fr. 25

Nappes de recouvrement de la Basse-Provence.

N° 68. La grande nappe de recouvrement de la Basse-Provence, par MARCEL BERTRAND, membre de l'Institut, ingénieur en chef des mines. 1 volume grand in-8° avec 42 figures dans le texte et 3 planches. 4 fr. 75

Comptes rendus pour la campagne de 1898.

N° 69. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1898. 1 volume grand in-8° 6 fr. 75

TOME XI (N°s 70 à 78).

Crétacé du Bassin de l'Aquitaine.

N° 70. Etude sur les plissements du crétacé du bassin de l'Aquitaine, par PH. GLANGEAUD, maître de conférences à l'Université de Clermont-Ferrand. 1 volume grand in-8° avec 22 figures et 2 planches. 3 fr.

Granite des Pyrénées. II.

N° 71. Le Granite des Pyrénées et ses phénomènes de contact (*deuxième mémoire*). Les contacts de la haute Ariège, de l'Aude, des Pyrénées-Orientales et des Hautes-Pyrénées par A. LACROIX, professeur de Minéralogie au Museum d'histoire naturelle. 1 brochure grand in-8°, contenant 16 figures dans le texte et 3 planches. 3 fr.

Géologie du plateau Central.

N° 72. Aperçu sur la géologie de la partie sud-ouest du plateau central de la France, par G. MOURET, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8° avec 4 planches 4 fr. 25

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1899.

N° 73. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1899, 1 volume grand in-8°. 6 fr. 75

Etudes géologiques des Pyrénées.

N° 74. Contribution à l'étude géologique des Pyrénées par JOSEPH ROUSSEL, docteur ès sciences, professeur au collège de Meaux. 1 brochure grand in-8° avec 10 figures dans le texte 1 fr. 50

Alpes delphino-provençales.

N° 75. Nouvelles observations géologiques dans les Alpes delphino-provençales, par M. W. KILIAN, professeur de géologie à l'Université de Grenoble. 1 brochure in-8° avec 4 figures dans le texte et une planche 2 fr.

Géologie des environs d'Aurillac.

N° 76. Géologie des environs d'Aurillac et observations nouvelles sur le Cantal, par MARCELLIN BOULE, collaborateur principal, 1 volume grand in-8° contenant 33 figures dans le texte et 2 planches. 5 fr.

Dislocation des Bauges (Savoie).

N° 77. Les dislocations des Bauges (Savoie), par MAURICE LUGEON, professeur de géographie physique et de géologie pratique de l'Université de Lausanne. 1 volume grand in-8°, contenant 35 figures dans le texte et 6 planches. 8 fr.

Régime des Eaux et Géologie du Haut-Quercy.

N° 78. I. Etudes sur le régime des eaux dans le Haut-Quercy, depuis l'éocène supérieur jusqu'à l'époque actuelle. — II. Etudes géologiques sur le Haut-Quercy

(feuille de Gourdon), par M. E. FOURNIER, chargé de cours de géologie à la Faculté des Sciences de l'Université de Besançon. 1 brochure grand in-8° avec 4 figures dans le texte. 1 fr. 50

TOME XII (N^{os} 79 à 86).

Système glaciaire des Vosges françaises.

N^o 79. Contribution à l'étude du système glaciaire des Vosges françaises, par M. A. DELEBECQUE, ingénieur des ponts et chaussées. 1 brochure grand in-8° avec 1 planche. 1 fr. 50

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1900.

N^o 80. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1900. 1 volume grand in-8° avec figures dans le texte. 5 fr. 25

Géologie des environs de Bellegarde.

N^o 81. Etude sur la vallée du Rhône aux environs de Bellegarde, par H. DOUXAMI, docteur ès sciences. 1 brochure grand in-8° avec 3 figures dans le texte. 1 fr. 50

Géologie du volcan de Gravenoire.

N^o 82. Monographie du volcan de Gravenoire, près de Clermont-Ferrand, par PH. GLANGEAUD, maître de conférences à l'Université de Clermont-Ferrand. 1 volume grand in-8° avec 13 gravures dans le texte et 2 planches. 2 fr. 75

Roches éruptives carbonifères de la Creuse.

N^o 83. Etude sur le Plateau Central III. Les roches éruptives carbonifères de la Creuse (feuille d'Aubusson). Microgranulites, Porphyres, Kersantites. Orthophyres et Porphyrites, par L. DE LAUNAY, ingénieur en chef des mines. 1 volume grand in-8° avec 32 figures et 2 planches. 7 fr.

Étude géologique des Pyrénées.

N^o 84. I. Le primaire de Betchat et de Cabanères, la granulite et l'ophite de Betchat et de Salies-du-Salat. — II. Le pli du Raz-Mouchet. — III. Transgressivité et dénudation. Les Klippes des Pyrénées. L'âge des couches à caprines et orbitoline de la bande crétacée de Cabachon-Padern, par J. ROUSSEL, docteur ès sciences, professeur au collège de Meaux. 1 volume grand in-8° avec 7 figures et 2 planches. 3 fr.

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1901.

N^o 85. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1901. 1 volume grand in-8° avec figures dans le texte. 9 fr.

Formations tertiaires.

N^o 86. Etude sur les formations tertiaires, par G. VASSEUR, professeur à la Faculté des sciences de Marseille. 1 volume grand in-8°. 1 fr.

TOME XIII (N^{os} 87 à 92).

Études géologiques sur la Limagne d'Auvergne.

N^o 87. Etudes géologiques sur la Limagne d'Auvergne, par J. GIRAUD, agrégé des sciences naturelles. 1 volume grand in-8°. 20 fr.

La Caverne de Trépail (Marne).

N^o 88. La caverne de Trépail (Marne) et les rivières souterraines de la craie, par M. E. MARTEL, collaborateur du service de la carte géologique. 1 brochure in-8°, avec 2 planches hors texte. 2 fr. 25

Nappes du Jura franc-comtois.

N° 89. Etude sur les sources, les résurgences et les nappes aquifères du Jura franc-comtois, par E. FOURNIER, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Besançon, 1 brochure in-8° avec 31 figures dans le texte 3 fr.

Terrains glaciaires des vallées de l'Ain.

N° 90. Contribution à l'étude des terrains glaciaires des vallées de l'Ain et de ses principaux affluents, par A. DELEBECQUE, ingénieur des ponts et chaussées, collaborateur adjoint. 1 brochure in-8° avec 1 planche 1 fr. 75

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1902.

N° 91. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1902. 1 volume grand in-8°. 8 fr. 25

TOME XIV (N°s 92 à 95).

Magmas chimiques dans les séries volcaniques françaises.

N° 92. Contribution à l'étude des magmas chimiques dans les principales séries volcaniques françaises, application de la nouvelle classification quantitative américaine, par MICHEL-LÉVY, membre de l'Institut, directeur des services de la carte géologique de France. 1 brochure in-8°. 2 fr. 25

Formations anciennes des Hautes et Basses-Pyrénées.

N° 93. Etudes sur les formations anciennes des Hautes et Basses-Pyrénées (Haute-Chaîne, par M. A. BRESSON, préparateur de géologie à la Faculté des sciences de Besançon. 1 volume grand in-8° avec 77 figures dans le texte et 7 planches. *Épuisé.*

Recherche et captage des eaux potables.

N° 94. Etudes sur les projets d'alimentation, le captage, la recherche et la protection des eaux potables, par M. E. FOURNIER, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Besançon, collaborateur adjoint. 1 brochure grand in-8° avec 1 figure. 1 fr. 50

Bordure sud-ouest du Massif Central.

N° 95. Etude géologique de la bordure sud-ouest du Massif Central, par ARMAND TRÉVENIN, docteur ès sciences, assistant au Muséum d'histoire naturelle. 1 volume grand in-8° avec 51 figures, 1 carte géologique de la région et 5 planches de coupes. 11 fr.

TOME XV (N°s 96 à 102).

Magmas chimiques dans les séries éruptives françaises.

N° 96. Contribution à l'étude des magmas chimiques dans les principales séries éruptives françaises. Paramètres magmatiques, par M. MICHEL-LÉVY, membre de l'Institut, inspecteur général des mines. 1 brochure grand in-8°. 1 fr. 50

Stratigraphie des Pyrénées.

N° 97. Tableau stratigraphique des Pyrénées, par J. ROUSSEL, docteur ès sciences, professeur au collège de Meaux. 1 volume grand in-8° contenant 66 figures et 3 planches hors texte 10 fr.

Comptes rendus pour la campagne de 1903.

N° 98. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1903. 1 volume grand in-8° avec figures et 2 planches hors texte 8 fr.

Les cartes géologiques au point de vue de l'agriculture.

N° 99. L'interprétation des cartes géologiques au point de vue de l'agriculture, par M. E. FOURNIER, professeur de géologie et de minéralogie à la Faculté des sciences de l'Université de Besançon. 1 brochure grand in-8°. 1 fr. 50

Bassin houiller du Boulonnais.

N° 100. Travaux d'exploitation et de recherche exécutés dans le bassin houiller du Boulonnais et dans la région comprise entre le bassin du Pas de Calais et la mer, par A. OLRY, ingénieur en chef des mines. 1 volume in-8° contenant 18 figures dans le texte et 2 planches en couleur 8 fr. 75

La zone subalpine aux environs de Chambéry.

N° 101. La zone subalpine aux environs de Chambéry, par M. HOLLANDE, directeur de l'Ecole préparatoire à l'enseignement supérieur de Chambéry. 1 brochure grand in-8° avec 6 figures dans le texte et 1 planche 1 fr. 75

Géologie et origine des lacs des Sept-Laux.

N° 102. Situation géologique et origine des lacs des Sept-Laux. Comparaison avec les lacs de l'Engadine et de la Bernina Bassins rocheux ou barrages morainiques, par A. DELEBECQUE, ingénieur des ponts et chaussées. 1 brochure in-8° avec 1 planche. 1 fr. 75

TOME XVI (N°s 103 à 111).

Dépôts du bassin de la Durance.

N° 103. Notes sur les dépôts pleistocènes du bassin de la Durance, par DAVID MARTIN, conservateur du Musée départemental des Hautes-Alpes à Gap. 1 brochure in-8° avec 9 figures dans le texte et 1 planche 1 fr.

Terrasses de l'Ariège et de ses affluents.

N° 104. Systèmes de terrasses de l'Ariège et de ses affluents, par J. SAVORNIN, préparateur à l'Ecole supérieure des sciences d'Alger. 1 brochure in-8° avec 5 figures dans le texte 1 fr. 25

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1904.

N° 105. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1904. 1 volume grand in-8° avec figures dans le texte et 2 planches hors texte 8 fr.

Revision de la feuille de Grenoble.

N° 106. Revision de la feuille de Grenoble, par le capitaine HIRZET, adjoint à l'Ecole d'artillerie du 14^e corps d'armée à Grenoble, collaborateur auxiliaire. 1 brochure in-8° 0 fr. 75

L'eau en Beauce.

N° 107. L'eau en Beauce, par M. GUSTAVE DOLLFUS, ancien président de la Société géologique de France, collaborateur principal. 1 brochure in-8° avec 1 planche. 2 fr. 50

Tectonique du massif crétacé.

N° 108. Note sur la tectonique du massif crétacé situé au nord du giffre (Haute-Savoie), par CH. JACOB, agrégé de l'Université, collaborateur adjoint. 1 brochure in-8° avec 1 figure dans le texte et 2 planches. 1 fr. 25

Dérivations préglaciaires de la Durance.

N° 109. Dérivations préglaciaires de la Durance et canons adventifs subglaciaires par D. MARTIN, conservateur du Musée départemental des Hautes-Alpes à Gap. 1 brochure in-8° avec 10 figures dans le texte. 0 fr. 75

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1905.

N° 110. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1905. 1 volume in-8° avec figures dans le texte. 10 fr.

Hydrologie des environs de Garéoult.

N° 111. Essai d'une monographie hydrologique des environs de Garéoult (Var), par W. KILIAN, professeur à la Faculté des sciences de Grenoble. 1 brochure in-8° avec 4 planches hors texte 2 fr. 50

TOME XVII (N°s 112 à 118).

Dislocations des environs de Mouthier-Hautepierre.

N° 112. Sur les dislocations des environs de Mouthier-Hautepierre (Doubs), par W. KILIAN, professeur à la Faculté des sciences de Grenoble et E. HAUG, professeur à la Faculté des sciences de Paris. 1 brochure in-8° avec 6 figures dans le texte et 4 planches 2 fr. 50

Granite de Flamanville.

N° 113. Etude chimique du granite de Flamanville, par A. LECLÈRE, ingénieur en chef des mines. 1 brochure in-8° avec 1 figure dans le texte 1 fr. 50

Études sur la Corse. I.

N° 114. Etude sur la Corse. I. Etude pétrographique des roches éruptives sodiques de Corse, par J. DEPRAT, docteur ès sciences, chargé de cours à la Faculté des sciences de Besançon. 1 brochure in-8° contenant 16 figures dans le texte, 3 planches et 1 carte. 4 fr. 50

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1906.

N° 115. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1906. 1 volume in-8° avec figures. 9 fr.

Schistes et quartzites du Morbihan.

N° 116. Les schistes et quartzites graphitiques du Morbihan, par C. PUSSENOT, capitaine à la direction d'artillerie de Grenoble. 1 brochure in-8° avec 1 carte hors texte 1 fr. 75

Études sur la Corse. II.

N° 117. Etudes sur la Corse II. Etude des roches éruptives carbonifères et permianes du nord-ouest de la Corse, par J. DEPRAT, docteur ès sciences, chargé de cours à la Faculté des sciences de Besançon. 1 volume in-8° avec 18 figures, 3 tableaux et 1 planche. 5 fr. 50

Stratigraphie des Pyrénées.

N° 118. Contribution à l'histoire stratigraphique et tectonique des Pyrénées orientales et centrales, par L. BERTRAND, chargé de cours de géologie à la Faculté des sciences de Paris. 1 volume in-8° avec 40 figures dans le texte et 5 planches . 14 fr.

TOME XVIII (N°s 119 à 121).

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1907.

N° 119. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1907. 1 volume in-8°. 10 fr.

Terrains primaires du Morvan et de la Loire.

N° 120. Les terrains primaires du Morvan et de la Loire, par AL. MICHEL-LÉVY, garde général des eaux et forêts, préparateur au Collège de France. 1 volume in-8° avec 51 figures et 7 planches. 18 fr. 57

Études sur les Pyrénées basques.

N° 121. Etudes sur les Pyrénées basques (Basses-Pyrénées, Navarre et Guipuzcoa),

par E. FOURNIER, professeur à la Faculté des sciences de Besançon. 1 volume in-8° avec 33 figures. 3 fr.

TOME XIX (N^{os} 122 à 124).**Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1908.**

N^o 122. Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1908. 1 volume in-8° 10 fr.

Régions volcaniques du Puy-de-Dôme.

N^o 123. Les régions volcaniques du Puy-de-Dôme. I. La Limagne et la chaîne volcanique de la Sioule, par PH. GLANGEAUD, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Clermont-Ferrand. 1 volume in-8° avec 73 figures dans le texte et 3 planches. 10 fr.

Étage aquitainien.

N^o 124. Essai sur l'étage aquitainien, par G.-F. DOLLFUS. 1 volume in-8° avec 6 planches hors texte. 8 fr.

TOME XX (N^{os} 125 et 126).**Recherches sur le Massif Central.**

N^o 125. Recherches paléophytologiques dans le Massif Central, par A. LAUBY, collaborateur au service de la carte géologique de France. 1 volume in-8° avec 53 figures dans le texte et 14 planches, et 1 carte des gisements de végétaux fossiles connus dans le Massif Central 27 fr.

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1909.

N^o 126. Résumé des travaux des collaborateurs sur les feuilles d'Arras, Rennes, Nantes, Fontainebleau, Bourges, Neufchâtel, Saintes, La Rochelle, Lesparre, Dijon, Pontarlier, Annecy, Chambéry, Nantua, Montbéliard, Ferrette, Lure, Clermont, Ferrand, Rochechouart, Lyon, Montbrison, Bergerac, Grignols, Orthez, Céret, Foix, Prades, Avignon, Nice, Antibes, Vizille, Avignon, Toulon, Briançon, Saint-Claude-Nantua, Chambéry, Corte, 1909. 1 volume in-8° avec figures dans le texte et 2 planches hors texte 12 fr.

TOME XXI (N^{os} 127 à 132).**Grès de Fontainebleau.**

N^o 127. Erosion des grès de Fontainebleau, par E. MARTEL, collaborateur adjoint au service de la carte géologique. 1 brochure in-8° avec 28 figures dans le texte. 2 fr. 25

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1910.

N^o 128. Résumé des travaux des collaborateurs sur les feuilles de Saint-Omer, Amiens, Fontainebleau, Châteaudun, Bourges, Sables d'Olonne, Dijon, Pontarlier, Beaune, Tonnerre, Lure, Lyon, Saint-Claude, Nantua, Chambéry, Montbrison, Bergerac, Villeréal, Rodez, Toulouse, Baznères-de-Luchon, Foix, l'Hospitalet, Prades, Orthez, Draguignan, Marseille, Aix, Vizille, Grenoble, Chambéry, Briançon, Bastelica, Corte. 1 volume in-8° avec figures dans le texte et 2 planches hors texte. 7 fr. 50

Les formations fluviaux-glaciaires du Bas-Dauphiné.

N^o 129. Essai de synchronisme des terrasses et moraines de la Bièvre-Valloire et de la Basse-Isère, par W. KILIAN, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Grenoble, et M. GIGNOUX, préparateur à l'Université de Grenoble. 1 volume in-8° avec 1 carte, 2 planches en héliogravure, 2 planches de profils, 2 tableaux hors texte et 5 figures dans le texte 7 fr. 50

L'Esterel.

N° 130. Etude stratigraphique, pétrographique et tectonique de l'Esterel, par ALBERT MICHEL-LÉVY, inspecteur adjoint des eaux et forêts. 1 volume in-8° avec 8 planches hors texte, 1 carte géologique en couleurs et 11 figures. . . . 5 fr. 75

Terrains secondaires dans les Pyrénées orientales ariégeoises.

N° 131. Contribution à l'étude du métamorphisme des terrains secondaires dans les Pyrénées orientales ariégeoises, par MICHEL LONGCHAMON, élève de l'Ecole normale supérieure, licencié ès sciences, collaborateur auxiliaire du Service de la carte géologique. 1 volume in-8° avec 7 figures 3 fr. 75

Comptes rendus des collaborateurs pour la campagne de 1911.

N° 132. Résumé des travaux des collaborateurs sur les feuilles de Saint-Omer, Châteaudun, Bourges, Nantes, Saintes, La Rochelle, Pontarlier, Chambéry, Nantua, Saint-Claude, Lyon, Clermont, Brioude, Limoges, Villeréal, Bergerac, Foix, L'Hospitalet, Prades, Toulouse, Draguignan, Toulon, Aix, Marseille et Vizille. 1 volume in-8° avec figures et 2 planches 10 fr.

CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE AU 50 MILLIÈME *

Carte géologique de l'Algérie à l'échelle du 50 millième, publiée par le ministère des Travaux publics, devant comprendre environ 200 feuilles de 0^m,80 × 0^m,57. Chaque feuille accompagnée d'une notice explicative se vend séparément en feuille 6 francs, collée sur toile et pliée, 9 francs. Ajouter 0,50 par envoi pour l'emballage et l'affranchissement des cartes en feuilles.

LISTE DES FEUILLES PARUES AU 1^{er} OCTOBRE 1912.

N° 88. Aïn-Bessam.	N° 73. Constantine.	N° 153. Oran.
N° 116. Aïn-Tagrout.	N° 8 23. Dellys-Tizi-Ouzou.	N° 82. Oued-Fodja.
Alger (<i>bis</i>).	N° 44. Dra-El-Mizane.	N° 43. Palestro.
N° 9-24. Azazga. Port-Gueydon.	N° 74. El-Aria.	N° 156. Relizane.
N° 208-239. Béni-Saf, Pont-de-l'Isser.	N° 45. Fort-National.	N° 104. Renault.
N° 63. Blida.	N° 54. Guelma.	N° 154. Saint-Cloud.
N° 16-17. Bone Bugeaud.	N° 41. Koléa.	N° 51. Sidi Dris.
N° 115. Bordj Bou Arreridj.	N° 76. La Mahouna.	N° 52. Smendou.
N° 103. Bosquet.	N° 114. Mansourah.	N° 300. Terni.
N° 66. Bouira.	N° 62. Marengo.	N° 85. Vesoul-Benian.
N° 83. Carnot.	N° 86. Médéa.	N° 81. Warnier.
	N° 22. Ménerville.	
	N° 84. Miliana.	

Voir tableau d'assemblage au verso de celui de la carte géologique de France au 80 millième.

DOCUMENTS RELATIFS A LA GÉOLOGIE DE L'ALGÉRIE *

Paléontologie. — Monographies.

Bubalus antiquus, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 10 planches. . . .	10 fr.
Caméliens et Cervidés, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 8 planches. . .	8 fr.
Bœufs-taureaux, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 19 planches. . . .	20 fr.
Les bosélaphe Ray, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 11 planches. . .	15 fr.
Les antilopes Pallas, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 15 planches. . .	12 fr.
Les éléphants quaternaires, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 15 planches.	15 fr.
Les rhinocéros quaternaires, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 12 planches.	12 fr.
Les hippopotames, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 21 planches. . . .	22 fr.
Equidés, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 12 planches.	12 fr.
Suilliens, Porciens, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 10 planches. . . .	10 fr.
Carnassiers, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 15 planches.	15 fr.
Singe et homme, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 8 planches.	8 fr.
Ovidés, par A. POMEL. 1 volume in-4° avec 14 planches.	14 fr.

MATÉRIAUX POUR LA CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE *

I^{re} SÉRIE. — PALÉONTOLOGIE.

- N^o 3. Fossiles miocènes (I^{re} partie), par A. BRIVES, Docteur ès sciences. 1 volume in-4^o avec 5 planches. 6 fr.
 N^o 4. Fossiles tertiaires de la région de Guelma, par J. DARESTE DE LA CHAVANNE, docteur ès sciences, préparateur adjoint au laboratoire de géologie de l'Université de Lyon. 1 volume in-8^o avec 9 planches 4 fr.

BULLETIN DU SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE L'ALGÉRIE *

II^e SÉRIE. — STRATIGRAPHIE. — DESCRIPTIONS RÉGIONALES.

- N^o 2. Les terrains miocènes du bassin du Chélif et du Dahra, par A. BRIVES, docteur ès sciences. 1 volume in-4^o avec 4 planches. 6 fr.
 N^o 3. Le Djebel Amour et les monts des Oulad-Nayl, Stratigraphie, tectonique et description géologique détaillée, par ET. RITTER, docteur ès sciences. 1 volume in-8^o avec 10 figures dans le texte et 4 planches hors texte 4 fr.
 N^o 4. Étude géologique du bassin de la Tafna (Algérie), par LOUIS GENTIL, docteur ès sciences, chargé de cours à la Sorbonne, collaborateur aux services des cartes géologiques de la France et de l'Algérie. 1 volume in-8^o contenant 88 figures dans le texte et 4 planches 14 fr.
 Carte géologique du bassin de la Tafna (Oran), au 1/200 000^e, par LOUIS GENTIL, 1 feuille. 4 fr.
 N^o 5. La région de Guelma. Étude spéciale des terrains tertiaires, par J. DARESTE DE LA CHAVANNE, docteur ès sciences, collaborateur au service de la carte géologique de l'Algérie. 1 volume in-8^o avec 5 planches 10 fr.
 N^o 6. Esquisse géologique du Bassin de la Seybouse et de quelques régions voisines, par JOSEPH BLAYAC, docteur ès sciences, préparateur de géologie à la Faculté des sciences de l'Université de Paris. 1 volume in-8^o avec 53 figures dans le texte et 5 planches 14 fr.

III^e SÉRIE. — GÉOLOGIE APPLIQUÉE. — ÉTUDES RÉGIONALES.

- N^o 1. Essai sur l'hydrologie du Hodna. Régime artésien, sources vauclusiennes, sources thermo-minérales, par J. SAVORNIN, préparateur à l'école supérieure de sciences d'Alger. 1 volume in-8^o avec 24 figures dans le texte et 3 planches. 5 fr.

Hydrologie.

La science hydrologique, ses méthodes, ses récents progrès, ses applications, par R. d'ANDRIMONT, ingénieur des mines, ingénieur-géologue, secrétaire de l'Association des ingénieurs sortis de l'École de Liège. 1 volume in-8^o contenant 57 figures dans le texte. Relié 5 fr.

Dessiccation de l'écorce terrestre.

La houille blanche et la dessiccation de l'écorce terrestre. Etat de la science spéléologique au commencement du xx^e siècle, par J. ESCARD, ingénieur civil. 1 brochure in-8^o avec 15 figures dans le texte 1 fr. 50

Distribution d'eau.

N. B. — Les études ci-dessous ont paru dans les *Annales de la Construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr, la livraison.

- Types de bornes-fontaines de ville, bouches d'arrosage et incendie, robinets, etc., avec 1 planche. Livraison de décembre 1877 2 fr.
 Distribution d'eau de la ville de Colmar, avec 2 planches. Livraison de janvier 1885 2 fr.

Distribution d'eau de la ville de Mulhouse, avec 2 planches. Livraisons de février et mars 1887	4 fr.
Distribution d'eau de la ville de Porto, avec 2 planches. Livraison de mai 1890	2 fr.
Travaux de barrage du Rhône. à Genève, pour l'utilisation de la force motrice, avec 2 planches. Livraisons d'août et de septembre 1892.	4 fr.
Outillage mécanique de l'usine pour l'utilisation de la force motrice du Rhône, à Genève, avec 2 planches. Livraisons de septembre et de décembre 1892 du <i>Porte-feuille des machines</i>	35 fr.
Adduction d'eau à la ville de Liverpool, avec 1 planche. Livraison de février 1893.	2 fr.
Distribution d'eau de la ville de Pithiviers. Livraison d'octobre 1893.	2 fr.
Adduction des eaux des sources de la Vigne et de Verneuil pour l'alimentation de Paris, avec 5 planches. Livraisons d'avril, mai, juin, juillet et novembre 1892 et février 1894	12 fr.
Nouvelles installations pour la filtration des eaux de la ville de Hambourg. Livraison de mai 1894	2 fr.
Distribution d'eau de Scutari-Kadikeui, avec 1 planche. Livraison de février 1895.	2 fr.
Travaux de dérivation du Rhône, à Jonage, pour l'utilisation de la force motrice du Rhône à la distribution de l'énergie électrique, avec 2 planches. Livraisons de juillet, août et septembre 1896.	6 fr.
Captages d'eau pour l'alimentation de la ville de Quimper. Livraison de décembre 1896.	2 fr.
Fontaine intermittente, système L. Giraud. Livraison de novembre 1897.	2 fr.
Appareil de fermeture automatique du réservoir de Vernon. Livraison de décembre 1897.	2 fr.
Usine hydraulique de Bourg-et-Comin pour l'alimentation du canal de l'Oise, à l'Aisne, avec 5 planches. Livraisons d'octobre, novembre et décembre 1899, janvier, février et mars 1900 du <i>Porte-feuille des machines</i>	12 fr.
La dérivation des sources du Loing et du Lunain. Alimentation de Paris en eau potable, avec 2 planches. Livraisons de février, mars et avril 1901	6 fr.
Etablissement d'une nouvelle conduite d'eau d'Avre, entre le réservoir de Saint-Cloud et la place des Ternes. Livraisons d'avril et mai 1912	4 fr.

Calcul des conduites d'eau.

Abaque logarithmique pour le calcul des conduites d'eau sous pression, par A. VAN MUYDEN, ingénieur civil. 2^e édition. 1 tableau graphique imprimé en deux couleurs 1 fr. 50

Adduction des eaux du lac Léman.

Adduction des eaux françaises du lac Léman à Paris et dans la banlieue, *projet P. Duillard*. Résumé des études. — Projet définitif, par P. DUVILLARD et É. BADOIS, ingénieurs civils. 1 volume in-jésus contenant 7 planches hors texte. Relié. 12 fr. 50

Construction des égouts.

Traité pratique de la construction des égouts. *Dispositions générales. Egouts en maçonnerie. Ouvrages accessoires. Egouts en tuyautages. Exécution et métrage des travaux. Terrassements. Matériaux. Maçonnerie et ouvrages accessoires. Remblaiement de la tranchée. Mesurage des égouts. Application des prix*, par JULES HERVIEU, conducteur des ponts et chaussées. Précédé d'une préface, par RAYNALD LEGOUZ, ingénieur des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8° avec 278 figures dans le texte. Relié. 20 fr.

Construction des égouts.

N. B. Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.
 Bassin de séparation pour les eaux d'égout. Livraison de février 1909. 2 fr.
 Siphons et bouches siphonides. Livraison de novembre 1909. 2 fr.
 Puisards pour l'évacuation des eaux de la ligne N° 6 du chemin de fer métropolitain de Paris avec 2 planches. Livraison de février 1910 2 fr.

Eaux d'égout.

Les eaux d'égout industrielles et ménagères. Leur épuration chimique et agricole; dangers des irrigations, par JEAN DE MOLLINS. 1 volume grand in-8°. . . 5 fr.

Hydraulique pratique.

De la pression hydraulique dans ses effets sur les conduites d'eau; histoire d'une manœuvre de robinets, par HENRI LAPEYRE, conducteur des ponts et chaussées. 2^e édition. 1 brochure grand in-8°. 2 fr. 50

Landes de Gascogne.

Les landes de Gascogne. Leur assainissement, leur mise en culture, exploitation et débouchés de leurs produits, par CHAMBRELEND, inspecteur général des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8°. 4 fr.

Montagnes et torrents.

Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement, définition, classification et causes de formation des torrents. Origine, mode de transport et de dépôt des matières charriées. Formation des lits de déjection. Ravages causés par les torrents. Correction des torrents à affouillements, construction en maçonnerie, extinction des torrents, classification et stabilité des barrages, construction des ouvrages de défense, par E. THIERY, professeur à l'École nationale forestière, avec une introduction par M. C. LECHALAS. 1 volume grand in-8° avec 164 figures dans le texte. *Nouvelle édition en préparation. Épuisé.*

Torrents.

Les torrents, leurs lois, leurs causes, leurs effets. Moyens de les réprimer et de les utiliser. Leur action géologique universelle, par COSTA DE BASTELICA. 1 volume in-8° avec figures et planches. 7 fr. 50

Hydraulique agricole et urbaine.

Hydraulique agricole et urbaine. Cours professé à l'École des ponts et chaussées, par G. BECHMANN, ingénieur en chef des ponts et chaussées, contenant : I. HYDROLOGIE. Les eaux météoriques, évaporation, ruissellement, infiltration, eaux de superficie, eaux souterraines, travaux ayant pour objet de combattre les effets nuisibles des eaux, utilisation de la pente des cours d'eau, travaux de captage, amélioration des eaux naturelles, adduction des eaux par la gravité, élévation mécanique de l'eau. II. HYDRAULIQUE AGRICOLE. Notions de génie rural. l'eau en agriculture, irrigations, limonages et colmatages, dessèchements, assainissements agricoles et drainages. III. HYDRAULIQUE URBAINE. Notions de salubrité urbaine. Approvisionnement des eaux utiles, réservoirs de distribution, réseaux de conduites, l'eau sur la voie publique et dans les maisons, évacuation des eaux nuisibles, réseaux d'égouts, curage des égouts, épuration des eaux d'égout. 1 volume grand in-8° avec figures dans le texte. 20 fr.

Hydraulique agricole.

Hydraulique agricole. Aménagement des eaux : irrigation des terres labourables, des cultures maraîchères, des jardins, des prairies, etc. ; création et entretien des prairies; dessèchements, dessalage, limonage et colmatage, curage; irrigation et drainage combinés; renseignements complémentaires techniques et administratifs, par J. CHARPENTIER DE COSSIGNY, ancien élève de l'École polytechnique, ingénieur civil. 2^e édition revue et augmentée. 1 volume grand in-8° avec de nombreuses figures dans le texte. 15 fr.

Drainage.

Drainage et assainissement agricole des terres. *Généralités.* Considérations générales sur l'assainissement et le drainage. *Assainissement et dessèchement.* Principes du dessèchement et de l'assainissement des grandes surfaces. Assainissement agricole des surfaces de petite étendue. *Drainage.* Tracé du drainage. Exé-

cution des travaux. Economie du drainage. Etude et rédaction des projets. Applications des données à un exemple, par L. FAURE, inspecteur des améliorations. 1 volume in-8° contenant 119 figures dans le texte. Relié 12 fr. 50

Drainage.

Aperçu du drainage des terrains sourceux et questions de drainage, par ROLET. 1 brochure in-8° 1 fr. 50

Irrigations en Egypte.

Les irrigations en Egypte. Coup d'œil général sur l'Egypte, le Nil, le sol de l'Egypte, procédés généraux de l'arrosage par inondation, description des bassins d'inondation, procédés généraux de l'irrigation égyptienne, irrigation de Delta, irrigation de la Moyenne Egypte, drainage et assainissement des terres, emmagasinement des eaux de la crue, réservoir d'Assouan, élévation mécanique des eaux d'arrosage, digues et canaux, description de quelques ouvrages d'art, organisation administrative et législative du service des irrigations. Agriculture, par J. BAROIS, inspecteur général des ponts et chaussées, ancien secrétaire général du ministère des Travaux publics d'Egypte, ancien directeur français des chemins de fer égyptiens de l'Etat, 2^e édition revue et augmentée. 1 fort volume in-jésus avec 90 figures dans le texte et 17 planches hors texte. Relié 35 fr.

Irrigation et assainissement.

Amélioration du territoire de Bruchhausen — Syke — Thedinghausen (province de Hanovre). Irrigation et assainissement, avec 1 planche. Ce mémoire a paru dans la livraison d'avril 1893 des *Annales de la construction*. Prix de la livraison. 2 fr.

Irrigations.

Les conditions d'irrigation rationnelle, par J. CREVAT, agriculteur, membre correspondant de la Société nationale d'agriculture de France. 1 brochure in-8°. 2 fr.

Canaux d'irrigation et d'alimentation.

N. B. — Les mémoires suivants ont paru dans les *Annales de la construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Le canal du Verdon, avec 3 planches. Livraisons de janvier, mars et août 1876. 6 fr.

Le canal Cavour, du Pô à Tessin, avec 2 planches. Livraison de juin 1876. 2 fr.

Fontaine de Vaucluse.

Mécanisme de la Fontaine de Vaucluse et moyen d'en régulariser le débit. Applications, par L. DYRION, ingénieur des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8° avec 17 planches. 7 fr. 50

Hydraulique fluviale.

Hydraulique fluviale. Météorologie et hydrologie; les fleuves, grandes inondations, navigation; conditions techniques d'un grand développement de la navigation fluviale; conclusions, par M. C. LECHALAS, inspecteur général des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8° avec figures dans le texte. 17 fr. 50

Hydraulique fluviale.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Etude sur les fonds de la Loire entre la mer et Saint-Nazaire, avec 1 planche.

Livraison de février 1885. 2 fr.

Correction des gouffres existant à l'aval du pont d'Ainay à Lyon, avec 1 planche.

Livraison de mai 1885 2 fr.

Le laboratoire d'hydraulique fluviale de Karlsruhe, avec 2 planches. Livraison d'avril 1903. 2 fr.

Navigation intérieure. Rivières à courant libre.

Rivières à courant libre. Etat naturel des cours d'eau. Opérations et observations pour l'étude des cours d'eau et de leur régime. Matériel et procédés de la navigation fluviale. Premières améliorations. Travaux contre les inondations. Régularisation des fleuves et rivières. Exploitation. 1^{er} volume du Cours de navigation intérieure de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, par F. B. DE MAS, inspecteur général des ponts et chaussées, professeur à l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 1 volume in-8° avec 48 planches dans le texte 17 fr. 50

Navigation intérieure. Rivières canalisées.

Rivières canalisées. Généralités. Barrages autres que les barrages mobiles. Barrages mobiles à fermettes. Barrages mobiles à pont supérieur. Barrages mobiles à hausses. Barrages mobiles à tambour. Règles à suivre pour l'établissement d'une retenue d'eau au moyen d'un barrage mobile. Ecluses à sas. Portes d'écluses. Emplacement, abords et accessoires des écluses. Exploitation. 2^e volume du Cours de navigation intérieure de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, par F. B. DE MAS, inspecteur général des ponts et chaussées, professeur à l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 1 volume grand in-8° avec 85 planches et 91 figures intercalées dans le texte 17 fr. 50

Navigation intérieure. Canaux.

Canaux. Section transversale, tracé, ouvrages à la rencontre des voies de communication par terre, ouvrages à la traversée des cours d'eau, ascenseurs et plans inclinés. Consommation d'eau des canaux. Alimentation des canaux. Réservoirs. Exploitation. 3^e volume du Cours de navigation intérieure de l'Ecole des ponts et chaussées, par F.-B. DE MAS, inspecteur général des ponts et chaussées, professeur à l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 1 volume in-8° avec figures dans le texte. 17 fr. 50

Navigation intérieure.

Souvenirs de neuf congrès de navigation 1885 à 1902, Bruxelles, Vienne, Francfort-sur-le-Mein, Manchester, Paris, La Haye, Bruxelles, Paris, Düsseldorf, par F. B. DE MAS, inspecteur général des ponts et chaussées en retraite, membre de la Commission internationale permanente des congrès de navigation. 1 volume in-8°. 10 fr.

Réservoirs.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

- Réservoirs à pétrole des docks de Saint-Ouen, avec 1 planche. Livraison de juin 1877. 2 fr.
 Les réservoirs d'alimentation d'eau de la ville de Paris, à Montmartre, avec 2 planches. Livraison de février 1890. 2 fr.
 Réservoir métallique de 200 mètres cubes du service des eaux de Paris, avec 1 planche. Livraison de septembre 1890. 2 fr.
 Réservoir de Torcy-Neuf, pour l'alimentation du canal du Centre, avec 2 planches. Livraison d'avril 1891. 2 fr.
 Réservoir de la ville de Nerwood (Ohio). Livraison de mars 1895. 2 fr.
 Réservoir en maçonnerie de 8 000 mètres de capacité, sur le plateau d'Avron, avec 1 planche. Livraison de janvier 1892. 2 fr.
 Réservoir d'eau à l'hospice Ferrari, à Clamart, avec 1 planche. Livraison de mars 1893. 2 fr.
 Prise d'eau du réservoir de Montaubry (canal du Centre), avec 1 planche. Livraison de juillet 1893. 2 fr.
 Tour hydraulique pour l'alimentation d'eau de la gare de Brême, avec 1 planche. Livraison d'octobre 1893. 2 fr.
 Note sur le calcul des fonds de réservoirs soutenus au pourtour et au centre. Livraison de janvier 1894. 2 fr.
 Construction d'un nouveau réservoir d'eau à Paris (Charonne), avec 2 planches.

Livraisons d'octobre et novembre 1898.	4 fr.
Réservoirs couverts en « sidéro-ciment » système J. Bordenave, avec 2 planches.	
Livraisons de mai et juin 1901.	4 fr.
Réservoirs en béton armé construits sur les chemins de fer russes, avec 2 planches.	
Livraison de mai 1905	2 fr.
Château d'eau de Lunebourg (Allemagne), avec 1 planche. Livraison de juillet 1908.	
	2 fr.
Réservoirs pour résidus de pétrole, avec 1 planche. Livraison de janvier 1909.	2 fr.
Joint entre tôle et ciment du réservoir d'eau de Sydney (Australie). Livraison de février 1909.	2 fr.
Réservoirs souterrains en béton de ciment armé. Livraison de mars 1909.	2 fr.
Réservoir d'eau en béton armé. Livraison de septembre 1909.	2 fr.
Château d'eau de Grand-Rapids (Etats-Unis). Livraison de janvier 1911	2 fr.

Canaux de navigation.

N. B. — Les études suivantes ont paru dans les *Annales de la construction* et se vendent avec la livraison qui les renferme au prix de 2 fr. la livraison.

Le canal de l'Oureq et ses procédés actuels d'entretien, avec 1 planche. Livraisons d'août et septembre 1887.	4 fr.
Le canal de Tancarville, avec 1 planche. Livraison de novembre 1887.	2 fr.
L'ascenseur des Fontinettes, avec 3 planches. Livraison de janvier 1889.	2 fr.
Canal maritime de Manchester, avec 1 planche. Livraisons d'octobre et novembre 1892	4 fr.
Ponts-canaux métalliques. Raccords ou joints des bâches avec les maçonneries des culées, avec 1 planche. Livraison de novembre 1897	2 fr.
Le pont-canal de Briare (Loire), avec 4 planches. Livraisons de janvier et février 1900	4 fr.
Reconstruction d'un mur de quai au canal de Kiel. Bassin intérieur du port de l'Elbe. Livraison d'octobre 1900.	2 fr.
Emploi du revêtement système Villa, aux travaux d'amélioration du canal de Gand à Bruges. Livraison de septembre 1908.	2 fr.
Vannes et siphons régulateurs du niveau de l'eau dans les bassins, avec 23 figures dans le texte. Livraison de mars 1910	2 fr.

Canal de Roanne à Digoin.

Note sur la transformation du canal de Roanne à Digoin, par M. MAZOVER, ingénieur en chef des ponts et chaussées. 1 brochure in-8° avec figures dans le texte et 2 planches hors texte 2 fr. 50

Canal maritime de la Seine.

Observations critiques sur le projet du canal maritime de la Seine entre Rouen et Paris présenté à la Société d'études de Paris-Port de mer, par Ed. BADOIS, ingénieur, 1 brochure grand in-8° avec 2 planches. 2 fr. 50

Construction du canal du Jonage. — Utilisation des forces motrices du Rhône.

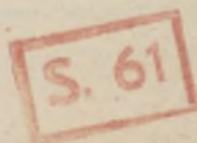
Construction du canal de Jonage. Travaux et installations hydrauliques et électriques. *Construction du canal.* Dérivation. Ouvrages de garde et de prise d'eau. Barrage. Ecluses de garde Déversoir. Usine barrage. Travaux de protection aux abords de l'usine. Ecluse double. Ponts métalliques, ouvrages secondaires. *Installation hydraulique de l'usine.* Turbines. Vannes d'admission. Calculs des turbines. *Installations électriques.* Usine. Canalisation. Distribution. *Dépenses de premier établissement,* par RENÉ CHAUVIN, ancien élève de l'Ecole polytechnique, ingénieur de la Société lyonnaise des forces motrices du Rhône. *Publié par la Société lyonnaise des forces motrices du Rhône.* 1 volume in-4° de texte et 1 atlas in-4° de 55 planches. 40 fr.

Travaux hydrauliques de Genève.

Usine de Chèvres. Notice historique et descriptive des travaux hydrauliques exécutés par la ville de Genève, de 1893 à 1899, par M. TH. TURRETTINI. 1 fort volume in-4° contenant 14 plans et 26 revues phototypiques. 25 fr.

Utilisation des forces motrices du Rhône.

Utilisation des forces motrices du Rhône et régularisation du lac Léman. Travaux exécutés par la ville de Genève sous la direction de TH. TURRETTINI, ingénieur. 1 volume in-4° et 1 atlas in-folio de 40 planches. 35 fr.



ÉVREUX, IMPRIMERIE CH. HÉRISSEY, PAUL HÉRISSEY, SUCC^r

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

6-96

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000296209