

Recherches expérimentales sur la filtration et la pénétration de l'eau dans le sable et le limon.

(*Annales de la Société géologique de Belgique*, t. XXIX, Mémoires, 1902, p. 17).

J'ai montré, dans un travail précédent (*), que l'argile ne s'imprègne d'eau que si elle peut se dilater librement, de même qu'un corps soluble ne se dissout totalement, au contact de l'eau, que si rien n'entrave son expansion au sein du dissolvant. Si, au contraire, la dilatation de l'argile est empêchée, l'imprégnation se trouve arrêtée. On peut même dire qu'elle serait absolument annulée s'il était possible de réaliser, au sein de l'eau, les conditions parfaites du programme des expériences.

Des essais faits, alors, avec du limon de la Hesbaye, avaient montré que cette terre, même damée à refus, présentait *plus de vides* que la terre d'Andenne qui m'avait servi dans mes expériences et conduisait, par conséquent, à un résultat moins démonstratif sous le rapport de l'imprégnation. Il restait à constater, par l'expérience, « le rôle que jouent ces vides dans la pénétration de l'eau ».

J'ai l'honneur de présenter, aujourd'hui, à la *Société géologique*, le complément annoncé de mon travail.

* * *

La question dont je me suis occupé est, par sa nature même, connexe de celle de la filtration de l'eau à travers des terres et des sables. Celle-ci a déjà fait l'objet d'études nombreuses et approfon-

(*) *Annales de la Société géologique de Belgique*, t. XXVIII, p. 117, 1901.

dies, en raison de l'importance qu'elle présente, tant au point de vue de l'hygiène qu'à celui de l'industrie.

Les résultats ont été condensés, surtout, dans le livre de M. Allen Hazen, *The filtration of public water-supplies*, New-York, 1900; et dans le grand ouvrage de M. Otto Lueger, *Die Wasserversorgung der Städte*, Stuttgart (*), qui donne la bibliographie détaillée des travaux parus sur la matière.

Il n'entre pas dans le cadre de cette note de faire, même en résumé, l'histoire des connaissances qu'on a aujourd'hui sur ce sujet : ce serait là l'objet d'une *monographie*, mais non celui d'un article qui, comme celui-ci, n'a d'autre but que d'appeler l'attention sur quelques observations recueillies en dehors des conditions qui paraissent avoir fixé plus particulièrement l'attention jusqu'à présent. Il convient aussi de ne pas perdre de vue que le point de départ des recherches actuelles s'est trouvé, surtout, dans la question de savoir de quelle façon a lieu la pénétration des eaux météoriques dans les profondeurs du sol. Telle avait déjà été l'origine de l'article dans lequel j'ai montré que l'argile ne se laisse pénétrer d'eau que si elle peut augmenter de volume. On le sait, cette pénétration des eaux météoriques dans le sol, comme seule cause des sources et des fontaines, a été mise en doute par plus d'un observateur; j'ajouterai même qu'elle a été catégoriquement niée par plusieurs. On a cherché, nécessairement, une autre voie à l'eau que celle de l'infiltration, pour alimenter les nappes souterraines et l'on a cru la trouver dans la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Cette indication, qui est due surtout à M. Worré, paraît goûtée des géologues, et des meilleurs, notamment de notre savant compatriote M. E. Van den Broeck, qui l'a exposée et commentée il n'y a pas longtemps (**). Si je fais allusion à cette théorie nouvelle, ce n'est pas pour la discuter, mais pour montrer combien les observations et les expériences faites sur la pénétration de l'eau dans les terres ont fortifié cette opinion que les chutes météoriques ne gagnent pas la profon-

(*) Je dois la connaissance de ces ouvrages spéciaux à l'obligeance de M. A. Kemna, le savant directeur de l'*Antwerp Water Works Co*; je suis heureux de lui réitérer mes remerciements pour le service qu'il a bien voulu me rendre.

(**) *Bulletin de la Société belge de Géologie*, t. X, pp. 95-110, 1896.

deur ou, tout au moins, qu'elles y pénètrent en quantité insuffisante pour expliquer le débit des fontaines.

On lira avec intérêt, à cet égard, les articles que M. le lieutenant-colonel A. Doneux a publiés en 1896 (*) sur *La Pluie et les Sources*, dans lesquels il fait connaître de nombreuses observations et des considérations judicieuses qui établiraient, d'après lui, que la pluie ne pénètre dans le sol qu'à une profondeur sans importance. L'auteur cite aussi une expérience qu'il a faite en vue de contrôler ses conclusions. Il a rempli un tuyau en grès vernissé, de 12 centimètres de diamètre et de 85 centimètres de hauteur, d'un mélange de terre de jardin et d'argile venant d'une fouille de briqueterie, préalablement séché au soleil, puis il a versé, à la partie supérieure, jusque 2 litres d'eau, ce qui équivalait à une couche liquide de 176 millimètres de hauteur. La terre devint humide, mais pas assez pour laisser suinter de l'eau dans un plateau sur lequel le tuyau avait été placé. « Or, dit » l'auteur, jamais il ne tombe en Belgique une quantité d'eau comparable à 155 millimètres, donc jamais l'eau de pluie ne pénétrera » dans les terres à la profondeur d'un mètre. »

Les expériences que je désire faire connaître ont donc pour objet de vérifier le degré de perméabilité des terres et de reconnaître si des facteurs spéciaux interviennent dans la descente de l'eau, soit pour la faciliter, soit pour l'enrayer.

Pour procéder du simple au compliqué, j'ai examiné d'abord le passage de l'eau à travers du sable ordinaire, puis à travers du limon *maigre* et enfin à travers du limon *gras*, arrivant, de la sorte, de nouveau à l'argile. L'exposé des expériences suivra, naturellement, le même ordre.

PASSAGE DE L'EAU A TRAVERS LE SABLE.

Dans les expériences qui ont été faites jusqu'à ce jour sur la filtration de l'eau à travers le sable, le filtre se trouvait disposé verticalement. L'eau était, de la sorte, inévitablement sollicitée à descendre, par une force non constante, mais croissante de couche en couche. Dans le cas de l'emploi de filtres de faible épaisseur, ce défaut de constance de la force motrice peut ne pas se marquer, mais il doit

(*) *Cosmos*, nos 602, 603, 604, 622, 623, 624.

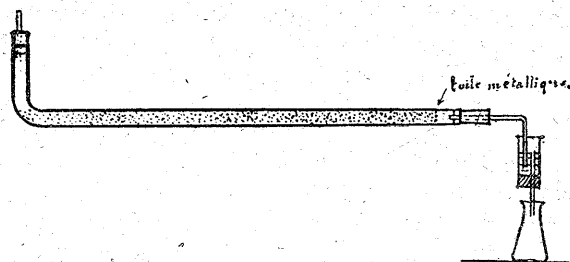
en être autrement quand les filtres ont plusieurs mètres de hauteur. Quoi qu'il en soit, il était utile de se renseigner sur la valeur de ce facteur. J'ai donc disposé d'abord les filtres *horizontalement* et mesuré, dans ces conditions, comment variait le débit avec l'épaisseur du filtre, ou la hauteur motrice de l'eau, puis j'ai opéré à l'aide de *filtres verticaux*.

Filtres horizontaux. — Les filtres ont été faits au moyen de sable lavé à l'acide chlorhydrique, contenu dans des tubes en verre de 2 centimètres de diamètre intérieur, portant à l'une de leurs extrémités une fine toile métallique destinée à retenir le sable, puis un petit tube, plus étroit, courbé à angle droit, qui livrait passage à l'eau. L'autre extrémité du tube large était courbée à angle droit et communiquait, par un tube en caoutchouc, avec le réservoir à niveau constant.

Des expériences préparatoires ont montré que si l'on remplissait, d'abord, le tube de sable sec, pour faire arriver l'eau ensuite, le débit était irrégulier et ne permettait aucune conclusion certaine. C'est que l'air emprisonné dans le sable ne se trouvait pas complètement chassé par l'eau et interceptait la colonne d'eau d'une manière irrégulière. Pour se placer dans de bonnes conditions, il faut délayer, au préalable, le sable dans de l'eau bouillante, donc privée d'air, et introduire cette boue de sable, après refroidissement suffisant, dans le tube, en veillant à ce que celui-ci reste toujours plein d'eau. Quand le tube n'est pas en service il doit être maintenu bouché. On remarquera, toutefois, qu'un filtre, ainsi préparé, ne donne des résultats comparables que pendant un certain temps. Il n'est guère possible, en effet, de faire usage, pendant la filtration, d'eau entièrement privée de gaz; aussi voit-on apparaître bientôt des bulles d'air dans le tube, sur les angles des grains de sable et tout est à recommencer.

L'eau débitée par le filtre, dans l'unité de temps, a été pesée au centigramme près, et non mesurée en volume. L'expérience a montré, ici, que si on laisse écouler l'eau à l'air, en gouttes libres, du tube de dégagement du filtre, le débit était diminué. La tension superficielle de l'eau est, en effet, une force qui, s'opposant à la formation des gouttes, crée un obstacle à la circulation du liquide. Pour éliminer cette cause d'erreur, l'orifice du tube de dégagement

du filtre a été noyé dans un appareil à niveau constant, ainsi que le fait voir la figure ci-dessous, pour se rendre de là dans le vase récepteur.



Cinq tubes de longueurs différentes ont été ainsi préparés et placés à côté l'un de l'autre, pour fonctionner en même temps. Les vases récepteurs étaient placés sur une même planchette de façon à pouvoir être présentés au même instant aux filtres et retirés de même après le temps voulu.

Le tableau suivant reproduit les valeurs moyennes obtenues dans une première série d'expériences qui ont eu lieu à basse pression, c'est-à-dire sous une charge de 0^m182 d'eau.

| Longueur des filtres : l. | Grammes d'eau débités en 10' : q. | Différences des vitesses. | Produits : l q. |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------|
| 0 ^m 090 | 9.83 | — | 0.885 |
| 0 ^m 178 | 7.28 | 2.55 | 1.296 |
| 0 ^m 420 | 5.06 | 2.22 | 2.125 |
| 0 ^m 890 | 2.84 | 2.22 | 2.530 |
| 1 ^m 960 | 1.33 | 1.51 | 2.606 |

On le voit, si la vitesse de filtration diminue d'abord quand l'épaisseur du filtre augmente, ce n'est en aucune façon *en raison inverse de cette épaisseur*; cela ressort, avec évidence, des valeurs des produits *ql* qui, au lieu d'être égaux, sont forts différents. L'un des résultats généraux obtenus, mentionnés par les auteurs qui ont employé des filtres verticaux (*), ne se vérifie donc pas dans les conditions actuelles.

(*) Voir P. HAVREZ *Recherches sur la filtration* (REVUE UNIVERSELLE DES MINES, t. 35, pp. 470 et suiv., 1874).

Toutefois, on remarquera que si le filtre est d'une certaine longueur, un accroissement ultérieur (son dédoublement) a de moins en moins d'influence sur la diminution du débit. C'est ce qui ressort des derniers nombres de la troisième colonne.

On constatera ensuite qu'au début, c'est-à-dire avec les filtres courts, le débit diminue moins vite que l'augmentation de l'épaisseur du filtre. On peut dire, très approximativement, qu'alors les débits diminuent *en raison arithmétique* alors que les longueurs du filtre grandissent *en raison géométrique*.

En d'autres termes, la résistance opposée par le filtre à la circulation de l'eau, se marque davantage dans un filtre peu épais. En effet, en portant l'épaisseur d'un filtre de 0^m090 à 0^m178, la différence des vitesses donne 2^{sr}55 en 10', tandis qu'en portant l'épaisseur d'un filtre de 0^m890 à 1^m960, la différence de débit n'a comporté que 1^{sr}51 dans le même temps.

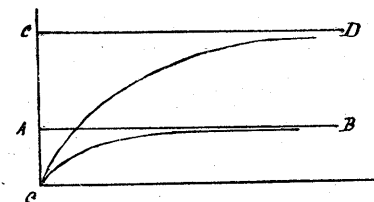
La cause de ce fait peut se trouver, entre autres, dans cette circonstance que le frottement de l'eau contre les grains de sable du filtre est, toutes choses égales, proportionnellement plus fort quand la circulation est rapide que quand elle est ralentie.

La formule de Poiseuille

$$Q = N \frac{SD^4}{L} \quad \begin{array}{l} N = \text{constante} \\ S = \text{pression} \end{array}$$

qui donne l'écoulement d'un liquide à travers les tubes capillaires n'est donc pas confirmée ici. La quantité d'eau débitée par le filtre n'est aucunement en raison inverse de la longueur du filtre.

Si l'on relève, graphiquement, les produits *ql*, on obtient une courbe de la forme ci-contre, qui paraît asymptotique à une



droite AB distante de l'axe des X d'une quantité AO donnée pour le produit *lq* maximum et qui représenterait, pour la pression donnée, la valeur déduite de la formule de Poiseuille $QL = NSD^4$.

Il était donc utile de faire varier la pression, surtout de l'augmenter, pour s'assurer si la rapidité avec laquelle diminue le débit du filtre quand on augmente son épaisseur, est en rapport avec cette pression.

J'ai donc repris les mesures, en portant la charge d'eau à une hauteur suffisante, 2^m70, pour que les résultats s'accusent bien. Rien n'a été changé, d'ailleurs, aux autres dispositions de l'appareil.

Le tableau suivant contient, par conséquent, dans sa première colonne, les mêmes épaisseurs de sable que le précédent, ce qui facilite la comparaison.

| Longueur des filtres : l. | Grammes d'eau débités en 10' : g. | Différences des débits. | Produits : q l. |
|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 0 ^m 090 | 183.23 | — | 16.49 |
| 0 ^m 178 | 107.07 | 76.16 | 19.06 |
| 0 ^m 420 | 51.55 | 55.52 | 21.65 |
| 0 ^m 890 | 26.80 | 24.75 | 23.85 |
| 1 ^m 960 | 13.10 | 13.70 | 25.67 |

Ce tableau montre, plus évidemment encore, que le débit des filtres n'est pas en raison inverse de leur épaisseur. Un espace de sable quelconque ne peut être assimilé à un faisceau de tubes capillaires en ce qui concerne la circulation de l'eau. La vitesse de la filtration diminue d'abord dans une proportion énorme, sous cette pression initiale de 2^m70, puis, à mesure que l'épaisseur du sable est déjà plus grande, l'effet d'une augmentation devient de moins en moins sensible. La courbe des produits *ql* est de même figure que celle qui correspond à la pression initiale de 0^m182; mais elle est beaucoup plus escarpée; c'est ce que montre la figure précédente de O en D. Cette courbe paraît aussi être asymptotique à une droite CD parallèle à l'axe des épaisseurs. Il est évident que si l'épaisseur du filtre augmentait indéfiniment, on pourrait toujours trouver un lieu où le débit de l'eau serait ralenti au point d'égaliser celui qui s'établit, plus tôt, sous une pression initiale plus faible. Il est facile de s'assurer par un graphique basé sur les données recueillies ci-dessus, qu'un filtre de sable d'environ quatre mètres d'épaisseur aurait, sous la pression initiale de 2^m70, un débit égal à un autre filtre de 1^m96, mais travaillant sous une charge de 0^m182. En un mot, l'effet des

différences de pression initiale, dans des filtres de sable horizontaux, s'éteint bientôt; l'eau continue à cheminer, lentement, comme si elle était affranchie de la pression.

Il semble qu'on se trouve alors plutôt en présence d'un phénomène d'imprégnation du sable, ou d'un phénomène d'imbibition, que d'une circulation de l'eau par poussée. La pression n'intervient, pour ainsi dire, que pour déterminer l'écoulement, ou pour vaincre l'adhérence du liquide au sable.

Passons, à présent, au cas où le filtre, au lieu d'être *horizontal* est *vertical*. Nous aurons à compter, cette fois, avec le *poids* de la colonne d'eau, c'est-à-dire avec une *traction* plutôt qu'une *pression* et nous allons voir les effets perturbateurs que ce changement entraîne à sa suite.

Filtres verticaux. — Disposition des filtres. — Le sable constituant les filtres était enfermé, comme dans le cas précédent, dans des tubes en verre de diverses longueurs mais du même diamètre de 2 centimètres. Pour soutenir le sable dans les tubes, j'avais fixé à leur extrémité inférieure, au moyen de gomme-laque, une douille dont le fond était formé d'une toile métallique.

Par-dessus cette toile se trouvait un faible tampon d'ouate et sur celui-ci reposait le sable. Des expériences préalables ont fait voir que la résistance opposée au passage de l'eau par le tampon d'ouate et la toile métallique était absolument négligeable relativement à celle que créait le sable, même sous l'épaisseur la plus faible mise en service.

J'ai construit de la sorte, huit tubes-filtres. Ils ont été placés parallèlement, pour fonctionner en même temps, aux diverses pressions, afin de n'avoir pas de corrections à faire relativement à la température.

Les tubes ont été chargés de sable en y versant, comme dans le cas des tubes horizontaux, une *boue de sable* faite au moyen d'eau bouillante.

L'égalité de charge d'eau, au-dessus du sable des filtres, était assurée par ce que les tubes étaient raccordés au fond horizontal d'une même boîte métallique fermée, reliée par un tube en caoutchouc, à un appareil à niveau constant qu'on pouvait élever jusqu'à une hauteur de 3^m50.

La détermination du débit des filtres a eu lieu aussi, comme auparavant, par pesées, après 10 minutes.

Les mesures ont été répétées plusieurs fois du 25 au 29 juin dernier; la température n'a varié, dans le laboratoire, pendant ce temps, que de 25° à 26°.

Avant de reproduire les résultats obtenus, je me permettrai d'appeler l'attention sur les difficultés que présente l'opération, si simple en apparence, de la filtration de l'eau à travers le sable, quand on tient à recueillir des nombres concordants, permettant de conclure avec quelque certitude.

Des expériences préliminaires, faites au moyen de quatre tubes-filtres ayant respectivement 0^m255, 0^m645, 1^m07 et 1^m76 de hauteur de sable, ont montré, d'abord, une irrégularité complète dans le débit de l'eau, bien que rien ne parut changé dans les conditions du travail. Cette irrégularité est surtout accusée avec les filtres d'épaisseur plus faible. Par exemple le filtre de hauteur 0^m255 a donné, au début, 105^{sr}10 d'eau en 10' sous une charge de 2^m05; puis il a fonctionné de plus en plus lentement pour n'arriver à une *vitesse de régime* à peu près constante, qu'après plus de cinq heures de service. Il ne fournissait alors que 22^{sr}50 en 10' : soit donc moins que le quart du débit primitif. Les autres tubes ont donné un résultat analogue. La vitesse de filtration a été, à la fin, pour ces quatre filtres :

| | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 22 ^{sr} 30 | 18 ^{sr} 50 | 16 ^{sr} 25 | 14 ^{sr} 30 |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|

c'est-à-dire en dehors de toute proportion avec l'épaisseur du sable. Le premier filtre était environ le *huitième* du dernier en longueur et il ne donnait pas même le double d'eau de celui-ci. Il y avait, on le voit, une tendance manifeste vers une égalité de débit, indépendante de l'épaisseur du sable.

Un examen attentif des filtres fit découvrir la cause de cette anomalie. Le sable employé (sable de Rocour lavé à l'acide chlorhydrique) comprenait des grains de différents volumes, ainsi qu'un certain nombre de paillettes de mica. Eh bien, les affouillements dus au mouvement de l'eau, avaient opéré, petit à petit, un classement de ces grains. *Au-dessus* se trouvait, en majeure partie, le sable fin mêlé de mica, tandis que le gros sable s'était accumulé en bas des tubes. Cette couche de sable fin n'avait que quelques milli-

mètres d'épaisseur, mais c'était elle qui était en réalité la partie du filtre réglant la vitesse du passage de l'eau. Tout le gros sable qui se trouvait en dessous n'entrait plus en compte, parce que ses interstices étaient plus grands. Il est donc tout naturel que les vitesses de filtration tendent de plus en plus à s'égaliser malgré l'énorme différence d'épaisseur des filtres.

On remarquera que ce classement des grains de sable est absolument opposé à celui qu'on observe dans une eau courante. Ce sont alors les grains les plus fins qui se déposent les derniers, tandis que les grains les plus gros restent en chemin, plus près de l'origine du courant. C'est ce que montrent toutes les alluvions. Peut-être le fait qui vient d'être cité, n'est-il pas sans utilité pour l'explication de certains dépôts géologiques et est-il de nature à nous éclairer sur les bouleversements que présentent plus d'une formation? C'est, naturellement, aux savants compétents de décider; j'ai tenu seulement à signaler ici un résultat d'observation, en raison de l'utilité qu'il peut avoir.

Pour soumettre ce résultat à un contrôle, j'ai fait filtrer de l'eau à travers du sable de Rocour non lavé à l'acide chlorhydrique, qui contenait donc encore des composés de fer et d'alumine. La diminution de la vitesse de filtration devait se marquer d'une façon plus nette encore. En fait, la hauteur du sable dans le tube étant de 0^m45 et la hauteur de l'eau étant maintenue constamment à 0^m65 au-dessus du fond du tube, la vitesse diminuait, avec le temps, de telle sorte qu'après vingt-cinq jours, il ne s'écoulait pour ainsi dire plus rien. En faisant alors le vide en dessous du tube, il s'est produit un affaissement du sable de 0^m05 et l'air s'étant dégagé plus complètement des interstices du sable gros, la couche de sable fin, argileuse, cette fois-ci, qui formait la partie supérieure du filtre, s'est montrée d'une manière bien nette.

Inversement, j'ai débarrassé, par des lavages successifs, du sable de Rocour préalablement traité par l'acide chlorhydrique, de tout le fin sable qu'il renfermait, pour m'assurer si, dans ces conditions, la vitesse de filtration diminuerait encore avec le temps. Le résultat a été tout à fait démonstratif : la hauteur du sable ayant été de 0^m45 et celle de l'eau de 0^m65, comme dans le cas précédent, la vitesse de filtration n'a pas varié pendant trois jours, au point que j'ai cru inutile de faire durer l'expérience plus longtemps.

On doit donc regarder comme prouvé qu'on ne pourra obtenir des résultats constants, au moyen de filtres de sable, que si ceux-ci sont formés de grains de même grosseur et de même nature.

Mais la différence des grains de sable n'est pas la seule cause de perturbation qui agit dans le phénomène de la filtration. Un sable à grains égaux, autant que possible, ne se tasse pas nécessairement de la même manière selon que le filtre est épais ou non et de ce chef résultent encore des différences de vitesse de filtration qui se marquent surtout dans les filtres épais. J'ai disposé, en effet, parallèlement, quatre tubes de 2 mètres, chargés, respectivement, de 0^m40, 0^m90, 1^m40 et 1^m90 de sable homogène bien lavé et mis en communication avec un même bassin d'eau. La colonne d'eau avait donc la même hauteur dans chaque tube, les hauteurs du sable différant seules.

Dans ces conditions, les filtres donnaient respectivement, en moyenne :

89^{gr}24, 41^{gr}00, 28^{gr}95, 27^{gr}30

d'eau en quinze minutes. Ces nombres montrent que la résistance des filtres au passage de l'eau diminue, toutes proportions gardées, quand la longueur du filtre augmente. En effet, si l'on multiplie les épaisseurs des filtres par leur débit respectif, on obtient :

$$27.30 \times 1.94 = 52.962$$

$$28.95 \times 1.40 = 40.530$$

$$41.00 \times 0.90 = 36.900$$

$$89.24 \times 0.40 = 35.696$$

ce qui montre que la filtration tend à se faire d'autant plus exactement en raison inverse de l'épaisseur du filtre (loi de Poiseuille sur l'écoulement des liquides par les tubes capillaires), que cette épaisseur est plus faible.

La cause de ce fait réside dans une inégalité de tassement du sable dans les longs filtres, ainsi qu'il a été dit plus haut, lorsqu'on laisse le tassement s'opérer spontanément dans toute la masse.

La preuve est fournie par ce que, si, au lieu de charger les longs tubes en laissant tomber librement le sable dans l'eau jusqu'à obtenir les épaisseurs désirées des filtres, on opère par tranches

successives, de quelques centimètres, en s'aidant pour achever le tassement de chacune d'elles, de la pression atmosphérique, les différences constatées s'effacent, ainsi que le montre le tableau suivant :

| Poids d'eau filtrée en 15'. | Épaisseur du filtre. | Produits des nombres. |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
| 18 ^{gr} 74 | 1 ^m 94 | 36.355 |
| 26 ^{gr} 58 | 1 ^m 40 | 37.212 |
| 41 ^{gr} 00 | 0 ^m 90 | 36.900 |
| 89 ^{gr} 24 | 0 ^m 40 | 35.696 |
| 180 ^{gr} 80 | 0 ^m 20 | 36.160 |

et alors, mais alors seulement, la résistance des filtres verticaux est inversement proportionnelle à leur épaisseur.

Il reste encore à mentionner une cause de perturbation de la vitesse de filtration de l'eau à travers de longs filtres verticaux. On reconnaîtra son importance lorsqu'on fera attention qu'elle doit inévitablement se faire sentir dans tous les terrains perméables de quelque épaisseur.

Voyons d'abord les faits.

Un tube en verre de 4 mètres (formé de deux parties réunies), a été disposé verticalement. Il se trouvait muni, en dessous, du diaphragme en toile métallique, couvert d'une légère couche d'ouate destinée à retenir le sable, comme dans les cas précédents, et il communiquait, au-dessus, avec un vase à niveau constant.

Après avoir été bouché, provisoirement, sous la toile métallique, il a été rempli d'eau puis il a reçu le sable, en mince filet intermittent, de telle façon que toute bulle d'air visible fut exclue. Le remplissage étant terminé, on a laissé l'écoulement s'opérer. Après quelques heures, on put observer qu'il devenait plus lent, bien que le sable fut homogène.

En même temps, on voyait se former, dans la moitié inférieure du tube, des solutions de continuité dans la colonne liquide : le sable apparaissait en ces endroits comme desséché. Il est facile de comprendre ce qui s'était produit. La colonne d'eau exerçait, naturellement, par son poids, dans le tube une dépression en rapport avec sa longueur, dépression dont l'effet se marquait d'autant plus que la vitesse de descente de l'eau était plus ralentie par le filtre.

Alors l'air dissous dans l'eau s'est fait jour autour de certains grains de sable et a formé des bulles, directement visibles, qui ont rompu la continuité du liquide et rétréci la section utile de filtration, sans parler des effets de capillarité qui leur sont propres.

Il est clair, à présent, qu'on ne peut obtenir des vitesses de filtration constantes, même avec des filtres dont la hauteur d'eau est inférieure à environ 10 mètres (pression de l'atmosphère), que si l'eau ne tient pas de gaz en solution.

* * *

C'est en tenant compte de ces causes de perturbations qu'a été mesurée la vitesse de filtration de l'eau dans des conditions variées de pression et d'épaisseur des filtres verticaux.

Le tableau suivant reproduit les valeurs moyennes des résultats obtenus. On remarquera que la colonne qui se rapporte à la pression de 0^m005 (la deuxième) est seule complète; c'est que, pour les pressions plus fortes, la vitesse de filtration de l'eau à travers les deux premiers filtres a été trop grande pour être mesurée exactement. Il a fallu, même, mettre ces deux filtres hors service, pour empêcher une perturbation dans les autres, du chef de la solidarité d'alimentation des tubes.

| Épaisseur des filtres. | Nombre de grammes d'eau passés sous les pressions de | | | | |
|------------------------|--|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0 ^m 005 (environ) | 0 ^m 875 | 1 ^m 75 | 2 ^m 70 | 3 ^m 50 |
| 0 ^m 010 | 22.10 | — | — | — | — |
| 0 ^m 040 | 14.81 | — | — | — | — |
| 0 ^m 085 | 10.33 | 118.00 | 261.00 | 452.80 | 573.40 |
| 0 ^m 195 | 12.40 | 50.30 | 117.91 | 192.00 | 250.00 |
| 0 ^m 505 | 12.80 | 22.10 | 45.74 | 74.20 | 96.50 |
| 0 ^m 350 | 13.15 | 12.95 | 24.42 | 39.40 | 51.00 |
| 1 ^m 500 | 13.70 | 8.85 | 15.50 | 25.46 | 32.50 |
| 1 ^m 300 | 14.10 | 7.86 | 12.95 | 21.52 | 27.00 |

On voit l'effet considérable exercé par la pression sur la filtration de l'eau à travers le sable. On remarque d'abord que la vitesse de filtration ne va *diminuant* avec l'épaisseur du filtre que si la pression de l'eau a atteint une certaine valeur. Pour une faible pression (0^m005 environ), la vitesse diminue, à la vérité, d'abord rapidement, mais elle passe bientôt par un minimum et grandit ensuite avec l'épaisseur du filtre, au moins dans les limites des expériences. C'est que la colonne d'eau qui imprègne le sable agit d'autant plus par son poids qu'elle est plus longue et que la résistance opposée par le sable à la circulation de l'eau ne suffit plus à compenser l'action de la pesanteur.

On conçoit qu'un sable d'une finesse déterminée permettrait de réaliser un filtre dont le débit serait, pour une faible pression motrice, *indépendant* de l'épaisseur. Si ce cas limite ne se réalise probablement pas dans la nature, les cas qui s'en rapprochent doivent être très fréquents, car l'eau d'imprégnation se trouve rarement sous une pression notable à la surface du sol; le plus souvent les eaux de la surface sont des *eaux de ruissellement* et l'on doit regarder les conditions de la première série d'expériences comme se rapprochant beaucoup de la réalité.

La conclusion pratique à tirer de là, c'est que la vitesse d'alimentation des nappes souterraines n'est pas nécessairement diminuée par l'épaisseur de la couche de sable que l'eau doit traverser; bien au contraire, il est plus avantageux que celle-ci dépasse une certaine valeur plutôt que de rester en dessous (*).

Il n'est pas inutile de rappeler, à propos de ces faibles pressions motrices, une expérience déjà faite par Biot, d'autant que, complétée à présent, elle devra entrer en compte dans la question de l'imprégnation de certains terrains.

Si l'on remplit de sable délayé dans de l'eau, un tube vertical court, muni à la partie inférieure d'une douille à tampon d'ouate, l'excédent liquide s'écoule rapidement. Mais l'écoulement cesse dans le moment précis où la surface libre de l'eau qui se trouve au-dessus du sable, devient *tangente* à celui-ci. Si on laisse tomber alors une

(*) Il est bien entendu que cette conclusion suppose une couche de sable maigre, non argileux.

goutte d'eau sur le sable, il en tombe juste une autre de dessous le tube. Telle est l'expérience de Biot.

Je l'ai répétée en employant des tubes de plus en plus longs, pour vérifier si cette action capillaire de l'eau se fait toujours sentir de la même façon.

Quand la couche de sable dépasse 30 à 40 centimètres, l'écoulement ne s'arrête plus au moment précis de l'application de la surface libre de l'eau sur le sable, mais persiste pendant un temps d'autant plus long que la couche est plus épaisse. Si l'on ajoute alors de l'eau au-dessus, il ne s'en écoule plus un volume égal par-dessous. C'est que, dans ces conditions, la colonne d'eau agit par son poids; la force vive de son mouvement de descente est assez grande pour entraîner la surface libre de l'eau dans la profondeur du sable et il reste, au-dessus, du sable humide, à la vérité, mais dont les interstices sont occupés alors par de l'air. Ce gaz présente ensuite un obstacle à l'entrée d'un volume complémentaire d'eau.

J'ai tenu à savoir dans quelle proportion se trouve la quantité d'eau ainsi enlevée, relativement à la quantité totale que le sable renfermait.

Pour cela, j'ai pesé un tube plein de sable et d'eau au moment où l'excédent d'eau s'était écoulé; puis je l'ai pesé après l'avoir soumis à une succion. La différence des deux poids donnait l'eau enlevée.

Le contenu du tube ayant été desséché alors totalement, on a déterminé le poids du sable sec et le poids du tube vide.

Voici les résultats obtenus :

| | |
|--------------------------------------|----------------------|
| tube + sable + eau | 29 ^{gr} 522 |
| tube + sable après succion | 27 ^{gr} 467 |
| tube + sable sec | 26 ^{gr} 088 |
| tube vide | 16 ^{gr} 725 |

On en déduit :

| | | |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------|
| poids de l'eau totale | 3 ^{gr} 434 | } = 3 ^{gr} 434 |
| poids de l'eau enlevée | 2 ^{gr} 055 | |
| poids de l'eau restée | 1 ^{gr} 379 | |
| poids du sable sec | 9 ^{gr} 363 | |

Si l'on prend pour la densité des grains de sable 2.65 (densité du quartz),

$$\frac{9.363}{2.65} = 3.533$$

sera le volume plein des grains de sable; en ajoutant à ce volume celui de l'eau : 3.434 (*), on obtient 6^{cc}967, pour le volume de l'ensemble; alors

$$\frac{6.967 \times 100}{6.967} = 49.29$$

sera le volume d'eau contenu dans 100 volumes de *sable imprégné*.

D'autre part, si l'on ajoute à 3^{cc}533 (volume plein du sable) 1.379, volume de l'eau restée après succion, on aura 4^{cc}912 pour le volume plein du sable humide; alors

$$\frac{1.379 \times 100}{4.912} = 28.074$$

sera le volume d'eau contenu dans 100 volumes de *sable humide*.

Or, il résulte des calculs de M. le capitaine E. Cuvelier (**) que, dans un sable formé de grains sphériques égaux, dans lequel le volume des vides est indépendant de la grosseur des grains, le rapport du volume plein au volume apparent du sable est $\frac{\pi\sqrt{2}}{6}$, ou environ 26 %; donc le *sable imprégné d'eau*, tel qu'il a servi dans ces expériences, peut retenir considérablement plus d'eau que ne le permettent, à première vue, les vides compris entre ses grains. Même le *sable humide* en contient aussi plus que le volume théorique des vides le permet. On peut ne pas faire état de cette dernière différence (28 — 26 = 2) parce qu'elle est faible et qu'elle peut devoir son origine à l'irrégularité des grains de sable. Il en est autrement de la première différence (49 — 26 = 23); celle-ci nous oblige à admettre que, dans un sable librement imprégné, les grains sont écartés l'un de l'autre et tenus à distance par une lamelle d'eau dont l'épaisseur n'est pas négligeable. Un tel sable devra nécessaire-

(*) En négligeant l'influence de la température.
(**) *Société belge de Géologie*, t. XV, p. 284, 1901.

ment être une masse très mobile, participant jusqu'à un certain point des propriétés des liquides (sables boullants), tandis qu'un sable humide présentera plus de rigidité, même qu'un sable sec, par suite de l'adhérence, ou de l'effet capillaire, de l'eau à ses grains.

J'ai répété ces pesées en me servant d'un sable extrêmement fin que j'avais extrait du limon de la Hesbaye en dissolvant les composés aluminiques, ferriques, etc., dans de l'acide chlorhydrique chaud, en vue de vérifier l'influence de la surface libre du sable sur la quantité d'eau retenue.

On sait, en effet, que si le rapport du creux au plein est indépendant, dans un volume donné, du nombre de grains de sable supposés sphériques, il en est autrement de la surface des grains. Celle-ci est en raison inverse du diamètre des grains, comme il est facile de s'en convaincre (*).

Il s'agit donc de s'assurer si le sable imprégné renferme, cette fois, une proportion d'eau plus forte encore que dans le cas précédent. Voici les données de l'expérience :

| | |
|--------------------------------------|----------------------|
| tube + sable + eau | 115 ^{gr} 60 |
| tube + sable après succion | 104 12 |
| tube + sable sec. | 83 85 |
| tube vide | 23 60 |

(*) En effet, soit un parallépipède rectangle, de dimensions a, b, h . Si d est le diamètre d'une sphère, le nombre de sphères qui pourront être alignées sur a sera

$$\frac{a}{d}; \text{ puis sur } b : \frac{b}{\sqrt{\frac{3}{4}}d}; \text{ donc sur la surface de base il y en aura : } \sqrt{\frac{4}{3}} \frac{ab}{d^2}.$$

Ce nombre se reproduira sur la hauteur h autant de fois que la hauteur du tétraèdre $\sqrt{\frac{2}{3}}d$ sera comprise dans h .

Le nombre des sphères trouvant place dans $a b h$ sera donc :

$$n = \frac{a}{d} \cdot \frac{b}{\sqrt{\frac{3}{4}}d} \cdot \frac{h}{\sqrt{\frac{2}{3}}d} = \sqrt{2} \frac{ab h}{d^3}.$$

La surface de ces sphères sera :

$$S = n \pi d^2 = \sqrt{2} \frac{ab h}{d^3} \pi d^2 = 4.44 \frac{ab h}{d}.$$

On en déduit :

| | |
|----------------------------------|---------------------|
| poids de l'eau totale. | 31 ^{gr} 75 |
| poids de l'eau enlevée | 11 ^{gr} 48 |
| poids de l'eau restée. | 20 ^{gr} 27 |
| poids du sable sec | 60 ^{gr} 25 |

et l'on trouve, en opérant comme ci-dessus, 58.28 pour le volume d'eau contenu dans 100 volumes de *sable imprégné* et 45.28 pour le volume d'eau contenu dans 100 volumes de *sable humide*.

Si l'on rapproche ces nombres des précédents, on sera frappé de l'énorme influence exercée par la surface libre des grains de sable. L'eau demeurée dans le sable fin est 1.7 fois (45.28 : 26) plus grande que la quantité calculée dans l'hypothèse où les grains de sable se touchent. La propriété de « bouler » doit donc grandir avec la finesse des grains. Un terrain à grains fins perd proportionnellement moins d'eau par la succion qu'un terrain sablonneux ordinaire.

J'ai déterminé alors la densité apparente de ces deux sortes de sable à l'état sec et dans l'air, en prenant le poids de 100 centimètres cubes tassés seulement en donnant au vase de petits chocs jusqu'à ce que le volume du sable se maintint constant.

Cent centimètres cubes de sable de Rocour pesèrent 148^{gr}12.

Cent centimètres cubes de limon pesèrent 126^{gr}04.

On le voit, le sable fin pèse moins; il emprisonne plus d'air que le sable plus gros. En faisant ensuite le vide sous le sable fin, sec, qui était très mobile ou très boullant, comme on le conçoit aisément, il a fini par acquérir une rigidité telle qu'il a été possible de le couper au couteau comme s'il avait été humide, ou de le modeler sous une spatule. La rentrée de l'air, effectuée aussi doucement que possible, rendait au sable toute sa mobilité primitive.

Il me sera permis de citer encore une expérience bien démonstrative de l'effet désagrégant d'un surplus d'eau sur du sable humide.

Un tube vertical, portant, à son extrémité inférieure, une douille filtre, ayant été rempli de sable délayé dans de l'eau, on laisse égoutter l'excès d'eau, puis on enlève la douille filtre qui soutenait le sable tandis qu'il était imprégné d'eau; la colonne de sable (1 mètre et au delà) demeure suspendue solidement dans le tube, une pression de plusieurs kilogrammes exercée à la partie supérieure ne la

détache pas; mais si l'on ajoute quelque peu d'eau, toute la masse descend, d'une pièce, au bout de peu d'instant.

Mais revenons à la vitesse de filtration de l'eau quand la pression et l'épaisseur des filtres varient.

Pour rendre plus évident que, comme on l'a dit plus haut, la vitesse de filtration ne diminue régulièrement avec l'épaisseur du filtre, que si la pression de l'eau est assez forte, on n'a qu'à faire le produit de l'épaisseur d'un filtre donné, par son débit et comparer les nombres obtenus. Le tableau suivant renseigne à cet égard :

| Filtres. | Produits de l'épaisseur par le débit pour une pression de | | | | |
|--------------------|---|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0 ^m 005 | 0 ^m 875 | 1 ^m 75 | 2 ^m 70 | 3 ^m 50 |
| 0 ^m 010 | 0.22 | — | — | — | — |
| 0 ^m 040 | 0.59 | — | — | — | — |
| 0 ^m 085 | 0.88 | 10.03 | 22.18 | 37.48 | 48.74 |
| 0 ^m 195 | 1.92 | 9.81 | 23.00 | 37.44 | 48.75 |
| 0 ^m 505 | 6.46 | 11.16 | 23.10 | 37.47 | 48.73 |
| 0 ^m 950 | 12.49 | 12.30 | 23.20 | 37.43 | 48.54 |
| 1 ^m 500 | 20.55 | 13.27 | 23.25 | 38.19 | 48.75 |
| 1 ^m 800 | 25.38 | 14.15 | 23.32 | 38.73 | 48.60 |

Les produits relatifs à une pression donnée devraient être égaux, si la vitesse de filtration était inverse à l'épaisseur du filtre; on voit que pour la pression de 0^m005 ces produits varient du premier filtre au dernier *plus que du centuple*; pour la pression de 0^m875, les produits sont encore inégaux bien que dans une proportion moindre; mais à partir de la pression 1^m75 leur égalité doit être regardée comme acquise.

Il résulte de ce qui précède, que la pression sous laquelle l'eau pénètre une masse de sable, finit par l'emporter sur les causes perturbatrices qui entraînent, soit une diminution, soit une augmentation de la vitesse de filtration et qu'elle rétablit la *régularité*.

Toutefois, il y a lieu de ne pas perdre de vue que, dans la nature, les eaux de la surface sont rarement sous pression et que, dès lors, leur pénétration suit des lois très compliquées.

Influence de la température sur la vitesse de filtration.

On a admis parfois que l'élévation de la température dans les couches profondes du sol avait une influence considérable sur la vitesse de descente des eaux de la surface et l'on n'a même pas été éloigné d'y trouver le mot de l'énigme de la pénétration plus ou moins rapide de l'eau dans les terrains. Il n'est donc pas sans intérêt de vérifier si la mesure dans laquelle varie la filtration de l'eau avec la température est de l'ordre des phénomènes observés.

J'ai soumis, à cet effet, de l'eau à la filtration à travers une épaisseur de sable de 0^m52, sous une charge de 0^m270. Le sable se trouvait dans un tube de 0^m02 de diamètre, placé horizontalement dans un thermostat fermé, qu'on pouvait chauffer à diverses températures.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

| Températures. | Débit d'eau en 10'. |
|----------------|----------------------|
| 19° | 3 ^{sr} 79 |
| 26°5 | 4 ^{sr} 38 |
| 41°7 | 5 ^{sr} 73 |
| 44° | 6 ^{sr} 25 |
| 60° | (6 ^{sr} 93) |

À la température de 60° les mesures ne sont plus exactes parce que des bulles d'air se dégagent de l'eau, divisent le sable et occasionnent un ralentissement.

Poiseuille a constaté que le débit d'un tube capillaire varie, avec la température, pour l'eau, selon

$$K = 2162.4 (1 + 0.03368 t + 0.000221 t^2);$$

si, dans cette formule, nous posons successivement $t = 19°$ et $44°$, on aura :

$$K_{19} = 3719 \text{ et } K_{44} = 6250;$$

or le rapport des débits du filtre de sable à 19° et à 44° est :

$$\frac{6.25}{3.79} = 1.64$$

et le rapport des valeurs correspondantes de K :

$$\frac{6250}{3719} = 1.69;$$

ces deux rapports différent si peu qu'on est autorisé à conclure que c'est uniquement la diminution du frottement intérieur du liquide causé par la température qui augmente le débit du filtre de sable.

Comme les températures des régions superficielles du sol varient rarement de 25° (44° — 19°), on peut dire, avec certitude, que la vitesse de la pénétration de l'eau dans le sol ne passe jamais du simple au double.

PASSAGE DE L'EAU A TRAVERS LE LIMON.

Nous arrivons, à présent, au passage de l'eau à travers le limon.

Les essais n'ont été faits qu'au moyen de tubes verticaux : la vitesse de filtration étant absolument trop lente pour permettre une observation exacte en tubes horizontaux.

Pour ne pas étendre cet article déjà assez long, je me bornerai à reproduire les résultats constatés, sans entrer dans le détail des expériences. Il n'y a d'ailleurs aucun inconvénient à procéder de la sorte parce que ces résultats reproduisent, au fond, ceux qui ont été obtenus au moyen du sable.

Le limon mis en usage a été le *limon supérieur de Hesbaye*.

Le point capital à constater était celui de la *perméabilité à l'eau de ce limon*.

Si l'on remplit un tube disposé comme il a été dit plus haut, de limon sec, préalablement pulvérisé et bien tassé et qu'on mette le tout en communication avec de l'eau, on constate que la pénétration n'a lieu que jusqu'à une profondeur sans importance. On pourrait croire, d'abord, à une imperméabilité réelle du limon. Il n'en est rien cependant, car l'arrêt de la descente de l'eau est causée seulement par les conditions de l'expérience. Le tube employé, n'ayant que 2 centimètres de diamètre et se trouvant en rapport avec l'eau dans toute sa section, était trop étroit pour permettre à l'air de se dégager. En creusant un canal, au centre du tube, dans le limon tassé, au moyen d'un foret à cuiller, et en laissant ensuite arriver l'eau comme précédemment, on voit un dégagement abondant de bulles d'air s'échapper du trou central et, en même temps, l'eau pénétrer, assez rapidement, jusqu'au niveau du fond du trou.

Il résulte de cet essai, que toutes les expériences qui ont été faites sur l'infiltration du limon au moyen de tubes étroits, ne prouvent

rien quant à l'imperméabilité de la terre, ou quant à sa non-pénétration par les eaux pluviales. Les choses doivent se comporter tout autrement sur un sol indéfini en largeur, où l'air peut trouver son chemin et se dégager pour faire place à l'eau.

Pour constater la perméabilité du limon, il est de toute nécessité de remplir les tubes-filtres, mis en usage, d'une boue bien délayée, de laisser écouler l'excédent d'eau et de charger de nouveau jusqu'à ce qu'on ait la hauteur voulue de limon dans le tube.

En opérant de la sorte, on constate, comme pour le sable *non homogène*, que la vitesse de filtration va en diminuant avec le temps, toutes autres conditions restant égales d'ailleurs. Un filtre de 60 centimètres de hauteur, sous une charge d'eau de 48 millimètres mesurée au-dessus du limon, soit donc 64^{cm}8 (0^m60 + 0^m048) en tout (voir plus haut, cas du sable), a cessé de débiter de l'eau après deux semaines environ.

On verserait cependant dans une grande erreur si l'on pensait, d'après cela, que l'eau ne traversait plus le filtre. Voici qui prouve la chose :

J'ai monté un tube-filtre de *huit mètres* de haut (formé de quatre parties de 2 mètres réunies par des ajutages en caoutchouc ligaturés) qui a été fixé, au moyen de supports en bois, contre la façade extérieure nord du laboratoire. Il a été rempli de limon, comme il a été dit plus haut. Lorsque le tassement de la terre a été achevé, il y avait une hauteur de 7^m20. Au-dessus était de l'eau claire dont on ramenait le niveau au même repère chaque matin, en ajoutant de l'eau fraîche. Le tube était fermé, au-dessus, par un bouchon dans lequel passait un tube capillaire; de cette façon l'évaporation de l'eau était empêchée tandis que l'air avait accès dans le tube à mesure de la descente, par filtration, de la colonne liquide.

Pendant les premiers jours d'observation, le tube laissait suinter de l'eau, par gouttes, à la partie inférieure. Cet écoulement alla de plus en plus lentement et après trois semaines il était supprimé.

Mais si l'on observait le niveau de l'eau au-dessus du tube, on constatait qu'il s'abaissait de 12 à 15 millimètres par vingt-quatre heures, selon la température. L'eau filtrait donc à travers les 7^m20 de limon, mais avec une lenteur telle qu'elle *s'évaporait* au bas du tube et ne parvenait plus à se constituer en goutte.

Ce filtre a été tenu en observation pendant les mois d'août et de

septembre derniers. Les derniers jours l'eau descendait seulement de 5 à 6 millimètres par vingt-quatre heures; mais la température était déjà abaissée notablement.

Je crois que cette expérience démontre bien que le limon de la Hesbaye est perméable à l'eau et que les vides qu'il comprend entre ses grains de sable ne se remplissent pas encore totalement sous la pression exercée par une hauteur de 7^m20 de substance imprégnée d'eau.

Peut-être pourra-t-on penser qu'une descente d'eau de quelques millimètres par vingt-quatre heures n'a pas d'importance pour l'alimentation des sources? On remarquera, cependant, qu'une descente d'eau d'un seul millimètre donne, par hectare, 10 mètres cubes d'eau, quantité qui n'est certes pas à négliger.

PASSAGE DE L'EAU A TRAVERS L'ARGILE.

Nous arrivons, enfin, au cas de l'argile proprement dit.

Voici, tout en résumé, les constatations faites.

Une boue d'argile (terre d'Andenne), bien délayée, a été versée au-dessus d'un filtre de sable. Cette boue a donné, pour le repos, un dépôt d'argile de 6 centimètres d'épaisseur qui a laissé passer constamment de l'eau. L'expérience a duré plus d'un mois. La vitesse de la filtration était, naturellement, extrêmement ralentie, mais elle n'a jamais été nulle. Tandis que le sable qui servait de support à l'argile débitait 0^m085 d'eau en vingt minutes, la couche d'argile ne laissait passer que 0^m009 en vingt-quatre heures, soit donc 680 fois moins.

L'argile, imprégnée d'eau, mais qui n'a pas été comprimée, est donc perméable, bien que dans une faible proportion.

Pour contrôler ensuite l'effet de la compression, c'est-à-dire du tassement, sur la perméabilité de l'argile, j'ai fait le vide sous le filtre, alors que le tube qui le contenait était plein d'eau; je chargeais donc l'argile, de cette façon, du poids de 1^{kg}055 par centimètre carré dans les couches immédiatement placées au-dessus du sable, les autres faisant encore corps avec l'eau, se trouvaient naturellement dans d'autres conditions et ne servaient qu'à transmettre la pression atmosphérique.

La filtration a d'abord été beaucoup plus rapide, puis, à mesure

que grossissait la couche d'argile comprimée, elle est devenue de plus en plus lente; après quelques heures elle était *arrêtée*.

L'appareil a été alors ouvert et l'on a pu constater, sous la couche superficielle d'argile encore boueuse, une masse devenue de plus en plus compacte au point que, dans la partie appliquée sur le sable, elle pouvait être coupée au couteau et qu'elle présentait les caractères de *l'argile imprégnée d'eau en vase clos*, que j'ai fait connaître dans ma précédente note.

Il est donc confirmé que l'argile n'est imperméable à l'eau qu'à la condition d'être comprimée suffisamment.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Les faits rencontrés au cours de ces recherches peuvent être résumés comme il suit :

1° L'eau ne circule pas dans le sable, *horizontalement*, avec une vitesse inverse à l'épaisseur du filtre et proportionnelle à la pression motrice. Quand les filtres sont épais, l'effet de la pression tend à s'effacer de plus en plus et l'eau n'avance qu'à la suite de *l'imbibition*. La formule de Poiseuille, qui donne la loi de l'écoulement d'un liquide dans les tubes capillaires, n'est pas applicable au cas du passage de l'eau à travers de grandes largeurs de sable.

Si la pression motrice est plus forte, la diminution de la vitesse de filtration avec l'épaisseur du filtre s'accroît encore, mais l'effet de la pression s'annule bientôt, l'eau continuant à cheminer comme si son mouvement en était affranchi. La pression régnant en une région donnée d'une couche de sable, ne produira donc un effet sensible qu'à une distance qui pourra passer pour négligeable.

2° Dans une filtration *verticale*, les résultats des observations ne sont concordants que dans le cas où le sable est formé de grains égaux.

Comme cette condition n'est jamais réalisée, pour ainsi dire, dans la nature, la filtration de l'eau ne peut suivre une loi simple, traduisible par une formule mathématique. La descente verticale de l'eau a pour effet de faire passer à la partie supérieure le sable plus fin. *Le filtre rationnel* se constitue donc automatiquement, dans une certaine mesure.

3° La résistance des filtres au passage de l'eau diminue, en apparence, quand la hauteur du filtre vertical augmente; la loi de Poiseuille n'est à peu près satisfaisante que pour des filtres peu épais.

4° Si l'eau filtrant à travers le sable est aérée (ce qui est toujours le cas dans la nature), une partie de l'air se fait jour autour des grains de sable, en des places déterminées, par suite de la *dépression* résultant du poids de la colonne verticale de liquide et entrave considérablement la descente de l'eau.

5° Le débit d'un filtre vertical ne paraît diminuer proportionnellement à l'épaisseur que si la pression motrice de l'eau dépasse une certaine limite. Quand la pression est faible, le débit grandit, au contraire, avec cette épaisseur, parce que le poids de la colonne d'eau agit d'une manière dominante.

La vitesse d'alimentation des nappes souterraines n'est donc pas nécessairement diminuée par l'épaisseur de la couche que l'eau traverse.

6° Le volume de l'eau qui imprègne librement le sable, dépasse d'autant plus le volume des vides compris entre les grains supposés au contact, que le sable est plus fin. La surface libre des grains de sable exerce donc une influence énorme sur la mobilité d'un sable imprégné d'eau. L'air produit un effet semblable à celui de l'eau.

7° La température active le débit d'un filtre dans la même mesure qu'elle diminue le frottement intérieur du liquide filtrant. Le débit est doublé pour une différence de température de près de 30 degrés.

8° Le limon de la Hesbaye est perméable à l'eau, même sur une épaisseur de 8 mètres (et probablement au delà). Toutefois, le fait ne se révèle que si l'on prend les précautions nécessaires pour que l'air dissous dans l'eau ne rompe pas la continuité du liquide.

9° L'argile elle-même laisse filtrer l'eau, aussi longtemps qu'elle ne se trouve pas soumise à une compression qui l'empêche de prendre le volume voulu par l'infiltration.

10° De tout ce qui précède, il résulte que la descente des eaux météoriques à travers le sol ne peut avoir lieu régulièrement, par couches restant en quelque sorte parallèles à elles-mêmes.

L'air emprisonné dans le sol devant, de toute nécessité, faire place à l'eau, la descente de celle-ci n'aura lieu que dans des régions limitées, les autres servant de canaux d'évacuation de l'air. La péné-

tration de l'eau dans ces régions n'aura lieu, en outre, que si la surface du sol est ruisselante ou couverte d'une couche d'eau, ou de neige fondante, d'une épaisseur sensible. Mais quand l'eau est arrivée à se frayer un canal vertical, sa descente sera d'autant plus rapide que la colonne d'eau sera plus grande, au moins jusqu'à une certaine limite d'épaisseur de terrain. L'eau agit alors plus efficacement par son poids; elle détermine une véritable succion sur les couches supérieures, succion qui a pour résultat de les vider jusqu'à ce qu'il se soit produit un équilibre entre cette succion et la force d'imbibition capillaire qui s'oppose au mouvement du liquide.