

TRADUCTIONS ET REPRODUCTIONS

LES Puits ARTÉSIENS

Considérations pratiques au sujet de leur établissement

PAR

T. C. Chamberlin

Professeur à l'Université de Chicago

TRADUIT DE L'ANGLAIS (1)

INTRODUCTION

Le principe du fonctionnement des puits artésiens est simple ; mais les problèmes auxquels leur établissement peut donner lieu sont complexes. Les circonstances dans lesquelles il est possible de les forer varient dans chaque cas particulier, et la réussite ou l'insuccès de ces travaux ne dépendent pas, autant qu'on pourrait le croire, de l'application de principes simples par eux-mêmes. Il est rare qu'il soit fait des conditions d'établissement de ces puits un exposé simple et clair, et cette situation résulte le plus souvent du manque d'attention apporté à l'observation de faits généralement peu compliqués.

Le forage des puits artésiens n'a pas été jusqu'ici l'objet d'une profession spéciale ; peu d'entrepreneurs de sondage s'y consacrent spécialement, et il est rare d'ailleurs qu'ils puissent faire dans leur canton l'étude des questions géologiques que ces travaux comportent. Peu de

(1) Cette étude a été publiée dans le 5^m Rapport du « United States Geological Survey ». Elle a été signalée à la Société de Géologie dès 1888. L'autorisation d'en publier une traduction ayant été accordée ultérieurement, ce travail fut entrepris par plusieurs membres de la Société. Les nombreuses occupations de ceux de nos collègues qui s'étaient chargés de cette besogne expliquent le retard considérable apporté à la publication de ce mémoire.

géologues se trouvent à même d'en poursuivre l'étude au point de vue pratique, absorbés qu'ils sont par d'autres questions plus importantes venant s'imposer à leurs investigations.

Aujourd'hui on commence à s'occuper de plus en plus de l'examen de ces questions. Divers entrepreneurs de sondage se sont fait une spécialité du forage des puits artésiens et, à l'aide de renseignements géologiques, sont parvenus à se mettre au courant de la stratigraphie des terrains des diverses régions où ils font leurs travaux. On consulte de plus en plus fréquemment les géologues pour leur demander leur avis au sujet du résultat probable de ces forages. Tous les particuliers sont, d'ailleurs, spécialement intéressés aux côtés théoriques et pratiques de la question des puits artésiens.

Les arguments en faveur de l'importance d'une telle étude sont inutiles à développer longuement. Ainsi, par exemple, *le problème de l'établissement d'une distribution d'eau pure et potable* est un des plus graves qui occupent les hygiénistes. Les puits artésiens fournissent un moyen, parmi beaucoup d'autres, d'obtenir de l'eau potable ; quelquefois ce moyen est inapplicable, d'autres fois il donne d'excellents résultats et permet d'obtenir de l'eau en abondance.

Les résultats variables que donnent les forages de ces puits permettent de déterminer les causes de la réussite ou de l'insuccès. Dans certaines régions ces travaux sont d'une grande ressource, tandis que dans d'autres, et seulement dans certaines limites, ils n'amènent que des déceptions et conduisent à des dépenses excessives. On fait souvent en pure perte de grandes dépenses pour des entreprises où les conditions nécessaires au succès font complètement défaut.

Le but du présent travail est de rassembler, sous une forme simple et précise, les conditions requises pour l'établissement des puits artésiens et de rendre ainsi service tant aux sondeurs et géologues qu'au public en général. Ce ne sera pas, toutefois, un exposé complet pour chacune de ces catégories de personnes. Les particuliers tiennent surtout à être renseignés sur les prix et qualités des eaux, choses que l'on ne peut examiner dans une étude générale. Les sondeurs désirent des détails au sujet de la succession des couches du sous-sol, de leur structure, de la texture des roches, etc. ; seules, des descriptions géologiques détaillées pourront leur donner des renseignements à ce sujet. Le géologue recherche des détails très complets lui permettant de se former une idée exacte des formations géologiques dans la localité où il fait ses travaux. Il est certain que tant que l'établissement d'un puits artésien dépend de circonstances locales sujettes à se modifier, il n'est pas possible de donner à la question une solution générale donnant satisfaction aux intéressés.

Je vais m'efforcer ici de me placer sur le terrain de l'intérêt commun au sujet de la réussite des entreprises de forages ; il ne faut pas, toutefois, perdre de vue que chaque cas spécial amène des études particulières au cas que l'on examine.

Il importe avant tout de faire disparaître de notre esprit toute idée de merveilleux au sujet du mouvement des eaux artésiennes ; ce n'est pas autre chose, en effet, que le mouvement ordinaire d'un liquide, sous une forme un peu spéciale peut-être, résultant de la manière dont il se révèle à nous. Une observation peu attentive et ne portant pas sur tout l'ensemble du phénomène, peut seule nous amener à trouver étrange le mouvement des eaux artésiennes ; nous ne voyons, en effet, qu'une partie du courant, l'autre partie étant cachée en terre, ce qui fait immédiatement croire à quelque chose de mystérieux. En outre, la partie visible du courant que nous voyons est animée d'un mouvement ascendant, ce qui vient directement à l'encontre de la croyance que l'eau ne s'élève jamais ; ce mouvement est cependant un des phénomènes naturels les plus ordinaires, on le rencontre, d'ailleurs, chaque jour et en toutes circonstances et on l'observe dans tous les ruisseaux et dans toutes les rivières (fig. 1). Certaines parties du courant de



FIG. 1. Coupe d'un courant montrant des courants partiels ascendants malgré le mouvement général du cours d'eau.

tout cours d'eau sont constamment animées d'un mouvement ascensionnel, bien que le mouvement général de la rivière soit descendant.

Les molécules liquides du fond d'un cours d'eau s'élèvent et s'abaissent en suivant les inégalités du lit, tandis que celles de la surface ont un mouvement régulier, descendant d'une manière continue,



FIG. 2. Profil du courant artésien de Chicago.



FIG. 3. Coupe idéale montrant les conditions essentielles des puits artésiens.

A. Couche perméable. — B et C. Couches imperméables au-dessous et au-dessus de A agissant comme couches enveloppes. F. Le niveau d'eau dans la couche A ou le niveau de l'origine de la nappe aquifère — D et E puits jaillissant de la couche poreuse aquifère A.

suivant la pente de celui-ci. Si le courant est rapide, et si les rives sont sinueuses, les molécules de liquide, tant au fond qu'à la surface, sont animées de ce mouvement sinueux dû aux rugosités du fond. Aucune molécule d'eau ne peut d'ailleurs s'élever, si ce n'est en vertu d'une pression qui s'exerce sous elle (fig. 2 et 3). Dans les puits artésiens nous ne voyons que le jet ascendant qui sort de terre et le courant qui s'en écoule. Le volume de liquide, beaucoup plus important, qui exerce la pression nous est caché : c'est donc à nous de nous l'imaginer exactement (fig. 4 et 5).



FIG. 4. Coupe montrant l'amincissement d'une couche poreuse aquifère A renfermée entre deux couches imperméables B et C, constituant les conditions nécessaires pour un puits artésien.



FIG. 5. Coupe montrant le passage d'une couche perméable aquifère à une couche compacte imperméable. Étant renfermée entre les couches imperméables B et C, elle détermine les conditions nécessaires pour un puits artésien en D.

CHAPITRE I

Caractères essentiels des puits artésiens.

Les eaux artésiennes ont une origine souterraine; leur circulation et leur ascension dans le puits sont souterraines. Les circonstances de la formation des nappes artésiennes dans le sous-sol présentent seules des particularités; d'elles dépend principalement la force ascensionnelle du courant artésien.

Imaginons deux couches de terrain imperméable B et C (voir les 3 figures précédentes) enveloppant une couche perméable A et dont l'une ou les deux extrémités viennent affleurer à la surface et s'étendre jusqu'à une région élevée.

Les eaux météoriques, s'infiltrant naturellement par les affleurements de la couche perméable A, auront une circulation forcée entre les deux couches imperméables et s'y accumuleront.

Il est évident que si l'on fore, à un niveau inférieur à celui de l'affleurement de la couche perméable, des puits (comme en D, fig. 4 et 5, ou comme en D et E, fig. 3) qui traversent la couche imperméable supérieure C et pénètrent dans la nappe aquifère qu'elle surmonte, les eaux s'élè-

veront dans ces puits ; elles pourront jaillir à la surface à une altitude d'autant plus grande que le point où les eaux pluviales se sont infiltrées est à un niveau plus élevé au-dessus de l'orifice du puits. Le jet sera continu si le volume d'eau que peut débiter la source artificielle ainsi formée ne dépasse pas celui qui alimente la nappe aquifère artésienne.

Résumé des conditions requises. — Pour obtenir un jet artésien les conditions suivantes sont absolument nécessaires :

1° Existence d'une couche de terrain perméable A permettant l'infiltration et la circulation souterraine de l'eau.

2° Existence d'une couche de terrain imperméable B inférieure à la couche perméable, de manière à empêcher les eaux d'infiltration de s'échapper par en bas.

3° Existence d'une couche de terrain imperméable C supérieure à la couche perméable, mais inférieure au niveau F de l'affleurement de la couche perméable. Cette couche supérieure imperméable empêchera les eaux de s'échapper par le haut.

4° L'ensemble des trois couches de terrain ci-dessus doit avoir une inclinaison telle que le niveau de l'affleurement où les eaux pénètrent soit à une altitude supérieure à l'ouverture du puits artésien.

5° La zone superficielle d'infiltration doit être disposée de façon à recevoir une quantité d'eau suffisante.

6° Il faut que, pour une zone superficielle donnée, la hauteur d'eau tombée corresponde au volume que doit fournir le puits artésien.

7° Il ne faut pas que l'eau artésienne qui circule entre les deux couches de terrain imperméable puisse s'échapper à un niveau plus bas que l'orifice du puits.

Nous examinerons en détail chacune de ces conditions et signalerons les conséquences pratiques qui s'en déduisent.

CHAPITRE II

Les couches aquifères.

L'eau peut circuler de deux manières à travers les roches. Si celles-ci ont une texture compacte, elle ne pourra trouver une voie que dans les fissures et diaclases qui s'y trouvent, ou dans les cavités formées par la dissolution chimique des éléments de celles-ci. Si, au contraire, le terrain est meuble, l'eau s'infiltré par les nombreux pores qui existent dans la roche et se répartit dans la couche tout entière.

1° *Roches fissurées présentant des cavités.* — Pour obtenir des sources abondantes, on ne peut compter avec suffisamment de certi-

tude sur les roches qui n'offrent à la circulation de l'eau que des crevasses ou des fissures. On ne rencontre pas, en effet, dans ces roches, des solutions de continuité en grande quantité, surtout dans les couches profondes du sous-sol; on ne peut déterminer d'avance l'emplacement des diaclases qui existent. Il est donc impossible d'assurer qu'on les atteindra par un forage. Les roches compactes dont nous nous occuperons sont spécialement les roches cristallines et les calcaires. Les roches argileuses sont trop compactes pour permettre à l'eau de circuler; elles forment les roches les plus imperméables.

2° Les *roches cristallines* sont beaucoup plus fissurées à la surface qu'en profondeur; le retrait qu'elles ont subi par refroidissement y a déterminé des crevasses nombreuses. Ces fentes se ferment de plus en plus à mesure qu'on pénètre dans la croûte terrestre et disparaissent même complètement à peu de distance de la surface du sol.

C'est pour ces raisons que l'eau ne peut circuler dans de telles roches puisque ces dernières sont toujours surmontées de couches imperméables et ont à supporter une pression considérable. L'expérience confirme ces vues: aucune roche ignée ou métamorphique ne peut fournir une nappe aquifère sérieuse, à moins que, par exception, certaines circonstances locales ne le permettent.

3° Les *roches calcaires* sont, de la même manière, traversées par de nombreuses diaclases à proximité de la surface; elles peuvent être dissoutes par les eaux qui les traversent. Il se forme ainsi de vastes cavernes souterraines où, comme dans l'Indiana et le Kentucky, on trouve des ossements de Mammoth.

Comme pour les roches cristallines, ces fentes ne se présentent que dans les couches superficielles, où le calcaire n'est pas recouvert d'autres roches; partant, ces roches calcaires ne peuvent donner lieu à des sources abondantes. On comprend aisément le motif de ce fait, si l'on considère que l'action dissolvante des eaux ne s'effectue qu'à la surface, laquelle action est rapidement annihilée quand elles pénètrent dans le sol. Si le calcaire est recouvert de couches imperméables, les eaux de la surface sont arrêtées et, ainsi, l'action dissolvante de celles-ci est limitée à celles qui pénètrent dans la couche de terre superficielle, peu épaisse.

Les crevasses et cavités des calcaires situés à une certaine profondeur sont souvent remplies de calcite, ce qui indique que les eaux y produisent un dépôt au lieu d'y exercer une action chimique.

On peut toutefois, tout en n'ayant guère de certitude, prévoir de meilleurs résultats pour les puits forés dans les calcaires que pour ceux

que l'on creuserait dans les roches cristallines. Cependant les forages entrepris dans les calcaires qui, sous l'action des agents atmosphériques, avaient été crevassés, et dont les fentes s'étaient ensuite remplies d'une couche de limon quaternaire, ont parfois réussi; on y a trouvé un certain nombre de sources jaillissantes; à ma connaissance, le succès de ces entreprises a été fort rare lorsque les calcaires étaient recouverts d'une importante couche imperméable.

Un petit calcul permet de se rendre compte que, même dans le cas où ces roches sont fortement fissurées, elles ne peuvent être qu'une ressource douteuse pour une alimentation en eau par des puits profonds et coûteux.

Supposons que des fissures traversent une couche donnée et se trouvent à des intervalles de 10 pieds; on pourrait faire 20 forages entre deux de ces diaclases; si les fissures avaient une épaisseur de 6 pouces la probabilité d'un résultat satisfaisant serait de $\frac{1}{20}$ et de $\frac{1}{10}$ pour cent avec un système similaire de fentes croisées. Dans ce cas, cependant, il est toujours facile d'obtenir une communication avec les fissures où il y a de l'eau, en provoquant la division de la roche par une *explosion*; mais on ne peut compter, en règle générale, sur les couches profondes de calcaire pour obtenir avec certitude de l'eau en quantité suffisante.

Les roches ignées et métamorphiques ne peuvent être employées à cet effet; les calcaires qui ont tout d'abord été découverts, puis ensevelis sous d'autres dépôts, peuvent seuls fournir de l'eau en certains endroits seulement.

4° *Couches poreuses*. En contraste direct avec les couches à texture compacte, qui ne peuvent fournir de l'eau que grâce aux fissures et cavités qui s'y trouvent, les roches poreuses permettent l'existence de nappes aquifères continues sur de vastes étendues et que l'on peut atteindre avec certitude à une profondeur déterminée. Ce sont, à proprement parler, les seules couches pouvant convenir à des nappes artésiennes.

Les sables, graviers, conglomérats et certaines espèces de calcaires graveleux appartiennent à ces terrains. Le caractère général de ces roches consiste en ce qu'elles sont composées de particules séparées, juxtaposées, de façon à laisser entre elles des espaces libres. Une couche de sable en est l'exemple typique. Toutes ces roches ne présentent cependant pas des interstices suffisants pour donner passage à l'eau; parmi elles, il en existe où les anfractuosités sont comblées par de l'argile ou d'autres roches imperméables qui s'y sont introduites au moment de la formation de la couche; d'autres ont vu, par la suite,

leurs pores se remplir de dépôts provenant de roches qui se dissolvaient, ou qui s'y introduisaient par une pression extérieure.

Le degré de porosité est une question de haute importance pour déterminer le volume d'eau dont on peut disposer. Si la roche entière est constituée de sable à grains grossiers, la capacité en eau de ces roches augmente avec les dimensions de ces grains. Il existe des sables dont les grains sont si fins qu'ils forment des couches presque imperméables, car l'eau filtre à peine au travers de leurs interstices et ces couches ne sont pas capables de donner lieu à une véritable nappe aquifère. D'autres présentent des particules si espacées entre elles que les eaux s'y écoulent librement ; la nature présente toutes les gradations de ces roches depuis les graviers jusqu'aux grès imperméables.

En outre, le plus souvent, les terrains comprennent des mélanges de toutes espèces de particules fines et grossières ; les parties constitutives ne sont pas parfaitement réunies ; des sables fins et du limon sont mélangés avec des graviers, des cailloux et des blocs de roches. Les variations dans la composition des roches peuvent avoir quelque influence sur la capacité des nappes aquifères ; elles peuvent amener soit une diminution de leur débit, soit leur arrêt complet. Les roches peuvent aussi se consolider de diverses manières après leur formation. Il existe des sables quaternaires et des graviers qui sont entièrement désagrégés et sans aucune compacité, tandis que d'autres forment des quartzites ou d'autres roches analogues. On admet souvent, bien qu'on ne puisse attacher trop de confiance à cette règle, que la solidité des roches augmente à mesure que l'époque de leur formation est plus ancienne. Les sables quaternaires sont plus désagrégés que les sables tertiaires, et ceux-ci le sont plus que les sables secondaires, etc. Cette règle est rationnelle, mais elle présente de notables exceptions ; ainsi les sables de Postdam, dans la vallée du Missouri supérieur, qui sont très anciens, comptent parmi les moins compactes et sont les plus aquifères. L'observation directe de la constitution des différents terrains permet seule de déterminer la quantité d'eau qu'ils peuvent renfermer. Cela nous montre un des services que peut nous rendre la description de la texture des roches.

CHAPITRE III

Couches enveloppes des eaux artésiennes.

D'une manière absolue, on peut dire qu'il n'y a pas de roche imperméable, puisque les pores de celle-ci, quelque petits qu'ils soient, peuvent toujours laisser passer de l'eau. Outre qu'elles sont traversées

par des filons microscopiques, les roches renferment encore des crevasses de plus grande dimension. Les roches, même les plus compactes, présentent généralement des fissures, et les couches argileuses n'en sont pas entièrement dépourvues.

Beaucoup d'eau peut, néanmoins, pénétrer dans une couche imperméable. Une couche d'argile fine non consolidée est ce qui s'approche le plus d'une couche théoriquement imperméable. Si ces couches argileuses se consolident, il s'y forme des fissures, et l'imperméabilité de la roche diminue. Rangées dans l'ordre de leur imperméabilité, la succession des roches, après les schistes argileux, est la suivante : calcaires et grès schisteux, roches cristallines et enfin grès compactes.

Couche enveloppe inférieure. — Lorsqu'un récipient est destiné à contenir de l'eau, on attache plus d'importance à l'imperméabilité du fond qu'à celle du couvercle ; le contraire a lieu pour les puits artésiens : la couche enveloppe inférieure ne demande pas à être aussi imperméable que la supérieure. Cette couche enveloppe, fût-elle même assez perméable, il se trouvera toujours plus bas une couche imperméable capable de s'opposer au passage de l'eau. Dans le cas où la couche enveloppe inférieure parvient à conduire l'eau de la nappe aquifère à la surface du sol, il peut y avoir une disparition complète de la nappe artésienne. En règle générale, quand les couches de terrain sont, ou plissées de façon à former un bassin, ou simplement inclinées, les couches inférieures affleurent à un niveau supérieur à celles qui les recouvrent (fig. 6). Mais ce n'est pas toujours le cas : par exemple lorsque

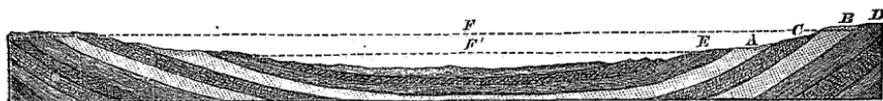


Fig. 6. Coupe montrant l'ordre de succession de l'affleurement des couches d'un bassin A et B couches perméables, D et F couches imperméables ; C une couche semi-imperméable ; F' et F'' les niveaux d'eau des couches A et B respectivement.

l'érosion des eaux a modifié l'état de la surface, comme dans la figure suivante (fig. 7). La conséquence d'une défectuosité dans les couches qui se trouvent sous la nappe aquifère est clairement indiquée dans les figures 7 et 8, et dans les notes qui les accompagnent. On doit tenir compte des couches enveloppes inférieures des eaux artésiennes, bien que d'habitude on semble n'y attacher aucune importance.

Couche enveloppe supérieure. — Le caractère des couches qui surmontent la nappe artésienne doit être étudié avec le plus grand soin. L'eau y est, en effet, sous pression, et a une tendance à pénétrer



FIG. 7. Coupe montrant l'effet d'érosion sur les couches qui affleurent. *A* et *B* couches perméables, *D* et *F* couches imperméables, *C*, couche à moitié imperméable, *F* et *F'* niveau d'eau de *A* et *B*. Si la couche *C* n'est pas tout à fait imperméable, l'eau de *A* la traversera et échappera au bord de *B*, de sorte qu'un courant ne peut pas s'obtenir.



FIG. 8. Coupe montrant l'insuccès d'un puits artésien à cause de défauts dans la couche sous-jacente. *A* et *B* couches perméables à un niveau supérieur à *F'*, *D* et *I* couches imperméables, *C* couche encaissante défectueuse, *E* niveau d'eau dans la couche *B*; *G* et *H* puits qui ne coulent pas. La couche *A* pourrait donner un courant en *G* et *H*, si des fractures n'existaient pas dans la couche *C*, lesquelles permettent à l'eau de parvenir à *B* et échapper à son affleurement, qui est situé au-dessous de la surface au sol *G* et *H*.

dans ces couches; si, en certain point, il existe une partie quelque peu perméable, l'eau y trouvera une issue; la pression de la nappe artésienne diminuera et l'eau ne jaillira plus, ou le fera à une hauteur beaucoup moins grande. Quand les couches où se trouve la nappe aquifère ont une capacité considérable, et lorsque l'affleurement de la couche perméable est à un niveau élevé, quelques solutions de continuité dans la couche enveloppe supérieure n'amènent qu'une légère diminution dans le débit et la hauteur du jet artésien. Si ces deux circonstances n'existent pas, soit à cause d'un débit réduit, d'un affleurement de la couche perméable à faible altitude ou d'obstructions dans le parcours souterrain de l'eau, il faut, pour prévoir les résultats d'un forage, que l'on se soit rendu compte avec le plus grand soin de toutes les solutions de continuité de la couche imperméable supérieure.

a) On doit remarquer que les résistances diminuent avec la pression, de sorte que, dans les cas où ces deux circonstances se contrebalancent, la diminution de débit est moindre — toutes choses égales d'ailleurs — que dans le cas où l'origine de la nappe est à un niveau élevé et les passages libres. Il faut, néanmoins, se rendre compte que les résultats à obtenir sont soumis, dans ce cas, à quelque éventualité.

b) Nous avons déjà examiné l'influence de la nature de la roche — le point de vue essentiel de cette étude. — On peut toutefois dire d'une manière générale que le degré d'imperméabilité se mesure par la quantité des éléments argileux entrant dans la composition du terrain; mais c'est là plutôt une règle générale facile à retenir qu'une règle fixe.

c) L'efficacité d'un forage artésien croît avec l'épaisseur de la couche

enveloppe supérieure. Si celle-ci est aussi imperméable que possible, il n'y a aucune importance à ce qu'elle ait une forte épaisseur, à moins que le point origine de la nappe aquifère ne soit à un niveau si élevé qu'il faille — chose peu probable — un poids supplémentaire de la couche enveloppe pour contrebalancer la pression hydrostatique. Mais si le terrain n'est pas si imperméable, l'épaisseur de la couche par elle-même a son importance.

d) Ce que nous allons examiner, et en nous mettant à un point de vue auquel on ne s'est pas placé jusqu'aujourd'hui, consiste à reconnaître le niveau de la surface des nappes phréatiques de la région existant entre le forage projeté et le point origine des nappes artésiennes. On sait que la nappe aquifère ordinaire se trouve à divers niveaux, ce dont les puits ordinaires permettent de se rendre compte. La nappe aquifère est le plus souvent à un niveau plus élevé que celui des cours d'eau voisins ; cette nappe y trouve un écoulement lent par des sources ou par infiltration. D'une manière générale, elle s'élève et s'abaisse avec les ondulations de la surface du sol : mais ses mouvements sont moins accentués que ceux du terrain. Si la nappe phréatique dans la contrée se trouvant entre le puits projeté et l'affleurement de la couche perméable est *au même niveau* que l'origine de la nappe artésienne, aucune diminution de débit ne sera possible, même si les couches sont quelque peu perméables. L'eau des couches enveloppes, en effet, exerce dans ce cas une pression de haut en bas avec une énergie égale à celle que la nappe d'eau des couches poreuses exerce de bas en haut, jusqu'à ce que le niveau hydrostatique s'établisse. La capillarité ne modifie pas cet effet. Dans ce cas, on peut quelquefois obtenir un jet artésien, alors que toutes les circonstances en rendraient l'existence impossible.

Si la nappe phréatique existant entre le puits artésien et l'origine de la nappe qui l'alimente est, à un moment donné, à un niveau plus élevé que la nappe artésienne, la première aura une tendance à pénétrer dans la couche perméable et y pénétrera aussi loin que la nature des couches enveloppes le permettra ; il y aura, dans ce cas, augmentation du débit du puits artésien et, dans certains cas, le point origine de la nappe artésienne tendra à s'élever.

Je conçois que les conditions les plus favorables pour s'assurer du débit d'une source existent quand une couche semi-perméable épaisse, constamment saturée d'eau jusqu'à un niveau plus élevé que l'origine du puits artésien, surmonte une couche poreuse et occupe toute la région entre le puits et la source (ce qui est représenté fig. 9). Les circonstances que renseigne cet exemple, présentent de grands avan-

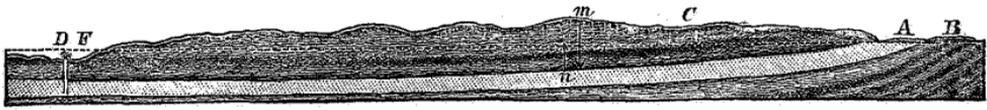


FIG. 9. Coupe montrant l'aide fournie par le niveau élevé de la nappe phréatique située entre l'origine de la nappe artésienne et le puits. A couche perméable, B couche imperméable en dessous, C couche imperméable au-dessus. La ligne foncée immédiatement au-dessous de la surface représente le niveau de l'eau dans la nappe phréatique; sa pression de haut en bas est représentée par la flèche *m*. Sa pression vers le haut produite par l'altitude de l'origine de la nappe artésienne est représentée par la flèche *n*. La ligne *F* représente le niveau de cette origine. Aucun écoulement n'aurait lieu à travers la couche *C*, excepté dans le voisinage du puits *D*. Mais l'eau de la couche *C* pourrait pénétrer dans la couche *A*; ce qui augmenterait le débit de celle-ci.

tages. Dans ces conditions hydrostatiques, des couches de calcaire reposant sur du sable fournissent une excellente combinaison.

Si, d'autre part, la nappe phréatique comprise entre le forage projeté et le point d'affleurement de la couche perméable est à un niveau inférieur à celui de la nappe artésienne, le débit du puits artésien diminuera, à moins que les lits enveloppes ne soient d'une texture compacte et exempte de fissures (fig. 10). Par exemple, s'il y avait entre ces deux

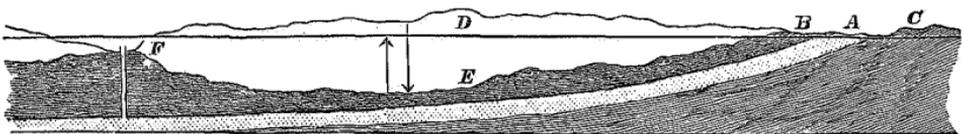


FIG. 10. Double coupe montrant les effets de l'élévation du sol au-dessus de la couche aquifère. (Pour l'explication, voir le texte.)

niveaux une différence de 100 pieds, cette différence correspondrait à une pression théorique d'à peu près 3 atmosphères, ou 45 livres par pouce carré; cette pression s'exercerait de haut en bas; elle dépasserait dans une forte mesure la pression de bas en haut (en ne tenant pas compte de la capillarité), et cela permettrait à l'eau de pénétrer plus ou moins à travers les pores et crevasses des roches; il s'ensuivrait une perte de charge et une diminution du débit. Chacun de ces points sont rendus visibles par le double profil de la figure 10, où A représente une couche poreuse enfermée entre deux couches imperméables B et C. L'origine de la nappe artésienne est en A et le forage que l'on se propose d'exécuter est en F. Dans l'un des deux cas, E est la surface du sol, et en même temps la surface de la nappe aquifère; dans l'autre cas, D remplit le même rôle. La flèche allant de bas en haut au point E indique la tendance de l'eau à sortir du lit perméable, grâce à la pression de l'eau provenant de l'origine de la nappe artésienne, tandis que la flèche dirigée vers le sol en D, représente la pression de haut en bas qu'exerce la nappe phréatique qui existe jusqu'en D. Cette dernière pression

dépasse, dans ce cas, celle qui provient de la nappe artésienne, et on peut prévoir avec certitude un jet artésien en F, si la surface du sol existe telle qu'en D, tandis qu'on ne pourrait l'assurer avec certitude si la surface était semblable à celle que nous avons en E.

Mon attention a, pour la première fois, été attirée sur ce fait en observant que, là où *la contrée était élevée* entre l'origine de la nappe artésienne et le puits, et avait un niveau d'eau élevé, le jet des puits artésiens atteignait une hauteur s'approchant d'une manière surprenante des estimations théoriques. Il n'y avait presque pas à tenir compte des obstructions et solutions de continuité, tandis que dans le cas où ces deux points étaient séparés par *une dépression*, il y avait une grande diminution dans les évaluations.

CHAPITRE IV

Inclinaison des couches.

Les couches perméables et celles qui les enveloppent doivent avoir une inclinaison telle que leur affleurement soit à un niveau supérieur à la surface du sol au point où l'on projette d'établir un puits; autrement, il n'est pas possible que le courant artésien trouve moyen de se produire. Les conditions idéales se produisent quand les couches sont inclinées vers un centre et plissées de façon à former un bassin. L'eau pénètre alors par les affleurements de la couche perméable, laquelle se trouve remplie jusqu'à son niveau d'affleurement. Si, d'ailleurs, cette couche saturée d'eau présente une solution de continuité en un point quelconque du centre du bassin situé à un niveau inférieur à celui du bord de celui-ci, un courant s'établira forcément.

Il n'est cependant pas indispensable, à cet effet, que les couches de terrain forment un bassin. Si elles sont inclinées de façon à présenter leur affleurement d'un côté et si, de quelque manière que ce soit, la couche perméable est obstruée au point que l'eau ne puisse s'en échapper, on peut obtenir un jet artésien, quelle que soit la manière dont se comporte le prolongement des couches. L'expérience prouve que, dans ce cas, on peut ne pas tenir compte de l'autre côté du bassin et considérer la question comme si les lits perméables devenaient imperméables en quelque endroit de leur étendue.

Un autre principe doit être aussi pris en considération. Rappelons-nous que les dépôts de sable sont dus à l'action des vagues, le long des rivages ou dans les parties peu profondes à proximité du rivage; les grains de sable sont plus grossiers (fig. 11) dans les dépôts du rivage et

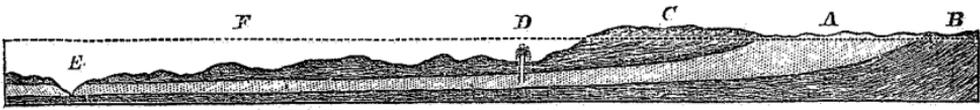


FIG. 11. Coupe démontrant la possibilité d'obtenir un courant d'une couche qui a un affleurement à un niveau inférieur à celui du puits. *A* couche de sable grossier à droite à son affleurement supérieur, plus fin à son affleurement inférieur. *B* et *C* couches enveloppes, imperméables. *F* niveau d'eau dans la couche *A*. — *D*, puits qui donnera de l'eau malgré l'affleurement inférieur en *E*.

leur grain diminue de grosseur quand on s'éloigne de la côte. Quand, par la suite, ces lits ont été relevés et ont fait partie du continent, le plus souvent leur ancien rivage s'est élevé plus que les autres parties et est devenu le point origine des nappes souterraines (fig. 6 et 10).

En outre, l'extrémité des couches possède, au plus haut degré, le pouvoir de faciliter la circulation de l'eau. Ces premières couches ont généralement plus d'épaisseur; elles ont un grain plus grossier et plus d'intervalles entre les particules. Si, pour ce motif, la nappe aquifère est abondante à la surface et si l'affleurement dans la direction opposée est très éloigné, bien qu'il soit à un niveau inférieur, elle peut ne pas donner une issue suffisante à l'eau à cause de la grande résistance qu'elle peut rencontrer sur une si longue distance, lors de son passage à travers les interstices très réduits d'une roche compacte. Dans ce cas, un forage près de l'affleurement de la couche perméable (en *D* sur la fig. 10) offrira à l'eau la voie où elle rencontrera le moins de résistance.

La question de résistance se révèle, même dans des cas où il n'y a pas de raison de croire à une modification, soit dans l'épaisseur des roches, soit dans leur texture. Beaucoup de puits importants à Oshkosh, Fond du Lac, Watertown et Palmyre (Wisconsin) proviennent de couches qui affleurent à 50 miles environ de l'endroit où ils sont forés, lequel affleurement est à un niveau notablement inférieur. Tous ces puits ont réussi, grâce au niveau de la nappe phréatique, très élevé entre le puits et l'origine de la nappe. Mais la résistance à l'écoulement à travers les couches aquifères semble avoir une grande importance, sinon toute issue inférieure épuiserait la nappe aquifère tout entière avec grande rapidité.

On doit bien comprendre que le frottement ne commence qu'à l'origine du mouvement et que le mouvement ne se produit que lorsque l'eau s'échappe; de sorte que toute diminution de débit doit toujours commencer quand il y a eu frottement.

Altitude de la couche aquifère. — L'altitude de la couche aquifère qui affleure en amont du puits exerce une très grande influence. Il est évident que l'affleurement de la couche perméable doit être à un niveau

élevé; de cette façon l'eau de la nappe aquifère est soumise à une pression assez considérable pour donner un débit suffisant, déduction faite de la perte de charge due au frottement. Cette perte de charge peut encore être accrue par suite de l'obstruction qui se produit en certains endroits que l'eau aurait à franchir. Quant à la question d'apprécier exactement quelle doit être l'altitude de l'orifice du puits par rapport à la couche aquifère, c'est là un problème complexe dont la solution réclame l'aide de la pratique. Les résultats de l'expérience sont même mis à profit dans les déductions théoriques. Parmi les facteurs principaux qui interviennent alors, il y a à considérer; *a)* la distance du puits à l'origine amont; *b)* le volume de la couche perméable; *c)* la nature des terrains qui l'enserrent; *d)* la configuration topographique, l'étendue superficielle de la zone d'infiltration, conformément à ce que nous avons déjà dit. Ces éléments peuvent se combiner d'une façon tellement variée qu'il est très difficile de soumettre d'avance un cas déterminé à une règle générale, dès l'instant où il s'agit d'une région de quelque étendue. Les données les plus efficaces seront fournies par les résultats pratiques observés dans des conditions analogues à celles que l'on considère. On comparera ensuite ces données avec celles du cas spécial étudié, afin d'en déduire des conclusions.

• CHAPITRE V

Le réservoir ou origine de la source.

Il est souvent commode de parler de l'origine d'une source comme si elle provenait d'un réservoir; de l'emploi de ce dernier mot résultent aisément des idées fausses, parmi lesquelles il en est deux qui sont particulièrement répandues et que l'on doit combattre. L'une suppose que le réservoir est un lac superficiel, l'autre présume qu'il est un étang souterrain, occupant une caverne.

Un lac superficiel est une source très peu probable de jet artésien; nous avons déjà montré que l'eau, pour donner lieu à une nappe artésienne, doit avoir un passage facile dans la couche perméable, tandis que la plupart des lacs doivent leur existence au fond imperméable sur lequel ils reposent: ils ne pourraient se maintenir si l'eau venait à pénétrer dans le sol. Ce simple fait vient précisément en opposition avec l'idée qu'ils pourraient constituer les sources de nappes artésiennes. Loin de pouvoir leur attribuer cette propriété, il faut, au contraire, les envisager à un tout autre point de vue; en effet la formation

d'un lac montre que les précipitations atmosphériques, au lieu de pénétrer dans le sol pour servir à l'alimentation des nappes aquifères, sont précisément maintenues à la surface et exposées aux pertes par évaporation ou par ruissellement superficiel.

Les précipitations atmosphériques qui tombent sur une région se divisent en trois parties : 1° par évaporation ; 2° par ruissellement superficiel ; 3° par infiltration dans le sol. Les puits artésiens ne peuvent profiter que des eaux provenant de l'infiltration ; si l'évaporation et le ruissellement augmentent dans une région, l'infiltration y diminue. Aussi dans les régions imperméables où la partie enlevée par évaporation et par ruissellement est considérable, la partie qui pénètre dans le sol par infiltration est fort peu importante.

La notion de l'existence d'un étang souterrain est, peut-être, plus difficile à infirmer ; en effet, des canaux tubulaires et des cavernes existent sans aucun doute et donnent naissance à des sources dans certains cas ; elles permettent le passage de l'eau et sont ainsi, dans un sens, des réservoirs, mais non dans le sens du terme employé pour les fontaines artificielles. Le réservoir ou origine de la source de la plupart des puits artésiens consiste simplement dans l'eau contenue dans les couches aquifères situées au-dessus du niveau où se produit l'écoulement de cette eau. Pour s'en faire une idée nette, il suffit de s'imaginer un tube de plomb incliné et rempli de sable, dont le bout serait bouché ; supposons que l'on y fasse pénétrer de l'eau jusqu'à ce que le sable en soit saturé. On peut arriver à produire un puits artésien en miniature en forant un petit trou à la partie inférieure du tube. L'eau s'écoulera par cette ouverture et le jet sera continu si l'on renouvelle l'eau à la partie supérieure du tube. Cette expérience donne lieu à un fait analogue à celui qui se produit dans un puits artésien, excepté que dans l'exemple nous avons un cylindre de sable saturé d'eau, tandis que dans la nature nous avons une couche perméable placée dans les mêmes conditions. Le réservoir, dans ce cas, est formé par l'eau qui se trouve dans le sable à la partie supérieure du tube. De cette façon, dans les puits artésiens, le réservoir ou l'origine de la source est l'eau contenue dans la partie élevée de la couche poreuse.

L'eau est fournie par les précipitations atmosphériques. On est conduit, en fin de compte, tout naturellement à examiner cette dernière source de production d'une nappe aquifère, mais en passant, nous examinerons comment l'eau se rassemble et est conduite à la couche aquifère du sous-sol.

CHAPITRE VI

Zone d'infiltration de l'eau artésienne.

L'affleurement de la couche perméable constitue pratiquement la zone d'infiltration de l'eau artésienne. L'étendue superficielle de cet affleurement dépend de l'épaisseur de la couche perméable, de l'angle sous lequel celle-ci se présente à la surface, enfin de la configuration topographique modifiée par l'érosion qui s'est produite à la surface du sol. La zone d'affleurement sera d'autant plus réduite que la couche perméable aura une épaisseur moindre et une inclinaison plus rapprochée de la verticale; elle ne pourra conséquemment, dans ce cas, rassembler qu'une petite quantité d'eau provenant des précipitations atmosphériques. Cette zone pourra, au contraire, devenir considérable lorsque l'épaisseur augmentera et que l'angle avec la surface sera faible; il lui sera possible, dans ce cas seulement, de recevoir et de conduire une grande quantité d'eau.

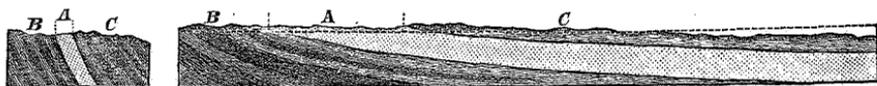


FIG. 12. Coupe montrant l'effet de l'épaisseur et de l'inclinaison des couches formant le sous-sol de la région d'infiltration. Dans la figure à gauche la couche perméable A est mince et, plongeant presque verticalement, elle donne très peu d'eau. Dans la figure à droite, la couche A est épaisse et affleurant sous un angle très aigu, son étendue est grande.

Effet de l'érosion et de la configuration topographique. — Sans vouloir poser de règle fixe, on peut dire qu'en général l'érosion des eaux courantes s'est opérée plus facilement dans les couches perméables que dans les roches imperméables. Toutefois des argiles légères peuvent être corrodées plus facilement que des grès même friables. Or, le phénomène de l'érosion peut diminuer sensiblement l'étendue de la zone d'infiltration; nous en voyons un exemple dans la fig. 13.



FIG. 13. Coupe montrant l'effet ordinaire de l'érosion de la surface d'une couche poreuse et le contour du bassin qui en résulte. Les lignes pointillées indiquent les contours, primitifs.

En revanche, il peut aussi se faire que l'affleurement superficiel acquière par l'érosion plus d'extension. Dans le cas d'une plaine peu inclinée, couverte d'un sable, provenant de la décomposition

d'une couche perméable, il y aura peu de modification dans la surface du sol transformée par l'érosion. Le plus souvent, l'érosion de roches d'inégale résistance donne lieu à des affleurements raboteux ; de ces inégalités résultera un accroissement de la surface d'infiltration.

L'effet de l'infiltration des eaux dépend aussi de l'inclinaison de la surface. On conçoit que, dans le cas de terrains élevés, à pente rapide, le ruissellement superficiel augmentera au détriment de l'infiltration ; au contraire, les régions de plaine ne permettront pas un ruissellement rapide et faciliteront la pénétration de l'eau dans le sous-sol.

Lorsqu'il ne s'agit de demander à un puits artésien qu'une faible quantité d'eau, il suffit de connaître le débit de la couche perméable et le niveau de la nappe aquifère et cela à l'aide des puits ordinaires creusés dans cette couche. Dans les régions où les précipitations atmosphériques sont d'une importance moyenne, une petite surface rassemblera de l'eau en quantité suffisante, quand bien même la zone d'infiltration serait disposée d'une manière défavorable. Quand on désire un débit abondant, on ne peut manquer de tenir compte des considérations précédentes. Sans doute, le débit irrégulier d'un puits est plus souvent dû à d'autres causes. Avant d'entreprendre des travaux importants et coûteux, il faut être certain de pouvoir disposer d'un volume d'eau surabondant, exerçant une pression considérable pour pénétrer dans la couche perméable et s'y frayer un passage.

CHAPITRE VII

Avantages de la faible inclinaison de la couche perméable.

Nous venons d'examiner certaines conditions favorables présentées par une zone d'infiltration. Il est deux autres circonstances qui concourent au même résultat : 1° La zone d'infiltration sera d'autant plus grande que la couche aquifère plongera plus faiblement dans le sous-sol, à moins que la surface des terrains ne participe en même temps à cette forte inclinaison. (Fig. 14.)

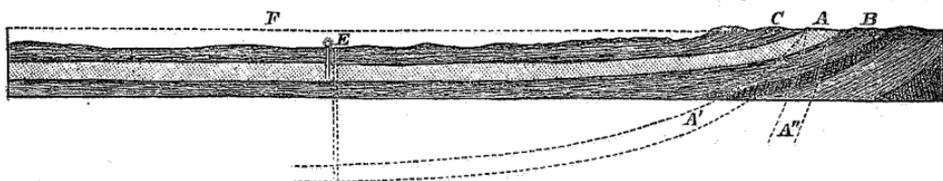


Fig. 14. Coupe montrant les avantages d'une inclinaison faible de la couche aquifère. A couche perméable ; B et C couches imperméables. A' et A'' indiquent la position de couches perméables avec une inclinaison plus forte.

2° Un autre avantage résulte de la texture de la roche perméable. Primitivement, les grès et les roches similaires affectaient une allure horizontale; leurs plissements sont dus uniquement aux pressions qui s'y sont exercées; il est résulté, naturellement, de cette action, une consolidation de la roche augmentant avec l'intensité de la pression exercée. Aussi s'ensuit-il pour ces couches bouleversées, une perméabilité souvent moins grande que pour celles qui n'ont subi que des dislocations peu importantes. C'est ainsi que plus les couches sont enfoncées dans le sol, plus le poids des roches qui les recouvrent est considérable et plus la tendance à voir leurs interstices remplis de solutions incrustantes augmente. Aussi l'idéal des conditions stratigraphiques des roches existe-t-il dans le cas où les roches ont été légèrement relevées par un mouvement général de la croûte terrestre, leur donnant une forme courbe et déprimée, permettant à ces couches de se maintenir en équilibre. Un jet artésien abondant et de grande hauteur dépend plus des conditions favorables offertes à *la circulation souterraine de l'eau* que de la *forme du bassin*.

Ce n'est pas, cependant, l'idée généralement répandue. Cette opinion est entretenue par les traités courants qui représentent les couches aquifères comme très courbées.

• CHAPITRE VIII

Conditions relatives à l'affleurement de la couche perméable.

La facilité avec laquelle l'eau s'infiltré dans la couche perméable peut résulter de ce que la couche superficielle du sol ne renferme pas d'éléments consolidés. Dans les régions qui ne comportent pas de dépôts quaternaires de provenance voisine, le terrain qu'on voit à la surface provient de la décomposition de roches sous-jacentes, c'est-à-dire que la partie mise à nu a été simplement désagrégée. La décomposition d'une roche primitivement poreuse donnera naissance à une couche superficielle encore plus perméable que celle dont elle provient, de sorte que cette partie décomposée absorbera avec la plus grande facilité les eaux qui tombent à sa surface.

Dans les régions couvertes de *drift*, la surface en partie décomposée était plus ou moins polie par les actions glaciaires et était ensuite recouverte par une couche de terrains de diverses natures et par des fragments de roches diverses, tantôt poreuses, tantôt imperméables, présentant souvent dans les couches alternantes (quelquefois avec un haut degré de perfection) les conditions nécessaires à l'existence des

fontaines artésiennes. Le diluvium a souvent une certaine disposition à partager les caractères des roches sur lesquelles il s'est déposé; mais ce fait ne se présente pas dans tous les cas. Le plus souvent, le diluvium est imperméable et retient les eaux de surface. Il est limité à la surface du sol par des contours généralement irréguliers, formés grâce aux actions glaciaires et non par le ruissellement superficiel. Il s'ensuit que l'eau ruisselle plus lentement à la surface et qu'elle s'infiltré en bien plus grande quantité; ce qui, dans une certaine mesure, vient diminuer l'imperméabilité de ces roches; mais, en vérité, ces formations comportent une telle variété de dépôts soit glaciaires, fluviaux, lacustres ou marins, qu'on ne peut se faire sur leur perméabilité aucune idée générale qui ne soit sujette à erreurs. On ne peut en dire ici davantage, si ce n'est que l'on doit porter son attention sur les circonstances influant sur ce manteau si irrégulier qui couvre le sol.

CHAPITRE IX

Précipitations atmosphériques.

Les eaux des puits artésiens proviennent évidemment des nuages; il faut se demander avant tout si la quantité d'eau tombant sur le bassin que l'on considère suffit à tous les besoins. Ces besoins, il est vrai, sont très divers. Il faut calculer la proportion nécessaire aux usages de l'homme, et celle qui se perdra en s'écoulant par les interstices du sol. La quantité d'eau indispensable est très variable; tantôt elle consiste dans le faible volume nécessaire au cultivateur pour usages domestiques et pour le bétail; tantôt elle comprend le volume considérable nécessaire dans les villes pour leurs bains, égouts, jardins et rues, et aussi pour les exigences très impérieuses des irrigations des contrées arides. D'autre part, la quantité d'eau que les couches peuvent absorber, transporter sous le sol et débiter dans les puits a des limites beaucoup plus restreintes, et c'est là le meilleur moyen de juger si les précipitations atmosphériques sont suffisantes.

Différence existant entre les quantités d'eau reçue et tombée. — Il résulte des calculs basés sur la région où l'on se trouve et la quantité d'eau que l'on désire, que l'on s'imaginera arriver à des résultats brillants ou insuffisants. Dans les contrées les plus humides il n'y a pas lieu de se préoccuper de l'irrigation du sol lui-même; le volume à recueillir sera limité aux besoins domestiques et aux exigences de l'hygiène. Les ressources y sont grandes et la demande est restreinte. Malheureusement,

c'est toujours quand le besoin est grand qu'il y a le moins de ressources pour y pourvoir.

La proportion des précipitations atmosphériques nécessaire aux usages domestiques est généralement grande. Il tombe, sur 50 pieds carrés d'une contrée de population moyenne, plus d'eau qu'il n'en faut pour en fournir à un individu, même dans une ville où l'organisation sanitaire est celle de Paris. La proportion de pluie que réclame l'agriculture, bien que souvent très élevée, est, en général, moindre que celle nécessitée par les usages domestiques.

Ainsi, tandis que, dans les régions humides, les précipitations atmosphériques, considérées indépendamment des pertes qu'elles subissent, sont suffisantes pour satisfaire à la demande habituelle, on voit à première vue que, dans les régions arides, elles sont entièrement insuffisantes pour parer à toute éventualité.

CHAPITRE X

Irrigations à l'aide de puits artésiens.

Aucune eau ne se forme dans les puits artésiens ; ils ne peuvent qu'amener à la surface du sol l'eau qui leur arrive. Il leur est possible de concentrer ce volume en un point déterminé, mais non de l'augmenter, quand il n'atteint pas la quantité nécessaire. Si les précipitations atmosphériques ne fournissent que la moitié de la quantité d'eau exigée, il ne faudra cultiver que la partie de la région à laquelle on pourra réserver toute l'eau recueillie. Il ne peut être question en effet d'amener, par des canaux, l'eau aux endroits où elle manque. L'insuffisance des puits artésiens sous ce rapport est encore évidente.

Un puits artésien ne fournira et ne pourra fournir que la quantité d'eau provenant des précipitations qui tombent, non sur toute la région, mais bien sur la zone d'affleurement de la couche perméable. En général, cette zone occupe une surface beaucoup plus restreinte que la contrée sous laquelle ces couches existent et sur laquelle on devrait compter pour obtenir un débit suffisant pour l'irrigation.

Si l'on considère en outre que l'évaporation et le ruissellement enlèvent une grande partie des précipitations atmosphériques, et si l'on admet l'impossibilité pour les puits de débiter toute l'eau qui pénètre dans les couches perméables, on ne peut avoir que peu d'espoir d'obtenir l'eau nécessaire à l'irrigation d'une région aride au moyen de puits artésiens. Nous allons cependant examiner quelques faits qui viennent à l'encontre de cette opinion.

I. *Régularité de la répartition du rendement en eau.* — Les couches perméables agissent comme un régulateur ; l'eau y pénètre par moment suivant les variations des chutes pluviales ; mais elle en sort avec une grande uniformité. Les chutes de pluie des mois humides déterminent le débit des mois secs. Dans les cas où il n'y a besoin que d'un léger supplément de débit pendant la saison sèche, cette répartition régulière peut rendre de grands services.

II. *Réservoirs supplémentaires.* — Il ne faut de l'eau pour l'irrigation que pendant la saison où pousse la récolte ; on doit donc, tant que le jet artésien se produit sans interruption, établir dans certaines localités des réservoirs où l'eau s'assemble pendant la saison d'hiver, et est employée quand elle est nécessaire. Cette méthode ne diffère pas essentiellement du système de réservoirs construits dans le voisinage des cours d'eau pour empêcher les inondations ; elle présente l'avantage de préserver la contrée d'inondations, et peut être aisément contrôlée. Toutes ces méthodes sont limitées aux dépenses qu'on peut y consacrer. Une pluie de peu d'importance même suffirait pour une récolte si on l'utilisait au bon moment. Des averses abondantes, des inondations saisonnières et des pluies d'hiver amènent l'eau en causant de nombreux dommages. Si la pluie des régions arides de l'Ouest pouvait être répartie d'une manière plus régulière, les régions incultes pourraient être réduites dans une forte mesure. Les puits artésiens rendent des services, quand ils peuvent contribuer à une meilleure distribution de la pluie.

III. *Autre avantage.* — Les couches perméables sous une région sèche peuvent recevoir de l'eau provenant d'une région plus favorisée. Souvent les bords relevés des couches forment les collines servant de contre-forts à des chaînes de montagnes qui condensent l'humidité et y déterminent des précipitations atmosphériques beaucoup plus considérables. Des courants artésiens, sortant de couches dans une situation si favorable, permettent de faire passer les eaux des régions plus humides à des régions plus sèches, et pour cette raison ils tendent à égaliser la distribution des eaux dans l'espace de la même façon qu'ils ont amené cette répartition dans le temps.

IV. *Réutilisation de l'eau.* — Quand l'eau s'est infiltrée dans les couches supérieures du terrain, elle a acquis, par ce passage, une plus grande valeur agricole, et la conserve jusqu'à ce que quelque force ait ramené cette eau à la surface. Cette même eau a son utilité, car en saturant les couches profondes du sol, elle empêche les nouvelles eaux de pluie de pénétrer aussi profondément qu'elles le pourraient, et les retenant plus près de la surface, les conserve en un endroit plus favorable

à leur utilisation soit par capillarité, soit par les actions des racines. Les puits artésiens, cependant, ramènent à la surface l'eau qui avait pénétré à des profondeurs où elle ne pouvait plus servir à rien ; ils permettent de l'utiliser une seconde fois au grand avantage de la végétation et de l'atmosphère, où elle est évaporée. Il y a donc, dans les puits artésiens, outre un transport de l'eau, une augmentation d'utilité.

CHAPITRE XI

Relations entre la quantité de pluie mesurée et la capacité de la couche perméable.

Quittons maintenant les généralités relatives à la quantité des précipitations atmosphériques et abordons la question plus pratique du volume des eaux météoriques que peuvent absorber les couches de terrain. Tout volume d'eau qui dépasse celui que peuvent conduire les couches perméables, ne peut avoir d'utilité pour un puits artésien. Prenons, comme point de départ, une position d'équilibre de la nappe aquifère : nous supposons que l'eau se trouve dans la couche perméable à un niveau donné. Imaginons que les précipitations atmosphériques soient un peu plus abondantes, de façon que la nappe puisse atteindre un point où se produise une source. Un puits creusé en un endroit convenable fournira, outre son débit habituel, une quantité d'eau en relation avec la facilité de circulation de l'eau dans le sous-sol. Si ce passage est libre et ouvert, un certain nombre de puits pourraient épuiser la nappe donnant lieu à la source et empêcher le jet artésien de se produire ; l'eau restant dans le sol serait alors en équilibre. Prenant cette position d'équilibre hydrostatique ainsi obtenue comme niveau de base, considérons l'effet des divers degrés d'augmentation des précipitations atmosphériques. Pendant un certain temps toute augmentation des précipitations fera croître le débit, qui augmentera à peu près proportionnellement aux chutes de pluie, aussi longtemps que la facilité de circulation de l'eau à travers les couches de terrain restera la même. Si les précipitations atmosphériques augmentaient au delà de ces limites, le premier effet serait d'élever l'origine de la nappe, ce qui aurait pour résultat d'augmenter la pression que l'eau exerce sur les couches enveloppes imperméables ; en même temps, le jet artésien s'élèvera un peu. Toute augmentation subséquente de la pluie agira sur l'origine de la nappe et sur le jet

artésien jusqu'à ce que le niveau d'eau dans la couche perméable atteigne la surface du sol. Dès que ce point aura été atteint, l'augmentation de la pluie n'aura que peu d'effet, car l'excès d'eau s'écoulera à la surface, ou sera perdu par évaporation.

Si les couches de la région considérée sont ainsi remplies d'eau en quantité surabondante, nous saurons que les précipitations atmosphériques sont suffisantes. Une telle constatation procure un moyen pratique de déterminer les conditions dans lesquelles se présente un forage préalablement à toute tentative d'un tel travail. Le niveau moyen de la nappe aquifère ordinaire est indiqué par les puits. Si de grandes fluctuations y sont produites par les variations des précipitations atmosphériques, un effet semblable en résultera dans les puits que l'on se propose d'établir. Mais si leur niveau est constant, les précipitations atmosphériques peuvent être considérées comme suffisantes pour venir en aide au débit; la stabilité du débit ne provient que d'une surabondance d'eau à laquelle un débordement sert de régulateur.

Si le volume d'eau souterrain n'a pas d'issue en dehors de l'infiltration et de l'évaporation par capillarité, il augmentera quand la pluie tombera en abondance, et décroîtra quand celle-ci diminuera; mais quand ce volume reçoit une telle quantité d'eau qu'il puisse déborder, son niveau restera constant, précisément à cause de la quantité d'eau qui déborde. De même que la constance de niveau d'un lac, malgré l'irrégularité des chutes pluviales, indique clairement une alimentation d'eau suffisante et un écoulement régulateur, de même lorsque le niveau des nappes souterraines reste invariable, il faut en conclure que le sous-sol est saturé, l'alimentation suffisante et le surplus assuré d'un écoulement facile. Il y a encore une indication du fait que l'eau est surabondante quand, celle-ci s'étant infiltrée dans la couche perméable, ressort en jaillissant sous forme de sources. Si la couche perméable n'était pas déjà saturée, l'eau y pénétrerait et y resterait, tandis que l'eau n'arrive à l'extérieur que parce que la couche étant saturée, elle ne peut lui permettre d'y pénétrer davantage. L'eau peut s'écouler à la surface de la terre, quoique le sous-sol ne soit pas encore saturé; mais, entrée dans une couche perméable continue, elle ne peut en ressortir que parce qu'il ne lui est pas possible d'y pénétrer plus profondément.

Ces indications montrent la situation des richesses aquifères de la région; que la couche ait été traversée ou non par un forage, elles servent de guide aux entreprises subséquentes. Si lors du creusement de nouveaux puits les sources tarissent, si le niveau d'eau s'y abaisse,

sans qu'on puisse en trouver un autre motif, il y a lieu de croire que l'insuffisance se fait sentir à l'origine de la source, ces nouveaux puits consommant le surplus, sinon réduisant le volume d'eau formant réservoir.

Avec quelques restrictions, on peut admettre l'opinion que dans les régions qui reçoivent suffisamment de pluies pour l'agriculture, l'atmosphère déverse sur la partie supérieure de la couche perméable tout ce que les puits sont capables d'en retirer. Il y a des exceptions là où d'énormes forages sont tentés pour épuiser tout le volume d'eau disponible. Dans ce cas, on doit faire une étude spéciale avant de les entreprendre. Il peut y avoir des exceptions également quand la capacité de la couche perméable est très grande et que la région où se fait l'infiltration est petite. Ce que nous venons d'exposer peut parfaitement s'appliquer aux entreprises ordinaires des villes et sociétés.

Dans la catégorie de puits que l'on a creusés dans des dépôts quaternaires ou dans d'autres couches superficielles encore meubles, on trouve plus de variété, et une relation plus intime entre la quantité d'eau tombée et celle fournie par les puits. Ces dépôts, formés de sables et de graviers, présentent, en effet, généralement des interstices et permettent alors une libre circulation de l'eau; le réservoir qui les alimente est peu éloigné, de manière à réduire la résistance entre ce dernier et le puits que l'on fore, la région où se fait l'infiltration est d'ailleurs ordinairement de peu d'étendue. Dans ces conditions, un nombre considérable de forages peut extraire tout ce que la pluie peut déverser sur la zone désignée. La quantité d'eau fournie variera donc avec la quantité de pluie tombée dans le pays.

Les cas dans lesquels une augmentation des précipitations atmosphériques, au delà d'une certaine mesure, sera le plus sensible, seront ceux dans lesquels la capacité de la couche aquifère est grande et l'imperméabilité des couches supérieures imparfaite. Si, toutefois, la couche aquifère a une texture compacte et si les couches supérieures sont imperméables, une pluie, même modérée, fournira à la zone d'infiltration plus que ce qu'elle peut répartir en un certain nombre de puits pratiqués de distance à distance. Elle y maintiendra le niveau d'eau le plus élevé possible.

Des considérations qui précèdent, il résulte que pour un grand nombre de puits creusés dans des couches profondes, le volume de la pluie qui tombe au delà d'une certaine limite a peu d'influence sur le débit, tandis que pour des sources à plus grand débit, c'est un élément d'une grande importance.

CHAPITRE XII

Fuite de l'eau à un niveau inférieur au puits.

Il est évident que si les couches enveloppes du courant artésien sont percées, soit naturellement, soit artificiellement en un point inférieur au niveau du puits, l'eau éprouvera une diminution de pression en s'échappant par ces ouvertures et il pourra ne pas y avoir d'écoulement par le puits artésien. Si les couches enveloppes de la nappe artésienne sont épaisses, il n'y aura aucun motif pour que le débit du puits ne soit pas suffisant. Cependant, dans les régions où les fissures et les mouvements du sol sont fréquents, l'absence d'écoulement à travers les fissures peut faire craindre des insuccès.

Les défauts artificiels proviennent principalement des puits que l'on a forés précédemment. C'est un fait bien reconnu que là ou plusieurs puits sont situés les uns près des autres, ceux qui se trouvent plus bas que le puits projeté peuvent déjà avoir épuisé toute la nappe aquifère. L'inverse peut aussi arriver si le nouveau puits est plus bas que ceux existant précédemment. Le remède, dans ces cas, est simple : on peut diminuer le débit des puits inférieurs jusqu'à ce que ceux d'un niveau supérieur donnent de l'eau ; il est possible aussi d'amener tous les puits à un même niveau à l'aide d'un tubage. Il n'y a peut-être pas de meilleure preuve de la capacité de débit de la couche aquifère que la manière dont le débit d'un puits influe sur celui d'un puits voisin. Dans le cas où le débit est considérable et trouve aisément son issue, l'eau pourra passer plus facilement d'un puits à l'autre.

D'anciens puits qui n'ont jamais été surveillés, ou qui ont été négligés, peuvent être des causes cachées d'insuccès. L'eau peut s'élever dans ces derniers, arriver à des sédiments superficiels meubles ou dans d'autres couches perméables, et s'échapper par déversement latéral. La pression de la nappe artésienne est ainsi diminuée et on n'obtient pas de jet. Le remède consiste à combler les vieux puits, ou à les mettre dans les mêmes conditions que les nouveaux.

CHAPITRE XIII

Conditions particulières relatives au débit d'un puits artésien.

Il a été suffisamment démontré que si la circulation de l'eau souterraine a lieu dans une couche de faible épaisseur et constituée en outre d'une roche plus ou moins compacte, ces deux circonstances désavantageuses auront pour résultat de faire diminuer considérablement le

débit, quelle que soit, d'ailleurs, l'étendue et la puissance de la zone superficielle alimentant la nappe aquifère. Des conditions inverses donneront lieu, au contraire, à une venue d'eau abondante.

Une seconde condition dépend du puits lui-même. Il est clair que si le puits n'atteint que la partie supérieure de la couche aquifère, il n'y aura qu'un débit très restreint; mais si, d'autre part, le puits y pénètre profondément, l'eau pourra s'y précipiter de toutes parts et le débit peut devenir considérable.

Moyens d'accroître le débit: A. Explosifs. — Le forage ayant traversé la couche perméable toute entière, on peut reconnaître que l'on s'est peut-être trompé dans ses prévisions quant au débit du puits. Parmi les circonstances défavorables conduisant à un pareil résultat, on peut citer en premier lieu les variations dans la perméabilité de certaines couches, qui présentent des parties plus ou moins compactes. De même, si la circulation de l'eau artésienne se fait dans les fissures de la roche, l'irrégularité de ces voies souterraines offrira naturellement des endroits désavantageux à un forage.

Pour remédier à ces inconvénients, on pourra recourir à l'emploi d'explosifs dont l'objet sera de rompre, de diviser, ou d'écarter les fragments de la roche, et de faciliter ainsi la circulation de l'eau. Ce procédé est employé d'une manière efficace dans les régions où l'on exploite les pétroles.

B. Augmentation du diamètre du puits. — L'augmentation du diamètre du puits peut accroître le débit, mais ce moyen est plus onéreux et moins productif que le précédent, dès que la profondeur devient assez grande. Certains sondeurs procèdent habituellement en pratiquant d'abord un forage de petit diamètre, qu'ils élargissent ensuite. Outre les avantages qu'il peut y avoir à faire un forage de petit diamètre, cette manière de procéder permet de fixer avec plus de certitude le prix du forage en un point déterminé. Le résultat obtenu dans ce premier travail permet ainsi aux sondeurs d'apprécier le résultat probable du travail d'élargissement.

On peut dire que, si l'eau jaillit sous une forte pression, l'élargissement du tube donnera lieu à un débit plus grand, puisque le frottement se trouvera sensiblement diminué par l'augmentation du diamètre. Si, au contraire, le jet est doué de peu de force ascensionnelle et si en même temps le point origine de la nappe artésienne est assez élevé, c'est un indice que le courant souterrain rencontre des obstacles assez nombreux. Ces indications sont défavorables à l'élargissement du puits. Si l'origine de la nappe artésienne est à un niveau peu élevé, un jet d'une certaine importance est un signe évident d'un débit assez considérable

dont la valeur ne serait pas modifiée par un forage de plus grand diamètre.

C. *Comparaison entre l'effet d'un seul puits de grand diamètre et celui de plusieurs puits de dimensions moindres.* — La nécessité d'obtenir de grands volumes d'eau pour l'alimentation des villes et villages oblige souvent d'examiner la question de l'établissement d'un seul puits aux grandes dimensions ou de plusieurs aux dimensions ordinaires; il faut, pour étudier cette question, entrer dans les considérations suivantes : Si la capacité de la couche aquifère est connue et paraît, selon toute probabilité, suffisante pour amener au fonds du puits toute l'eau à utiliser à la surface du sol, il est évident que l'économie demande qu'on ne fasse qu'un seul forage de grande dimension. Mais dans tous les cas où une grande quantité d'eau est nécessaire, et spécialement dans ceux où l'on parvient à faire débiter à la couche aquifère tout ce qu'elle peut donner, il pourrait y avoir avantage de faire plusieurs forages assez distants les uns des autres; on met ainsi à contribution une surface plus grande de la couche aquifère. Il est clair que la roche perméable ne peut débiter à la base d'un seul puits, même de grand diamètre, autant d'eau que par plusieurs puits. En outre, par l'emploi des explosifs, le trou de forage de chaque puits peut être agrandi et atteindre la dimension du puits unique. Les énormes puits qui ont quelquefois été entrepris, ne sont pas, pour ce motif, à recommander.

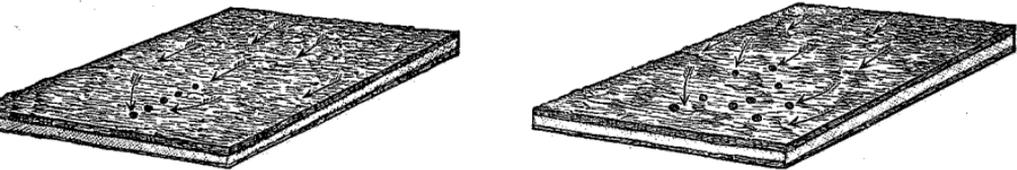


FIG. 15 et 16. Coupes de couches montrant la disposition désavantageuse des puits.

D. *Répartition des puits.* — Il importe beaucoup de répartir judicieusement les puits artésiens. Quand on en fore plusieurs, en supposant déterminée la direction générale suivie par le courant artésien, les puits situés dans ce sens, en ligne continue (fig. 15 et 16), se trouveront dans des conditions inégales : les puits d'amont, à partir du premier, auront une position privilégiée. Si les puits sont groupés, ceux qui sont placés extérieurement diminueront le débit des autres aux dépens de ceux établis à l'intérieur du groupe. Une disposition avantageuse sera obtenue en établissant les puits suivant une ligne brisée à angles droits, dans le sens général du courant. Une répartition peut-être encore plus favorable (fig. 17 et 18) mais sujette à certains aleas,

d'après les circonstances locales, consisterait à ranger les puits en ligne convexe par rapport à l'affleurement de la couche poreuse. Quant à la distance dont on doit les séparer, il est évident que plus ils seront éloignés, plus leur débit sera important, et moins d'influence ils auront les uns sur les autres. Il n'en est pas moins vrai que des considérations pratiques déterminent seules leur éloignement.

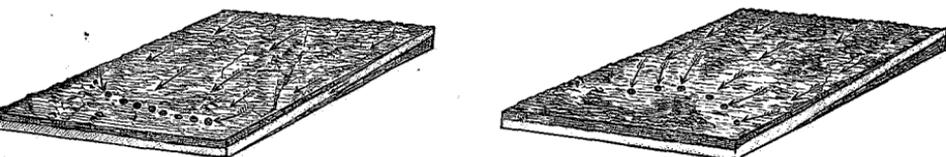


FIG. 17 et 18. Coupes de couches montrant une disposition avantageuse des puits.

CHAPITRE XIV

Dépense de l'eau dans les puits.

Jusqu'ici nous ne nous sommes occupé spécialement que des conditions relatives à la couche perméable et au mode de circulation souterraine de l'eau artésienne. Nous avons été amené, dans le chapitre précédent, à quelques considérations relatives au puits lui-même ; nous allons aborder maintenant l'étude des causes qui s'opposent au mouvement de l'eau dans les puits.

I. *Frottement*. — Nous avons rappelé précédemment le fait, d'ailleurs bien connu, que le frottement diminue quand on augmente le diamètre du puits et que, pour ce motif, il y a avantage à forer des puits de grand diamètre. L'introduction d'un tube de petit diamètre au sommet du puits augmente les résistances et diminue l'importance du jet artésien. Redressons ici une erreur qui consiste à croire que le niveau de l'eau s'élève davantage lorsqu'on place à la partie supérieure du puits un tube de diamètre plus petit que celui du puits lui-même. Cette idée provient du fait qu'une réduction du diamètre à la sortie d'une conduite peut augmenter la force ascensionnelle du jet qui en sort ; mais jamais ce jet ne pourra s'élever au niveau qu'atteindrait l'eau dans un tube entièrement ouvert. En réalité, le niveau s'établit à la même altitude dans un tuyau large ou étroit.

II. *Ecoulement latéral*. — L'eau se trouvant forcément sous pression dans le puits, s'échappera latéralement si une issue se présente. Si, en quelque point de la partie supérieure du puits, elle rencontre une crevasse, une cavité ou une couche perméable qui n'est pas occupée par du liquide à une pression égale à la sienne, elle s'échappera

par la voie qui se présente à elle. Il est nécessaire d'éviter cette cause de perte. Quelquefois les soins spéciaux que nécessite le forage empêchent cette circonstance de se produire. En effet, lorsqu'en forant un puits, on rencontre un sol formé de sable, de gravier, d'argile et autres matières qui se trouvent au-dessus du lit rocheux, on a l'habitude de descendre un tube en fer pénétrant de quelques pieds dans la roche en faisant usage d'une tarière de plus grand diamètre que celle que l'on emploie pour le restant du puits. Si ce tube est convenablement serré dans la roche, l'écoulement latéral devient impossible. Il n'est pas toujours possible d'employer ce moyen. D'ailleurs, en beaucoup de cas, les couches traversées à la partie supérieure donnent lieu à de grandes pertes et il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes spéciales pour les éviter.

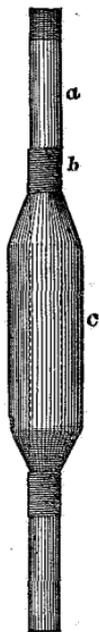


FIG. 19. Poches à semences : a tuyau de décharge; c poche en cuir remplie de semences de lin séché; b merlin pour retenir les bouts de la poche.

III. *Captation du courant.* — Il est clair qu'on peut obtenir une captation parfaite en descendant un tube jusqu'à la partie compacte de la couche enveloppe supérieure du courant artésien. Autrefois ceci se faisait par un moyen aussi simple qu'ingénieux, connu sous la dénomination de « Seedbag » (fig. 19). C'était une poche en cuir, ayant la forme d'un cylindre et ouverte aux deux extrémités, d'un diamètre égal à celui du tube du forage. La figure permet de s'imaginer suffisamment son fonctionnement. On remplissait la poche de graines de lin bien sèches et on vissait le bout supérieur au tube. Quand l'instrument était ainsi ajusté, on le descendait dans le puits au point voulu et la graine gonflait par l'absorption de l'eau. Ceci élargissait la poche et fermait le trou de forage hermétique-

ment, empêchant l'eau de passer hors du tube. De cette façon tout le liquide ne pouvait que s'élever par le tube jusqu'à la surface, ou tout au moins aussi haut que la pression l'y forçait.

Un moyen plus convenable, mais plus dispendieux, consiste à entourer le tube de disques en caoutchouc qui gonflent de la même manière que la graine de lin. Plusieurs de ces disques sont enfilés sur une partie du tube et sont serrés entre deux rondelles en fer qui, par pression font dilater le caoutchouc latéralement et ferment les issues existant autour du tube. La construction de ces pièces et leur ajustage sont suffisamment indiqués par les figures 20 et 21, qui montrent un des modèles en usage.

CHAPITRE XV

Mesure de la hauteur du jet artésien.

Lorsque le puits a été bien établi, il est facile de déterminer la hauteur à laquelle l'eau artésienne peut s'élever.

Si la pression n'est pas forte, il suffit de surmonter le puits de tuyaux s'élevant au-dessus de la surface du sol, et à une hauteur telle que l'eau ne se déverse plus à leur extrémité. Si la pression est grande, le niveau hydrostatique pourra s'élever très haut. Dans ce cas l'emploi d'un appareil de jaugeage convenablement calibré et mesurant la pression, permettra de déterminer la hauteur du jet. Chaque livre de pression par pouce carré correspond à une élévation de 2.31 pieds.

Prévisions relatives à la hauteur du jet. — L'estimation de la force ascensionnelle d'une source abondante dont le débit est certain, est une opération aisée; elle contraste avec la difficulté qu'on éprouve à estimer préalablement la hauteur atteinte par le jet artésien. Théoriquement, le niveau d'eau dans le puits s'établira à la même hauteur que dans la partie la plus élevée de la nappe artésienne, et il y aura écoulement à tout niveau moindre que celle-ci. Mais la circulation difficile à travers le sous-sol, réduit la hauteur à laquelle l'eau peut s'élever, et le frottement éprouvé par le long passage à travers les roches et le puits diminue encore l'altitude à laquelle le courant pourrait s'élever. Le sondeur prudent cherchera, cependant, avec le plus de soins possible, une base

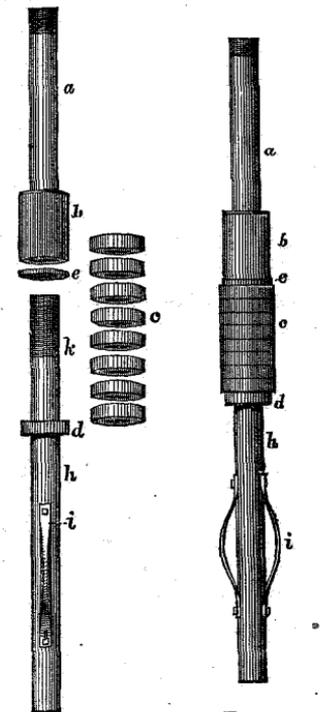


FIG. 21.

Montrant l'appareil vissé tel qu'il est dans le puits. *a* tuyau de décharge; *b* grand dé dans lequel *k* se visse; *c* rondelle de fer; *d* une série de rondelles de caoutchouc s'adaptant à *k* entre *b* et *d*; *e* partie du tuyau se vissant dans le dé *b*; *d* rondelle formant la tête de la vis *k*; *h* partie du tuyau en dessous de la garniture; *i* un ressort pressant contre les parois du forage pour fixer le tuyau *h* pendant que *a* et *b* sont vissés sur *k*.

réellement scientifique pour établir son appréciation. Dans presque tous les districts, des puits ont été entrepris et leurs résultats, heureux ou défectueux, quand ils sont soumis à une analyse critique et quand

ils ont été interprétés, fournissent des données précieuses quoique pouvant, dans certains cas, ne s'appliquer qu'à la localité explorée. On ne saurait trop insister auprès des sondeurs, des géologues, et même des particuliers, sur l'importance qu'il y a d'enregistrer les résultats précis de toutes les entreprises de forage, qu'elles soient bonnes ou défectueuses.

CHAPITRE XVI

Découverte du courant.

Nous avons vu plus haut que l'eau peut monter du fond du puits à sa partie supérieure et y trouver une issue latérale à travers les couches voisines de la surface du sol. Si l'on n'a pas tenu compte de ce fait, il se peut que l'eau ne parvienne pas à s'écouler extérieurement. Pour ce motif, il faut, aussitôt qu'on atteint une nappe artésienne, voir si l'eau, n'ayant pas d'issue latérale, peut encore s'élever jusqu'à la surface : 1^o Ordinairement un courant artésien s'annonce par la montée de l'eau dans le puits, quoique cette constatation ne se fasse pas toujours. 2^o L'examen de certains faits agissant sur la tarière peut faire naître l'incertitude. 3^o Quand on découvre un courant de grande violence, les débris produits par le forage peuvent être emportés ; si donc la pompe à épuiser le sable ne le ramène plus à la surface du sol, ou ne ramène que les matières plus grossières, il y a de sérieux motifs de croire qu'un courant a été atteint et l'on doit, dans ce cas, faire les essais que la situation commande. Dans les entreprises qui ne réclament pas un grand débit, les épreuves doivent être faites quand on a de telles indications. Il est ordinairement désirable, avant de continuer le forage, de connaître par des essais la quantité d'eau que peuvent contenir les couches présentant quelques-unes de ces indications. Dans les contrats, on doit stipuler que ces épreuves seront faites, car il n'est pas de l'intérêt du sondeur, une fois ses machines placées et en mouvement, d'arrêter les travaux à une profondeur moindre que celle fixée primitivement. L'arrivée du volume d'eau peut être déterminé par l'emploi de tubes ou de poches à graines, comme il a été expliqué plus haut.

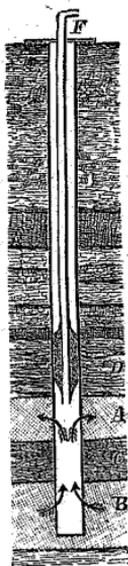


FIG. 22. Coupe d'un puits montrant une épreuve négative.

Preuves erronées. — En toute honnêteté, il est possible de faire erreur et d'obtenir un résultat négatif ou faux. Supposons que deux couches perméables A et B (fig. 22) soient séparées par une couche imper-

méable et qu'on ait négligé de faire l'essai de la première parce qu'on ne se trouvait pas en présence d'indications encourageantes ou pour d'autres raisons. Si l'on désire faire cette épreuve et si l'on place la poche à graines ou à caoutchouc au-dessus de la couche A, ces deux couches ayant un niveau d'eau de même altitude, on peut avoir confiance dans l'essai que l'on a fait, et le résultat indiquera le débit combiné des deux nappes. Mais supposons que la couche A ait été attaquée par érosion ou atteinte par des crevasses, tandis que la couche B soit restée intacte et ait pour sa source une origine à niveau supérieur. Dans ces conditions, l'eau de B pourra s'écouler à travers le trou de forage et s'échapper latéralement dans A, comme le montre la figure. Dans ce cas, le puits ne donnera aucun résultat, ou bien l'essai que l'on a fait conduira à un résultat, erroné. Si l'eau, en s'échappant latéralement par la couche A, emmène les eaux de B et s'il n'y a pas d'écoulement extérieur, l'eau restera dans le tube d'essai à la même hauteur que pendant l'épreuve, et le résultat sera négatif. Il indiquera une possibilité qui n'existe pas réellement. Si, d'autre part, il y avait un écoulement latéral à travers les couches voisines de la surface aussi bien qu'à travers A, l'introduction du tube d'essai empêcherait cet écoulement. Dans ce cas, l'eau monterait dans celui-ci, et produirait, peut-être, un jet artésien. L'inconvénient d'une épreuve pareille consiste

dans le fait qu'elle semble donner un résultat, tandis qu'en réalité il n'y en a aucun. On ne saurait remédier à cet inconvénient qu'en plaçant la poche à graines entre les deux couches poreuses A et B.

2° Prenons un autre exemple ; les deux couches perméables A et B (fig. 23) ont été traversées par le forage et l'appareil en caoutchouc a été placé entre ces deux couches. 1° Si le débit de A est alors égal à celui de B, l'eau se trouvera à la même hauteur dans le tube et en dehors, s'il n'y a pas d'écoulement latéral dans les couches voisines de la surface traversées par le puits. 2° Si l'absence du courant artésien était due à cet écoulement latéral, il y aurait alors un courant provenant de la couche B, mais celui de A se perdrait dans le sol. 3° Si A provient d'une nappe dont l'origine est à un niveau plus élevé que celui de B (fig. 23), et s'il n'y a pas d'issue latérale dans la partie supérieure des couches, l'eau sera moins élevée dans le tube qu'en dehors. 4° Si, cependant, dans ce cas, cette perte latérale existe dans les couches supérieures rencontrées

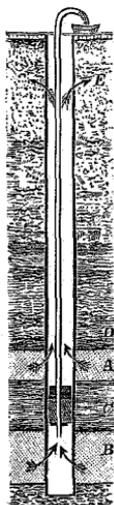


FIG. 23. Coupe d'un puits montrant un essai imparfait.

par le puits, le courant de A sera perdu, tandis que B pourra s'élever dans le tube ou même donner un jet artésien pouvant faire croire à un bon résultat, tandis qu'en réalité la plus grande partie du débit aura été perdue. 5° Si A donne un courant plus faible que B, mais a son affleurement au même niveau, l'épreuve ne serait pas satisfaisante, si l'on se contentait de ne faire usage que du courant moins important provenant de A. 6° Si, cependant, A a son affleurement moins élevé, ce qui permet à l'eau de B de s'écouler, la poche à graines a été placée au point voulu, et on arrivera aux meilleurs résultats possible.



FIG. 24. Coupe d'un puits montrant un essai interverti.

3° Dans un autre exemple encore, soient A et B représentant des couches perméables (fig. 24), dont la plus basse B est dans des conditions telles, qu'elle puisse drainer la couche supérieure au moyen d'une issue se trouvant à un niveau inférieur, comme il a été indiqué dans les fig. 6 et 7. 1° D'abord si la perte par cette action de drainage de la couche n'est pas complète et si la poche à graines est placée au-dessus de A comme le montre la fig. 25, I, le résultat sera négatif. 2° S'il y avait une perte considérable, elle serait arrêtée par le tube et la poche à graines; une ascension dans le tube en serait le résultat dans la plupart des cas. Dans les deux exemples le résultat est trompeur, particulièrement dans le dernier, à cause de l'ascension peu considérable de l'eau. Le fait est que le courant de la couche productive est perdu par le bas. 3° Supposons que

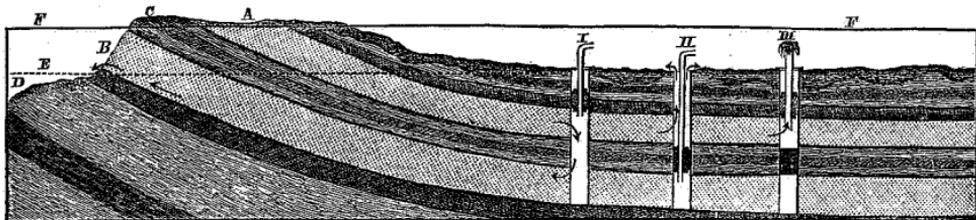


FIG. 25. Coupes de trois puits montrant un bon et deux mauvais essais. Ces puits doivent être considérés comme indépendants les uns des autres et ne sont représentés ensemble sur le diagramme que pour la facilité de la comparaison.

la poche à graines soit placée entre A et B comme dans la fig. 25, II, elle interceptera le courant provenant de la couche A, tandis que celui de B, à cause d'une issue plus basse, ne pourra s'écouler. S'il y a un écoulement latéral dans les couches supérieures, le courant de A mon-

tera dans le puits en dehors du tubage et pénétrera dans les couches perméables supérieures si elles existent 4° Mais si ces couches n'existent pas, l'eau s'élèvera jusqu'à la surface et jaillira, tandis que celle qui se trouve dans le tube restera probablement à un niveau plus bas qu'avant l'épreuve. La méthode à employer dans ce cas consiste à placer la poche à graines à un point quelconque de la couche imperméable entre A et B ; ce qui arrêtera le courant inférieur. Un tubage placé alors au-dessus de A interceptera tout écoulement dans les couches supérieures et le débit complet de la couche aquifère A pourra être capté. Ces exemples montrent la nature des épreuves défectueuses et les conclusions trompeuses qui peuvent en naître. Le remède employé donne des résultats évidents. Faire un essai de toutes les couches aquifères au fur et à mesure qu'elles se rencontrent, sera le seul moyen d'éviter les erreurs.

CHAPITRE XVII

Influence du temps sur le courant.

Il a été observé que le débit des puits artésiens diminuait avec le temps, et cette idée a conduit à dire que ce fait était inévitable. Il n'est pas sans importance pour cela d'examiner les causes qui amènent la diminution du courant artésien. On a remarqué que le débit des puits artésiens diminue pendant la marée et l'on a déduit de cette coïncidence une relation directe entre ce phénomène marin et la diminution constatée. Mais ce dernier fait peut s'expliquer aussi par d'autres causes que nous allons examiner successivement.

1° *Réduction du débit par suite de la perte des gaz contenus dans le sous-sol.* — Nous avons omis de signaler une catégorie de puits artésiens dans lesquels l'écoulement se produit, non par la différence de niveau des eaux, mais par la force expansive de gaz disséminés dans la masse liquide. L'influence de ces derniers peut s'exercer à l'état de mélange, de même manière que l'acide carbonique agit dans l'eau de Seltz ; mais les gaz peuvent aussi être emmagasinés séparément dans une poche souterraine en communication avec la nappe aquifère. Dans la nature, les puits de cette catégorie se rencontrent fréquemment dans les régions dont le sous-sol renferme des huiles ; suivant les cas, ils peuvent fournir du pétrole, des gaz ou de l'eau.

Il est clair que le débit des puits de cette espèce est sujet à diminuer lorsqu'une certaine quantité de gaz s'est échappée, à moins que ce dernier ne se renouvelle d'une façon continue, ce qui est assez rare.

Bien que, à proprement parler, ces puits n'appartiennent pas au

genre de ceux dont nous nous sommes occupés précédemment, ils ont cependant avec eux certains rapports. En effet, les eaux qui circulent dans les profondeurs du sous-sol contiennent généralement une plus ou moins grande quantité d'acide carbonique ou d'autres gaz. Lorsqu'on crée une issue au mélange fluide ainsi formé, une certaine force expansive des gaz se développe et facilite l'ascension des liquides. Si ces gaz viennent à diminuer, le jet artésien lui-même perd de son importance. Néanmoins l'effet produit par les gaz n'est que passager.

2° *Réduction du débit par suite des variations de température de l'eau.* — Une diminution dans le débit du puits peut résulter des variations de température que subit l'eau. Pénétrant dans le sol à la température de la région où elle tombe, l'eau s'échauffe de plus en plus et sort toujours du puits artésien à une température plus élevée de plusieurs degrés que la température de la région. Cette augmentation de température, en rendant la colonne plus légère, favorise le mouvement de l'eau.

3° *Diminution par l'augmentation de l'écoulement latéral.* — Nous avons parlé de la tendance de l'eau à s'échapper à travers les couches supérieures perméables que le forage peut traverser. Il appartient naturellement au sondeur d'empêcher ce fait en descendant des tubes au-dessous de la place où cette couche est traversée ; mais, comme le tubage coûte cher, on ne fait ce travail que jusqu'au point strictement nécessaire. Or, plusieurs couches considérées comme imperméables, permettent un faible écoulement latéral ; c'est ce qu'on remarque pour plusieurs de nos calcaires, par exemple. L'écoulement latéral que ces couches permettent peut être d'abord imperceptible, mais, sous la haute pression, de petits filets d'eau peuvent trouver une issue dans les interstices de la roche et peu à peu, par leur action mécanique et chimique, augmenter les dimensions de ces canaux de façon à déterminer une diminution sensible du débit. Dans plusieurs cas, il y a des centaines de pieds de calcaire qui peuvent être décomposés de cette façon.

D'ailleurs, puisque la poche à graines n'occupe que deux ou trois pieds dans le forage, l'eau, en exerçant sa pression de bas en haut, peut se frayer un chemin autour de cette poche par des passages capillaires d'abord, et augmenter petit à petit les dimensions de ce passage. Il est évident que ces deux causes de diminution du débit peuvent être évitées en descendant le tube et la poche à un niveau inférieur.

4° *Diminution par la fermeture du trou de forage* — C'est un fait bien connu que, sous la grande pression des couches qui les surmontent, les roches stratifiées peuvent glisser vers les ouvertures

pratiquées artificiellement. Une ouverture comme celle d'un puits, avec ses parois concaves et remplies d'une colonne d'eau à une pression égale au tiers ou à la moitié de celle de la roche qui l'encaisse, n'équilibre pas cette action. Quelques couchés sont molles et plastiques comme l'argile et les schistes argileux, tandis que d'autres sont mobiles comme le sable et les grès tendres. Des couches de cette nature, où la pression à de grandes profondeurs est considérable, peuvent combler le trou de sonde. Naturellement, le frottement s'opposant au mouvement de l'eau, est augmenté par l'obstruction et tend à diminuer le débit. On peut remédier à un tel accident à l'aide d'une tarière. L'obstruction peut encore être occasionnée par l'accumulation de sables et d'autres matières fines amenées par le courant.

5° *Diminution par suite du défaut dans le tubage.* — Les défauts dans le tubage et dans la place du bourrage peuvent favoriser la diminution du débit. Les tubes en fer se rouillent vite, surtout s'il y a des matières acides dans l'eau. Si la diminution arrive en peu d'années et augmente rapidement, ces défauts doivent en être la cause.

6° *Diminution par suite d'épuisement de la nappe aquifère.* — L'idée trop répandue qu'un réservoir souterrain, quand il a été rencontré par un puits, l'alimente pendant quelque temps, et s'épuise ensuite, peut être facilement réfutée. Un pareil réservoir ne pourra, en vertu des lois hydrostatiques, modifier son état de repos à l'intérieur du sol et parvenir à la surface de celui-ci uniquement par le fait qu'on lui a donné une issue. Si l'eau de ce réservoir communique avec une nappe dont l'origine est à un niveau supérieur, elle peut être soumise à une pression suffisante pour parvenir à la surface et le réservoir ne verra pas son niveau s'abaisser. On peut concevoir que l'effondrement des parois du réservoir seul forcerait l'eau à l'évacuer et donnerait une violente pression. Je ne puis imaginer que cette éventualité pour expliquer la violence du courant pendant un temps très court, suivi d'un ralentissement brusque de celui-ci.

Ce phénomène n'a rien de commun avec celui que l'on observe quand le débit d'une nappe artésienne diminue. Dans ce cas, la diminution du débit ne provient pas du réservoir que l'on s'imagine exister sous le puits, mais bien de l'affleurement supérieur de la couche perméable. Si les précipitations atmosphériques ne sont pas abondantes et si la nappe aquifère n'est pas constamment alimentée, elle disparaîtra graduellement et, par suite, la pression diminuera de plus en plus, ainsi que le courant artésien. L'importance d'un tel courant variera avec la quantité de pluie qui tombe sur la zone perméable et se renouvellera avec le retour de la saison pluvieuse. Une diminu-

tion suivie d'un arrêt persistant de débit indique d'autres causes. Due au manque de précipitations à l'origine de la nappe, la diminution de débit est sans remèdes.

7° *Découverte de la cause de diminution du débit.* — Il résulte de ce qui précède que la manière dont la diminution du débit se produit peut en indiquer la cause. Si on l'attribue à la raréfaction des gaz emmagasinés dans le sol, elle se produira rapidement pendant un certain temps, puis graduellement, suivant que la quantité des gaz aura diminué. Si la dilatation des pores capillaires en est la cause, la diminution commencera tard, augmentera graduellement et le puits finira probablement par tarir complètement.

Si elle provient de la rouille des tubes ou d'une détérioration du tubage, elle ne se fera pas trop sentir d'abord, mais se produira rapidement jusqu'à ce que finalement le jet artésien cesse complètement de se produire. Si elle est amenée par l'obstruction du trou de forage, provenant du glissement des couches ou du remplissage du trou de forage, elle sera lente au début, mais si elle est due à un éboulement, elle sera soudaine. Si elle a pour cause l'épuisement de la nappe, on verra le débit décroître graduellement, et le jet reprendra son importance chaque fois que la pluie sera abondante.

CHAPITRE XVIII

Limites en profondeur.

La vitalité d'une notion fausse est souvent surprenante. Un exemple frappant se trouve très répandu dans la croyance populaire que l'on peut toujours trouver de l'eau en abondance quand on creuse assez profondément le sous-sol. Si nous considérons que la pluie est la source principale de notre alimentation en eau et que les couches deviennent plus compactes avec la profondeur, il semble qu'il y ait lieu d'avoir une opinion contraire. Cela provient de ce que le plus souvent les couches superficielles sont plus ou moins sèches et qu'il est nécessaire de descendre à quelque profondeur pour rencontrer la nappe aquifère. Mais on ne doit pas croire qu'une fois cette nappe atteinte on ait trouvé la zone aquifère la plus abondante. Les couches aquifères deviennent plus compactes en général et peuvent moins facilement recevoir de l'eau. Si nous écartions, en imagination, les couches superficielles relativement sèches, le reste de la terre pourrait être envisagé comme contenant une grande quantité d'eau dans la partie supérieure perméable et en renfermant de moins en moins dans les couches sous-jacentes, parce que celles-ci deviennent de moins

en moins aptes à en contenir. Naturellement, ce n'est pas une loi générale, elle est même sujette à beaucoup de modifications suivant la nature des diverses roches.

Eu égard à cette considération, c'est une folie de forer des puits profonds sans être certain que l'on rencontrera une couche perméable présentant les conditions requises pour obtenir de bons résultats. La chance peut favoriser quelquefois l'ignorance et faire découvrir de l'eau; mais combien de fois le sol a-t-il été percé sans aucun résultat? Avant de faire un forage, une connaissance complète des couches du sous-sol est nécessaire; si cette connaissance peut être obtenue par la méthode des recherches géologiques habituelles, la profondeur du puits sera limitée à celle qui est nécessaire pour atteindre la couche donnant le débit maximum.

Il y a des régions dans lesquelles l'existence d'un puits artésien est si nécessaire qu'on peut, même sans connaissance spéciale du sous-sol, entreprendre un forage, tant il est important d'obtenir un résultat favorable; toutefois on aura soin de considérer préalablement combien le résultat de l'entreprise est incertaine et à quelles dépenses inutiles elle peut entraîner.

L'insuccès aura cependant cette utilité, c'est qu'il nous fera connaître que, dans certaines régions, la succession des couches est si variée, qu'on ne peut leur appliquer la méthode généralement établie pour les recherches. Il y a cependant un principe dont l'application fréquente épargnera bien des dépenses inutiles.

Les roches précambriennes, comme nous l'avons fait observer, ne peuvent donner en Amérique de résultats et ne recouvrent pas de couches renfermant une nappe aquifère. Pour ce motif si, pendant le sondage, ces couches sont atteintes, le travail doit cesser, à moins que des circonstances locales spéciales ne militent en faveur d'une exception à la règle. Une condition concernant cette particularité devrait être insérée dans les contrats, puisque c'est l'intérêt des deux parties. Le sondage est, en effet, dans ce cas très difficile et peu rémunérateur au taux ordinaire où on l'entrepren, surtout qu'il n'y a pas la perspective d'obtenir un bon résultat. Il n'est pas suffisant dans ce contrat d'employer le terme *granit* au lieu de roches pré-cambriennes comme cela se fait quelquefois, puisque les quartzites et les autres roches cristallines non comprises dans la désignation de granit, font néanmoins partie de la série précambrienne, dont le forage est sans profit et pour le propriétaire et pour le sondeur.

CHAPITRE XIX

L'art de sonder.

Ce n'est pas dans un article d'un cadre aussi restreint qu'on peut entreprendre un examen détaillé de l'art du sondeur, des difficultés que l'on peut rencontrer et des moyens ingénieux par lesquels on peut les vaincre, mais un aperçu général ne sera pas sans intérêt; il ouvrira la voie à d'autres sujets dont l'examen s'impose.

1^o *Supériorité des méthodes employées dans les régions pétrolifères.* — Les travaux de sondage entrepris pour la recherche des huiles minérales ont eu une grande influence sur l'art du sondeur. Les innombrables difficultés pratiques que l'on a rencontrées dans ces travaux, ont été en grande partie surmontées et l'enfoncement d'un puits à 1000 à 2000 pieds de profondeur est actuellement un fait de la pratique journalière. C'est dans les régions pétrolifères que les sondeurs ont l'occasion de montrer les plus beaux exemples de leur adresse. Pour avoir un exposé convenable de ces travaux et de leurs développements considérables, je ne puis mieux faire que renvoyer au rapport de J. Carl au sujet des régions pétrolifères de la Pensylvanie. Les instruments employés pour les sondages des puits artésiens ordinaires sont, avec de légères modifications, adoptés dans ces régions pétrolifères.

2^o *Emploi de la sonde diamant.* — Cette sonde se compose d'un tube en fer armé à sa partie inférieure de diamants tranchants et placés de manière à couper la roche par leur mouvement de rotation et à y laisser un noyau cylindrique au centre. Un courant d'eau, amené dans l'intérieur du tube, rejette à l'extérieur les fragments produits par le foret.

Les géologues l'emploieront avec fruit parce que le noyau donne une section complète, avec orientation, des roches traversées.

3^o *Enfoncement du puits.* — Pour forer des puits dans des couches non consolidées, on emploie des instruments moins compliqués et moins chers. L'instrument consiste alors en un tube terminé par une pointe conique; une section de tube étant évidée, on l'enfonce dans la terre à coups de maillet ou de la même façon que l'on procède pour les pilotis, jusqu'à ce que la section évidée touche la couche poreuse. L'eau peut apparaître alors à l'intérieur du tube et s'élève jusqu'à la surface. Ce moyen ne peut s'appliquer qu'aux couches ne présentant pas d'obstacles sérieux à la pénétration. Si quelque obstacle survient

il est aisé, dans une opération aussi simple, de retirer le tube et de recommencer.

4° *Tarières*. — L'emploi des tarières permet de creuser un puits de grandes dimensions, promptement et à bon marché.

5° *Prix des puits*. — La dépense d'un sondage varie avec le caractère des roches, leur profondeur et le coût de la main d'œuvre dans la région où l'on opère. Autant qu'il est à ma connaissance, on n'en change pas le taux pour les différentes espèces de roches sédimentaires, grès, calcaires et schistes. Mais, lorsqu'il s'agit de traverser du granit ou d'autres roches cristallines, le taux est augmenté en conséquence.

Essayer de distinguer entre les calcaires, les grès et les schistes, créerait des difficultés sans fin, puisque les couches passent du calcaire aux autres espèces de roches. Les sondeurs, familiarisés avec la nature des couches de la région, demandent un prix moyen, selon la profondeur à atteindre. On peut avoir une idée approximative de la dépense en comptant de 2 à 3 dollars par pied jusqu'à 1000 pieds et une augmentation d'un 1/2 dollar par pied en plus. A cela il faut ajouter le prix du tubage, qui peut changer avec la situation et la nature de la couche.

CHAPITRE XXI

Rapports des sondeurs.

Les entrepreneurs doivent, au cours des opérations de sondage, dans l'intérêt de la science et de la pratique, tenir un mémoire détaillé des couches rencontrées. Le mémoire ne doit pas relater seulement les épaisseurs des couches, et leur constitution, mais il est nécessaire de conserver des échantillons, qui fournissent des renseignements relatifs à leurs qualités aquifères. Ces divers éléments, qui pourraient paraître sans importance, ont souvent une grande signification quand ils sont interprétés avec soin. Si la sonde-diamant est employée, les carottes fournissent d'elles-mêmes un excellent rapport, si elles sont placées dans leur ordre d'extraction et régulièrement numérotées. Comme les parties meubles sont sujettes à se briser il est nécessaire, lors du forage, de faire des mesurages.

D'après ce qui a été dit, l'importance de savoir où placer la garniture permanente du tube est évidente. Par économie autant que par prudence, elle doit l'être aussi près que possible de la surface, non seulement pour restreindre la dépense du tube, mais aussi pour arriver à réduire les dimensions du trou de forage occasionné par l'introduction

du tube, et diminuer par conséquent l'augmentation du frottement. En même temps, il est nécessaire d'intercepter tous les écoulements latéraux, afin d'obtenir le plus tôt possible un jet artésien. Une connaissance parfaite des couches traversées est le seul moyen efficace d'atteindre ce but. Dès que le tubage accuse quelque défectuosité, en tenir note avec exactitude est un guide précieux pour découvrir la nature et la cause du défaut dont on constate l'effet, et ces renseignements permettent de trouver les moyens d'y porter remède. Aussi les particuliers qui font pratiquer des puits artésiens devront insister sur la nécessité de dresser un mémoire écrit de ce travail ; ils agiront même sagement en l'annexant à leur titre de propriété. Lorsqu'on a recours aux explosifs pour le travail de sondage, il est important d'apprécier les profondeurs auxquelles ces engins seront employés le plus efficacement. C'est ce que feront encore le mieux connaître les mémoires écrits relatifs aux puits pratiqués précédemment dans la même région.

Interprétation des résultats du sondage. — L'inexpérience peut créer certains embarras lorsqu'il s'agit, d'après l'inspection des échantillons recueillis, d'établir la coupe géologique du forage. Le sondeur prudent interprétera les résultats au fur et à mesure de l'avancement du travail ; il importe qu'il ait prévu, dans son contrat d'entreprise, la rencontre d'une couche granitique ou autre, ce qui laisserait peu d'espoir d'atteindre finalement le but poursuivi. En présence de pareille éventualité défavorable, l'intervention d'un géologue déterminera s'il y a lieu de continuer les recherches.

On conçoit combien il est indispensable que les échantillons extraits représentent fidèlement la succession des couches traversées ; sous ce rapport il faudra surtout bien discerner les éléments minéralogiques, correspondant effectivement à la position réelle des roches, de ceux qui pourraient provenir de débris ou éclats précipités au fond du puits par le fait du travail même. Les fragments de roches de quelque dimension présenteront évidemment un caractère de garantie plus sérieux.

Utilité des cartes géologiques et influence du relief du sol. — Les données de la géologie déterminent la série stratigraphique des terrains, de manière à en déduire des probabilités concernant les forages projetés. Dans ce but, il est d'une importance primordiale de consulter ou de dresser une carte géologique de la zone où l'on établit le puits ; la grande utilité d'un pareil document n'est pas discutable.

Les services éminents que peuvent d'ailleurs rendre les cartes géologiques sont d'un ordre multiple ; il est vivement à désirer qu'un travail de l'espèce soit exécuté dans tous les pays. Pour en justifier le but utilitaire, il faut que ces cartes reposent sur des données précises, sur

des observations de faits existants, afin de présenter un intérêt local sérieux, appréciable; il faut, en outre, qu'elles soient établies à une échelle convenable pour en rendre la lecture facile et pour que l'on puisse y donner une représentation détaillée des terrains.

Les considérations que nous avons émises dans le cours de cette étude nous permettent de conclure que les chances de succès sont, en général, les plus grandes dans les régions basses, douteuses pour les terrains d'altitude moyenne, et nulles pour ceux d'un relief prononcé. Il convient donc de se livrer, préalablement à tout forage de puits artésien, à une étude géologique approfondie de la zone où l'on se propose d'opérer.

ÉNUMÉRATION DES FIGURES

	PAGES.	
Fig. 1.	Coupe d'un courant montrant des courants partiels ascendants malgré le mouvement général du cours d'eau	5
Fig. 2.	Profil du courant artésien de Chicago	5
Fig. 3.	Coupe idéale montrant les conditions essentielles d'établissement des puits artésiens	5
Fig. 4.	Coupe montrant une couche aquifère en biseau, comprise entre deux couches imperméables	6
Fig. 5.	Coupe montrant le passage souterrain, à l'état de dépôt imperméable, d'une couche aquifère	6
Fig. 6.	Coupe montrant les allures et les zones d'affleurement des couches successivement perméables et imperméables d'un bassin aquifère	11
Fig. 7.	Coupe montrant la manière dont peuvent s'établir, dans les régions d'affleurement, des communications entre des couches aquifères, séparées par des dépôts insuffisamment perméables.	12
Fig. 8.	Coupe montrant la manière dont peuvent s'établir, dans les régions profondes, des communications entre des couches aquifères, séparées par des dépôts insuffisamment perméables.	12
Fig. 9.	Coupe montrant l'influence favorable sur le débit d'un puits artésien, d'une nappe phréatique élevée, située entre l'origine de la nappe artésienne et le puits.	14
Fig. 10.	La même disposition, mise en regard de l'influence défavorable d'une nappe phréatique de basse altitude entre l'origine de la nappe artésienne et le puits	14
Fig. 11.	Coupe montrant les conditions dans lesquelles une nappe artésienne peut fournir un jaillissement, malgré la présence d'affleurement de plus bas niveau dans la couche aquifère correspondante	16
Fig. 12.	Coupe montrant l'effet de l'épaisseur et de l'inclinaison des couches formant le sous-sol de la région d'infiltration	19
Fig. 13.	Coupe montrant l'effet ordinaire de l'érosion de la surface d'une couche poreuse et le contour du bassin qui en résulte	19
Fig. 14.	Coupe montrant les avantages d'une inclinaison faible de la couche aquifère	20
Fig. 15 et 16.	Dispositions désavantageuses de puits s'alimentant à une même nappe artésienne	30
Fig. 17 et 18.	Dispositions avantageuses de puits s'alimentant à une même nappe artésienne	31
Fig. 19.	Dispositif dit de la « poche à semences » utilisé pour isoler et apprécier une venue d'eau dans le forage	32
Fig. 20 et 21.	Autre dispositif fourni par le gonflement sous pression de rondelles en caoutchouc	33
Fig. 22.	Coupe montrant les conditions d'un essai négatif ou faux dans la recherche des venues d'alimentation d'un puits artésien	34
Fig. 23.	Coupe montrant les conditions d'un essai imparfait	35
Fig. 24.	Coupe montrant les conditions d'un essai amenant une intervention de résultats	36
Fig. 25.	Diagramme montrant trois coupes de puits ayant fourni, pour la recherche des veines liquides d'alimentation, un essai correct et deux essais avec résultats non conformes aux réalités	36

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES.
INTRODUCTION.	3
CHAP. I. Caractères essentiels des puits artésiens	6
CHAP. II. Les couches aquifères : 1° roches fissurées, présentant des cavités; 2° roches cristallines; 3° roches calcaires; 4° roches poreuses	7
CHAP. III. Couches enveloppes des eaux artésiennes : 1° couche inférieure; 2° couche supérieure	10
CHAP. IV. Inclinaison des couches. — Altitude de l'affleurement de la couche perméable	15
CHAP. V. Le réservoir ou origine de la source.	17
CHAP. VI. Zone d'infiltration des eaux artésiennes. — Effet de l'érosion et de la configuration topographique	19
CHAP. VII. Avantages du peu d'inclinaison de la couche perméable	20
CHAP. VIII. Conditions relatives à l'affleurement de la même	21
CHAP. IX. Précipitations atmosphériques. — Contraste existant entre l'offre et la demande d'eau	22
CHAP. X. Irrigations à l'aide de puits artésiens : 1° répartition du débit; 2° réservoirs supplémentaires; 3° transports avantageux; 4° réutilisation de l'eau	23
CHAP. XI. Relations entre la quantité de pluie mesurée et la capacité de la couche perméable	25
CHAP. XII. Fuite de l'eau à un niveau inférieur à celui du puits	28
CHAP. XIII. Conditions particulières relatives au débit d'un puits artésien. — Moyens d'accroître le débit : a) explosifs; b) augmentation du diamètre du puits; c) comparaison entre l'emploi d'un seul puits de grand diamètre ou de plusieurs puits de dimension moindre; d) répartition des puits	28
CHAP. XIV. Déperdition de l'eau dans les puits : 1° frottement; 2° écoulement latéral; 3° captation du courant	31
CHAP. XV. Hauteur du jet artésien : a) sa mesure; b) prévisions relatives à sa hauteur	33
CHAP. XVI. Découverte du courant. — Preuves erronées	34
CHAP. XVII. Influence du temps sur le courant : 1° réduction du débit par suite de la diminution des gaz contenus dans le sous-sol; 2° des variations de température de l'eau; 3° de l'augmentation de l'écoulement latéral; 4° de la fermeture du trou de forage; 5° du défaut de tubage; 6° de l'épuisement de la nappe aquifère; 7° découverte de la cause de diminution du débit	37
CHAP. XVIII. Limites en profondeur	40
CHAP. XIX. L'art de sonder	42
CHAP. XX. Rapports des sondeurs	43
ÉNUMÉRATION DES FIGURES.	46