

SÉANCE SPÉCIALE POUR L'ÉTUDE DES SABLES BOULANTS, DU 5 MARS 1901.

Présidence de M. A. Rutot, président.

La séance est ouverte à 8 h. 40.

Correspondance :

M. P. *Choffat*, attaché au Service géologique du Portugal, signale à notre attention les études et les rapports de M. *Heim* sur diverses questions très intéressantes d'applications géologiques. Il pense que M. *Heim* a dû traiter également la question des sables bouillants. M. *Choffat* nous informe que lui-même s'occupe, en ce moment, d'une application géologique où interviennent aussi ces sables. Il s'agit de l'effondrement d'une galerie aquifère, pour lequel il croit que l'emploi des plaques filtrantes serait favorable; M. *Choffat* désire même quelques renseignements à ce sujet.

M. *Dumortier* a remis à M. le Secrétaire de la Société centrale d'architecture, le premier fascicule paru sur l'étude des dits sables; pour en faire l'analyse dans le journal *L'Émulation*.

M. *Van Meurs* nous laisse espérer une communication sur ce sujet par M. G. *Denil*, ingénieur des ponts et chaussées, qui s'occupe des travaux du canal du Centre.

M. *Gosselet*, retenu par ses travaux pour la Carte géologique de France, s'excuse de ne pouvoir assister à la séance, dont l'ordre du jour l'intéresse vivement.

M. *Ransy*, ingénieur à Liège, nous envoie trois exemplaires d'une brochure décrivant le nouveau système de captage de l'eau des sables aquifères au moyen de puits filtrants à lamelles de verre.

M. *Moulan* nous informera, en temps utile, de la formation, possible

cet hiver, des aigueois au parc de Laeken lez-Bruxelles, pour que nous puissions en prendre, éventuellement, des clichés photographiques.

M. *Otto Lang* nous donne les renseignements complémentaires suivants au sujet de l'expression *schwimmende Gebirge* employée concurremment avec celle de *Schwimmsand*, dans sa lettre du 8 janvier, publiée dans le *Compte rendu* de la séance du 15 janvier dernier :

« *Schwimmende Gebirge* est une expression usitée par les mineurs » allemands. Dans cette expression, le mot *Gebirge* signifie *roche* » plus spécialement qu'*assise (Schicht)*; car on désigne aussi sous » l'expression *schwimmende Gebirge* des dépôts qui ne sont pas des » assises géologiques. Cette expression comprend d'une manière » générale des amas quelconques de cailloux roulés, de gravier, de » sable, de boue et de tourbe, pourvu que tous ces dépôts soient à » l'état *nageant*, soit boulant ou fluide. »

Communications des membres :

M. le *Président* fait connaître que l'ordre du jour, pour cette séance et les suivantes consacrées au boulant, sera divisé en deux parties distinctes :

1° L'exposé des questions relatives aux généralités et qui sont de nature à permettre d'arriver promptement à une définition aussi exacte que possible du sable boulant;

2° Les communications spéciales sur ce sujet. Exposés de cas locaux, régionaux, observations diverses sur un point déterminé du programme.

M. le *Président* donne ensuite la parole à M. *Ad. Kemna*.

LA GÉOMÉTRIE DES COUCHES DE SABLE

PAR

Ad. KEMNA

Directeur de l'*Antwerp Water Works Company*.

L'allure des couches de sable, leur manière de se comporter quand elles sont entamées par des travaux d'une certaine importance, doivent résulter, en dernière analyse, des propriétés physiques des éléments meubles accumulés. La densité de la substance, les dimensions des grains, leur forme, la régularité ou l'irrégularité des divers grains, sont

autant de facteurs déterminant les propriétés de la masse considérée dans son ensemble. Ces propriétés sont *effet*, les caractères physiques sont *cause*; une étude ne peut être considérée comme scientifique si elle n'établit pas clairement cette relation de cause à effet.

Mais les phénomènes concrets de la nature ne sont pas simples. Dans le cas actuel, un premier examen, très sommaire, donne lieu déjà à l'énumération de plusieurs causes, entremêlant leurs effets; pour peu que l'on veuille approfondir la question, déterminer l'action proportionnelle et relative de chacune de ces causes et comment elles combinent leur action, on se trouve aussitôt devant une complication inextricable.

Pour aborder le problème avec quelque chance de succès, il est indispensable de le simplifier par l'imagination. Il n'est pas impossible de déterminer par le raisonnement quelles doivent être les propriétés d'une masse idéalement simple, qu'on pourrait nommer un sable théorique; puis de déterminer de même quels changements subira l'allure de cette couche en faisant varier, un à un, les divers éléments du problème. On peut espérer ainsi arriver à une solution approchée du problème dans sa complication concrète.

Car, il importe de ne pas l'oublier, ces études théoriques ne peuvent pas constituer en elles-mêmes le but de nos efforts; elles ne sont qu'un moyen d'arriver à une connaissance raisonnée, à une compréhension scientifique du phénomène, tel qu'il s'offre à nous dans la réalité. Il est donc nécessaire, indispensable même, à chaque étape du raisonnement, de contrôler le résultat théorique en l'appliquant à la réalité.

J'insiste d'autant plus sur ce point, qu'il sera pour ainsi dire complètement négligé dans cette courte esquisse; et pourtant, on voit que ce n'est pas pour en avoir méconnu l'importance. Deux raisons d'opportunité militent en faveur d'une étude purement théorique. D'abord, une étude de ce genre peut être courte. La théorie est en somme une simplification: on a éliminé tout l'accessoire pour dégager le principal. Au contraire, du moment qu'on revient au concret, on retrouve la complication des phénomènes; leur examen, avec les discussions inévitables, donnerait à ce travail une étendue trop considérable. En second lieu, pour cette vérification constante de la théorie à mesure qu'elle se développe, par la comparaison avec la réalité, nos collègues ingénieurs ou géologues n'ont qu'à puiser dans l'expérience de leur pratique; et comme je ne suis ni ingénieur ni géologue, j'ai une raison probante pour m'abstenir.

Supposons un terrain meuble, homogène, dont tous les éléments sont égaux et ont la forme géométrique la plus simple : la sphère. La porosité de ce terrain variera avec le mode d'empilement des sphères, qui peut se faire de quatre façons, représentées dans les quatre figures ci-dessous :

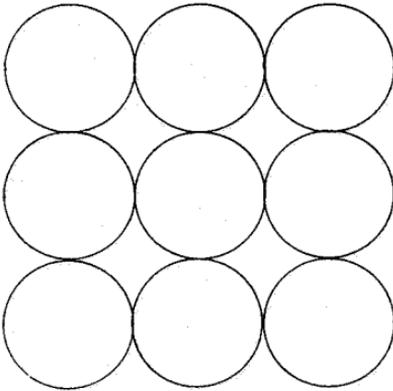


FIG. 1.

1° Une sphère quelconque est en contact avec quatre autres : une de la couche au-dessous, une de la couche au-dessus et quatre de la même couche. Les plans tangents menés par les points de contact délimitent un cube. Or, les rapports de volume entre la sphère et le cube circonscrit sont tels qu'il y a 47.64 % de vide. La porosité d'une couche dont les matériaux sont ainsi arrangés sera donc à peu près la moitié du volume total ;

2° Une sphère quelconque est en contact avec huit autres : une de la couche au-dessous, une de la couche au-dessus et six de la même couche. Ces six contacts dans le plan horizontal, par leurs plans tangents, délimitent un prisme hexagonal, vertical, indéfini, que les deux autres contacts ferment par des faces planes. La porosité est de 59.54 %;

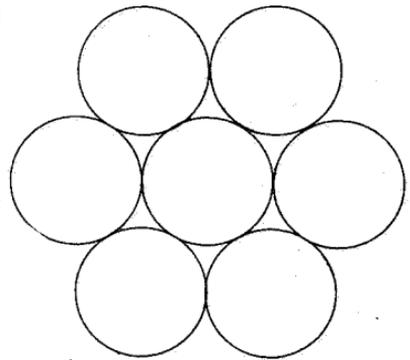


FIG. 2.

3° Une sphère quelconque est en

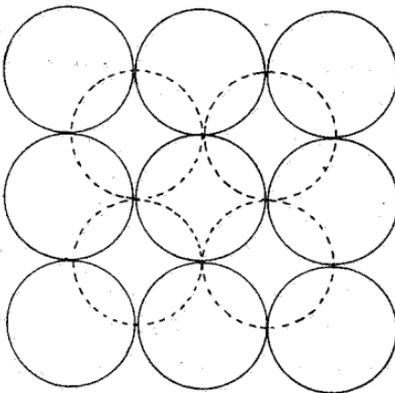


FIG. 3.

contact avec douze autres : quatre au-dessous, quatre au-dessus et quatre de la même couche. Le polyèdre délimité par les plans tangents est le dodécaèdre rhomboïdal; la porosité est de 27.91 %;

4° Une sphère quelconque est en contact avec douze autres : trois de la couche au-dessous, trois de la couche au-dessus et six de la même couche. Le prisme hexagonal ne sera plus terminé par deux faces planes, mais par

des pyramides triangulaires, dont les faces reposent symétriquement sur les arêtes alternes verticales du prisme. La porosité est de 22.04 %.

Il est facile de voir que les arrangements 2, 3 et 4 peuvent être considérés comme dérivés de l'arrangement 1. Dans celui-ci, les sphères de deux rangées consécutives sont opposées, dans le sens qu'on donne à ce mot en botanique pour la disposition des folioles d'une feuille composée. Dans l'arrangement 2, les sphères de deux rangées consécutives, prises dans un même plan horizontal, sont alternes; l'une rangée a chevauché sur l'autre exactement de la longueur d'un rayon

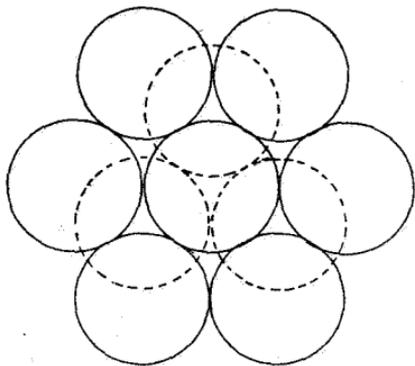


FIG. 4.

ou demi-diamètre; la panse d'une sphère s'intercale dans l'espace entre deux sphères de la rangée précédente; ces espaces ou interstices, de quadrangulaires sont devenus triangulaires sur la coupe horizontale; de là, la diminution de la porosité. Mais deux rangées contiguës, prises dans un plan vertical, sont restées comme dans l'arrangement primitif. Dans l'arrangement 3, chaque couche horizontale est comme dans l'arrangement 1; mais la superposition des couches horizontales est faite d'une autre façon: une couche se superpose à la sous-jacente, non pas au sommet de l'inférieure, mais de façon que chaque sphère insinue sa panse dans l'espace entre quatre sphères sous-jacentes. Enfin, dans l'arrangement 4, il y a eu, dans le sens horizontal, chevauchement comme dans 2, et le même chevauchement dans le sens vertical; une sphère repose sur trois sphères sous-jacentes.

Les relations de volume entre la sphère et le polyèdre circonscrit délimité par les plans tangents au point de contact sont absolument indépendantes de la grandeur des sphères; le grain le plus fin et le grain le plus grossier auront donc pour le même arrangement la même porosité. Mais les *dimensions* des interstices seront en rapport direct avec les dimensions des sphères et décroîtront donc à mesure que ces dimensions diminuent, les phénomènes de capillarité acquièrent une importance proportionnelle beaucoup plus considérable.

En premier lieu, pour des couches de même capacité aquifère à l'état de saturation, c'est-à-dire de même arrangement des grains, il y aura des différences considérables de pouvoir de rétention après drainage. Un sable grossier perdra ainsi la plus grande partie de son eau; un sable suffisamment fin peut retenir la totalité. Au point de vue de l'eau

à recueillir, il est donc de la plus grande importance de connaître la dimension moyenne du grain et de déterminer le pouvoir rétenteur, sans quoi l'on s'expose à de graves mécomptes. C'est une des objections que la Commission spéciale de notre Société a signalées à M. Lambert, lorsqu'il basait un vaste projet de distribution d'eau sur un rendement de 700 litres par mètre cube de craie.

En second lieu, la dimension des grains, et par conséquent des interstices, influe sur la rapidité du courant de passage, sur le débit ; car le frottement est beaucoup plus considérable dans une série de chenaux de petit calibre que dans des canaux plus larges, même quand la somme des espaces libres est égale dans les deux cas. Au point de vue spécial de l'épuration des eaux par filtrage, l'efficacité plus grande d'un grain de petite dimension est si évidente qu'il est inutile d'insister.

Nous avons toujours supposé jusqu'ici le grain de forme parfaitement sphérique et tous les grains exactement semblables entre eux. Nous maintenons cette deuxième condition, mais nous allons modifier la première ; nous aurons donc à considérer une couche homogène, composée de tous grains semblables, mais qui ne sont plus sphériques. Tout écart de la forme sphérique ne peut être qu'un rapprochement vers une forme polyédrique quelconque. Avec des grains sphériques, le tassement se fait de soi-même ; mais avec des grains plus ou moins anguleux, on peut concevoir deux modes très différents d'agencement. Prenant par exemple le cas extrême de grains cubiques, on peut les empiler de manière à réduire la porosité à zéro ; mais il y a également moyen de les arranger en voûtes délimitant des cavités relativement grandes. Ainsi, la première complication ajoutée à la simplicité primitive théorique nous met en présence de deux alternatives, sans qu'on voie le moyen de faire un choix. Toutefois, le premier arrangement représente l'état d'équilibre stable, vers lequel tendent tous les corps. Les expériences de J. H. King (résumées dans notre *Bulletin*, t. IV, 17 juillet 1900, p. 225) avec du calcaire pulvérisé, lequel se fragmente en petites masses cuboïdes, montrent que cette substance donne une porosité moindre que les autres ; d'un autre côté, de nombreuses analyses de sables naturels ont montré que pour les mêmes dimensions de grains, les sables à grains arrondis ont une porosité de 2 à 5 % inférieure à celle des sables à grains anguleux (1). Il semble donc en fait que c'est le second arrangement qui se réalise.

(1) ALLEN HAZEN, *Some physical properties of sands and gravels*, 24th annual report, Massachusetts, 1892.

La deuxième complication consiste à abandonner l'hypothèse de l'égalité de tous les grains entre eux. Quand il y a des grains assez fins pour qu'ils puissent se loger dans les interstices que laissent entre eux les grains de grande dimension, la porosité est considérablement réduite ; cette réduction sera le plus marquée quand le nombre de ces grains fins est juste égal à celui des interstices à obturer. Or, il suffit d'une proportion en poids assez faible de grains fins, pour se rapprocher de cette condition ; les expériences de filtrage à Lawrence, Mass., montrent que les 10 % de grains fins ont autant d'influence que les 90 % plus gros dans l'efficacité filtrante d'un sable (1).

Nous avons considéré jusqu'ici l'effet du sable sur l'eau, au point de vue de la quantité d'eau que le sable peut loger ou retenir et de la résistance variable qu'il présente au passage du liquide. Nous allons faire maintenant l'inverse, considérer l'influence de l'eau sur le sable au point de vue spécial de la mobilité de la masse, et nous serons ainsi au cœur de la question des sables boullants.

Un composé de grains sphériques tous égaux doit réaliser le maximum de mobilité ; des différences de dimensions semblent devoir assurer un peu plus de stabilité ; nous avons vu que l'intervention d'un élément fin réduit la porosité, ce qui revient à dire que le tassement est plus compact et partant plus stable. Cette plus grande compacité est également l'une des deux alternatives possibles avec des éléments anguleux, qui peuvent s'enchevêtrer, se coincer les uns dans les autres.

L'intervention de l'eau semble, à première vue, avoir nécessairement pour effet d'augmenter l'instabilité ; la mobilité de l'élément liquide ne peut que faciliter les mouvements de roulement et de glissement des particules solides, qui perdent en outre, par le fait de leur immersion, une partie de leur poids.

Mais dans ces considérations, il n'a pas été tenu compte des phénomènes de capillarité. Une masse de sable, imbibée de juste la quantité d'eau qu'elle peut retenir par capillarité, loin d'acquérir une mobilité plus grande, sera devenue au contraire beaucoup plus stable, car l'écartement des grains entraîne dorénavant l'extension des lames liquides qui se sont logées dans les espaces capillaires, ce qui nécessite, comme on sait, une force relativement considérable. Un sable à grains grossiers ne peut retenir qu'une quantité assez faible d'eau ; le poids du grain est considérable par rapport à la force capillaire ; la solidité de la masse humectée sera donc peu marquée. Mais au fur et à mesure que le volume diminue, le poids diminue aussi, tandis que la quantité

(2) ALLEN HAZEN. *loc. cit.*

d'eau, retenue par capillarité et transformée en lames élastiques de fixation, augmente. Nous arrivons donc à ce résultat paradoxal que plus le grain est fin et plus on donne de l'eau à la masse, plus celle-ci devient stable.

Aussitôt que la quantité d'eau dépasse l'eau de capillarité, le surplus, par le seul fait de son poids, doit tendre à diminuer la stabilité. Et quand on considère que l'eau dans le sous-sol est toujours animée d'une certaine vitesse et qu'elle exerce alors une action d'entraînement mécanique, d'autant plus efficace que le grain est plus petit, on voit qu'on a les éléments pour aborder l'étude des phénomènes concrets.

J'en signalerai un, qui a frappé tous ceux qui ont participé à notre excursion de Hastings en 1899 : les hautes falaises de sable, à parois verticales, avec failles et crevasses. Il est probable qu'elles sont un exemple de sable anguleux, tassé, compact et imbibé de juste la quantité d'eau capillaire. La détermination des dimensions des grains, de leur forme, de leur régularité, de l'humidité de la masse, offrirait donc un certain intérêt en ce qu'il permettrait d'expliquer un phénomène géologique assez curieux.

Quant à l'application des notions théoriques aux sables boullants, on la trouvera dans un travail spécial : *Discussion sur les sables boullants à la Société des ingénieurs américains, 1900*, dont je m'occuperai plus loin.

J'ai prié M. H. van Aubel, mon ancien professeur de mathématiques à l'Athénée d'Anvers, de bien vouloir calculer et vérifier les porosités des quatre cas signalés au début de ce travail. M. van Aubel a eu l'obligeance de me remettre la note que nous reproduisons aux pages ci-après.

NOTE

SUR LE

CALCUL DES POROSITÉS DANS LES DIVERS TYPES
DE DISPOSITIFS SABLEUX

PAR

H. VAN AUBEL.

1° *Cube* (6 contacts). — Si dans l'ensemble on considère un cube ayant pour sommets les centres de 4 sphères tangentes supposées placées dans un plan horizontal et surmontées de 4 sphères semblables de telle sorte que les diamètres verticaux de 2 sphères superposées ne forment qu'une ligne droite, la porosité de l'ensemble reviendra au rapport de la partie vide de ce cube au cube lui-même.

Volume du cube = $8R^3$ (R rayon de chaque sphère).

La partie pleine ou solide du cube se compose de 8 pyramides sphériques trirectangles; elle vaut par conséquent $\frac{4}{3}\pi R^3$. La partie vide = $8R^3 - \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}R^3(6 - \pi)$. Donc :

$$\text{Porosité} = \frac{\frac{4}{3}R^3(6 - \pi)}{8R^3} = \frac{6 - \pi}{6} = 0.4764 \text{ ou } \underline{47.64\%}.$$

2° *Prisme droit à base hexagonale régulière* (8 contacts). — Dans ce cas, la porosité revient à celle d'un prisme droit qui a pour base un triangle équilatéral (dont les sommets sont les centres de trois sphères tangentes entre elles) et pour hauteur $2R$. La surface de ce triangle équilatéral a pour mesure $R^2\sqrt{3}$;

$$\text{Volume du prisme droit} = R^2\sqrt{3} \times 2R = 2R^3\sqrt{3};$$

sa partie pleine se compose de 6 pyramides sphériques égales, ayant

chacune deux angles dièdres droits et le troisième = 60° . Le volume total de ces 6 pyramides est

$$\pi R^3 \times \frac{2 \times 90^\circ + 60^\circ - 180^\circ}{90^\circ} = \frac{2}{3} \pi R^3,$$

donc la partie vide de ce prisme droit est

$$2R^3\sqrt{3} - \frac{2}{3}\pi R^3 = 2R^3\left(\sqrt{3} - \frac{\pi}{3}\right);$$

par suite :

$$\text{Porosité} = \frac{\sqrt{3} - \frac{\pi}{3}}{\sqrt{3}} = \frac{9 - \pi\sqrt{3}}{9} = \frac{9 - 5.4412}{9} = 0.3954 \text{ ou } \underline{39.54\%}.$$

5° *Dodécaèdre rhomboïdal* (12 contacts). — La porosité revient à celle d'une pyramide régulière à base carrée, dont la base = $4R^2$ et la hauteur = $R\sqrt{2}$.

$$\text{Volume de cette pyramide} = \frac{4}{3} R^3 \sqrt{2}.$$

La partie pleine de la pyramide se compose de 5 pyramides sphériques, dont l'une, correspondant au sommet de la pyramide, a pour angle solide celui de l'octaèdre régulier, et dont les 4 autres valent chacune la moitié de la 1^{re}. Or l'inclinaison de 2 faces adjacentes de l'octaèdre régulier est $109^\circ 28' 16''$; donc l'un des angles du triangle sphérique, base de chacune des 4 pyramides sphériques, est $109^\circ 28' 16''$ et chacun des 2 autres la moitié, ce qui fait pour la somme des 3 angles $218^\circ 56' 32''$. Le volume de chacune des 4 pyramides sphériques égales est par conséquent :

$$\frac{1}{6} \pi R^3 \times \frac{218^\circ 56' 32'' - 180^\circ}{90^\circ} = \frac{1}{6} \pi R^3 \times \frac{140192}{324000}.$$

Le volume total des 5 pyramides sphériques = 6 fois le volume précédent ou

$$\pi R^3 \times \frac{140192}{324000}.$$

La partie vide de la pyramide régulière à base carrée étant

$$\frac{4}{3} R^3 \sqrt{2} - \pi R^3 \times \frac{140192}{324000} = R^3 \left(\frac{4}{3} \sqrt{2} - \frac{140192}{324000} \pi \right),$$

la porosité sera exprimée par

$$\frac{\frac{4}{3}\sqrt{2} - \frac{140192}{324000}\pi}{\frac{4}{3}\sqrt{2}} = \frac{864000 - 140192\pi\sqrt{2}}{864000}$$

$$= \frac{864000 - 622857}{864000} = 0,2791 \text{ ou } \underline{27,91\%}.$$

4° *Pyramide droite à base hexagonale régulière* (12 contacts). — La porosité revient à celle d'un tétraèdre régulier ayant pour sommets les centres de 4 sphères disposées en pyramide triangulaire. L'arête de ce tétraèdre régulier étant $2R$, la surface de sa base aura pour mesure $R^2\sqrt{3}$; sa hauteur est un des côtés de l'angle droit d'un triangle rectangle dont l'hypothénuse est $2R$ et l'autre côté $\frac{2R}{3}\sqrt{3}$; cette hauteur est donc

$$\sqrt{4R^2 - \frac{12R^2}{9}} = \frac{2R}{3}\sqrt{6},$$

et le volume du tétraèdre régulier

$$= R^2\sqrt{3} \times \frac{2R}{9}\sqrt{6} = \frac{2R^3}{3}\sqrt{2}.$$

La partie pleine de ce tétraèdre se compose de 4 pyramides sphériques égales, ayant chacune pour base un triangle sphérique équilatéral, et l'on trouve par la trigonométrie que chaque angle d'un triangle sphérique équilatéral est de $70^\circ 31' 45''$; donc la partie pleine du tétraèdre

$$= \frac{4}{6}\pi R^3 \times \frac{211^\circ 35' 9'' - 180^\circ}{90^\circ} = \frac{2}{3}\pi R^3 \times \frac{113709}{324000}$$

et la partie vide

$$= \frac{2R^3}{3}\sqrt{2} - \frac{2}{3}\pi R^3 \times \frac{113709}{324000} = \frac{2R^3}{3}\left(\sqrt{2} - \frac{113709}{324000}\pi\right);$$

donc :

$$\text{Porosité} = \frac{\frac{2R^3}{3}\left(\sqrt{2} - \frac{113709}{324000}\pi\right)}{\frac{2R^3}{3}\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} - \frac{113709}{324000}\pi}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{648000 - 113709\pi\sqrt{2}}{648000} = \frac{324000 - 252598}{324000} = 0,2204 \text{ ou } \underline{22,04\%}.$$

RESUME

DE LA

Discussion des Sables boullants par les Ingénieurs américains

PAR

Ad. KEMNADirecteur de l'*Antwerp Water Works Company*.

—

Le numéro de juin 1900 des *Transactions of the American Society of Civil Engineers* (vol. XLIII) publie un travail de M. William B. Landreth, sur la réfection d'un bief du canal de l'Erié (1). En parlant des matériaux enlevés pour le creusement, l'auteur mentionne incidemment ce qu'il faut entendre par un vrai sable boullant (*true quicksand*). La discussion a été ouverte par M. Allen Hazen, l'ingénieur bien connu en Europe par ses enquêtes sur les distributions d'eau avec filtrage au sable. M. Hazen s'est uniquement attaché à cette question des sables boullants et en a donné une explication autre que celle admise par M. Landreth. Les orateurs subséquents ont naturellement donné leur avis, appuyé par des exemples puisés dans leur pratique; plus tard, des correspondants sont intervenus. Le procès-verbal de cette séance est ainsi devenu, un peu inopinément, la contribution la plus importante à l'étude théorique et pratique des sables boullants.

Le travail original de M. Landreth intéresse plus spécialement les ingénieurs; mais notre Société de géologie a certains titres lui permettant de s'immiscer dans les grandes entreprises; nous sommes souvent consultés comme aréopage scientifique dans ce domaine et nous distribuons équitablement l'éloge ou le blâme; en outre, et ceci est plus important, nous recueillons les faits acquis pour l'édification de l'avenir. Pour toutes ces raisons, il est opportun de dire quelques mots de la question, envisagée au point de vue de l'ingénieur.

La section de Jordan du canal de l'Erié traverse, sur une longueur de 5 milles (8,000 mètres), un district marécageux. Le sol se compose comme suit : vase 2 à 3 pieds; mélange de marne et d'argile, variant de 2 à 50 pieds; gravier concrétionné (*cemented gravel*).

Le canal a été construit de 1816 à 1825 et la section de Jordan

(1) WILLIAM B. LANDBETH, *The improvement of a portion of the Jordan level of the Erie canal*.

présenta de grandes difficultés. En 1836, on élargit le canal et alors les difficultés devinrent si considérables que trois entrepreneurs abandonnèrent successivement le travail, qui dut être repris par le Gouvernement. Il fallut construire un lit de fascines pour recevoir les déblais de l'excavation et servir de fondation aux talus. Mais le travail ne fut pas poussé jusqu'à la profondeur normale et le halage des bateaux dans cette section donnait lieu à une majoration de frais de 50 %.

C'est pour porter remède définitivement à cette situation qu'on entreprit de nouveaux travaux en 1896. Le plafond du canal devait être abaissé de 4 pieds; le plan d'eau, et par conséquent aussi les berges, relevées d'autant, de façon à gagner 2 pieds. Pour la sous-section à laquelle se rapporte la communication de M. Landreth, le travail fut entrepris pour 154,471 dollars.

On commença par vider le canal, mais la boue, accumulée en barages, maintint au delà de 2 pieds d'eau dans le fond. Il fallut pomper nuit et jour avec plusieurs fortes pompes centrifuges pendant plusieurs mois.

Quand on passa au travail d'approfondissement, ce fut une autre affaire. Les anciennes berges dévalèrent dans la tranchée; tous les ouvrages d'art, culées de pont, etc., se mirent également à descendre ou à glisser. A plusieurs reprises, après une journée de travail où des centaines d'ouvriers avaient excavé, on constata que le fond de la tranchée s'était élevée depuis le matin. Des pilotis battus jusqu'à refus se relevaient de plusieurs pieds en une nuit. Toute surcharge sur les digues les faisait s'en aller et, par exemple, il fut impossible d'employer des excavateurs mécaniques, car les berges ne pouvaient en supporter le poids. Étais, palplanches et pilotis s'obstinaient à vagabonder du jour au lendemain sous la pression latérale des terres, ouvrant ainsi la voie aux berges et même à un hôtel avoisinant.

Ces résultats de la première campagne suggérèrent quelques réflexions aux ingénieurs. L'évacuation des eaux pompées se faisait d'une façon très simple : ces eaux allaient dans le marécage. Mais elles revenaient par infiltration dans la tranchée, ce qui constituait un cercle vicieux. En outre, la sursaturation ne contribuait pas peu à la mobilité du sol. On reconnut la nécessité de se débarrasser définitivement, non seulement des eaux une fois pompées, mais de toutes les eaux du marécage, qu'on se mit à drainer.

Je passe sur toute une série de misères variées; mais il faut pourtant signaler un fait curieux. On avait réussi à mettre sous profil une partie du canal pendant la période d'interruption de la navigation. L'ouvrage

tint quand l'eau fut réintroduite. L'entrepreneur fit venir par bateau les matériaux pour la campagne prochaine et les déposa sur les berges. Quand on mit le canal à sec pour achever le travail, les berges glissèrent de nouveau par la surcharge, en même temps que, par la pression, le fond même du canal se relevait.

Finalement, on eut recours à un moyen héroïque comme coût. Au pied de chaque talus, on battit une ligne serrée de pieux de 30 à 50 pieds de long, de façon à atteindre le sous-sol solide : le gravier; pour empêcher les rangées latérales de pieux de se déplacer vers le milieu de l'excavation, on plaça à des intervalles de 8 pieds, en travers du fond, des poutres allant d'un bord à l'autre; au milieu de sa longueur, chaque poutre était fixée à un pieu battu; la poutre ne pouvait donc pas se déplacer ni se courber vers le haut; pour empêcher également les mouvements latéraux horizontaux, on mit encore au milieu des entretoises. En un mot, on garnit le fond du canal, entre les deux rangées de pieux serrés au pied des talus, d'un grillage de poutres.

Le talus lui-même fut soutenu par des palplanches de 4 pieds à 45°, reposant sur la tête des pieux et formant par conséquent tablier.

Comme il a été dit, l'entreprise comportait 154,471 dollars; en réalité, le travail a coûté près de 607,000 dollars.

« Cette leçon vaut bien un fromage, sans doute », disait le renard au corbeau. Pour 450,000 dollars, on peut également désirer apprendre quelque chose; et plusieurs des ingénieurs ont dégagé la morale de cette histoire. D'après M. G. W. Rafter, c'est le résultat de l'administration de grands travaux publics par la politique. M. E. P. North aurait exécuté l'entrepreneur jusqu'au dernier centime. M. J. G. Tait, par contre, rappelle que le sous-entrepreneur a fait faillite, que le travail final est d'excellente qualité et que le rôle de l'ingénieur n'est pas de pressurer l'entrepreneur pour obtenir quelque chose sans paiement. Mais les deux premiers orateurs avaient encore dit autre chose : l'imperfection des plans, devis et cahiers de charges, l'absence d'une étude systématique préalable du sol par des séries de sondages, et beaucoup de faits analogues. Quand on voit l'entrepreneur demander 5,000 dollars pour drainer plus de 6 milles (9,600 mètres) de marais et toucher 46,000 dollars supplémentaires pour ce seul poste, il faut bien reconnaître que la différence est un peu forte. Le déversement des eaux d'épuisement dans le marais surélevé, pendant qu'on creusait le sous-sol meuble et poreux, représente un tonneau des Danaïdes sur une vaste échelle et en sens inverse. On ne peut qualifier que tout au moins de maladresse, de permettre à l'entrepreneur de surcharger les berges,

surtout après les désagréables leçons qu'on avait déjà reçues. Bref, cela a été, sur toute la ligne, le mépris le plus complet des renseignements que peut fournir la géologie, et une impardonnable impéritie. On voit ce que cela a coûté.

Le passage du travail de M. Landreth qui a trait aux sables bouillants est rédigé comme suit (p. 577) :

« A l'état de saturation, l'argile se comportait comme du sable » bouillant, et plusieurs personnes lui donnèrent ce nom; mais à la » connaissance de l'auteur, on ne rencontra pas de vrai sable bouillant, » c'est-à-dire un mélange de grains arrondis de sable avec de l'argile, » le sable prédominant.

» On rencontra par places un sable pur et fin, que la pression de » l'eau relevait en geysers minuscules et que, à première vue, on » aurait pu prendre pour du sable bouillant; mais, d'après l'expé- » rience de l'auteur, le vrai bouillant, qui passe à travers des fissures » arrêtant le sable pur, est toujours mélangé avec de l'argile fine. »

A cette définition, M. Allen Hazen en oppose une autre. Le bouillant est un sable à grains égaux, sursaturé d'eau. Cette sursaturation a pour effet d'écartier quelque peu les grains et produit par conséquent leur mobilité.

Cette définition diffère de celle de M. Landreth en plusieurs points.

D'abord, l'élément argile est écarté. L'argile a toujours une tendance à se masser; dans certaines conditions, et notamment sous de grandes inégalités de pression, elle peut couler lentement comme une masse pâteuse; mais l'eau ne forme jamais avec elle un mélange intime et homogène, capable de couler par de minces fissures comme un sable bouillant. La possibilité de la présence d'une certaine proportion d'argile n'est pas absolument à nier, mais cette présence n'est nullement indispensable, et il serait plus juste de dire que le caractère bouillant se manifeste malgré l'argile. Du reste, cette présence même est loin d'être établie en fait. Le plus souvent, les termes minéralogiques sont appliqués par les ingénieurs sur les seuls caractères apparents et sans une étude approfondie. C'est ainsi que l'examen microscopique a permis à M. Hazen de reconnaître comme sable pur des échantillons lui remis comme des mélanges fortement argileux; l'erreur provenait de la petitesse du grain ($0^{\text{mm}},04$). L'argile, au contraire, a des particules beaucoup plus petites; elles ne se laissent pas distinguer avec un grossissement de 350 (Hillgard); les plus fines ont un diamètre de $0^{\text{mm}},0001$, soit un dixième de micron (Whitney). J'ajouterai que les premières fortes pluies, après une période de sécheresse, amènent dans la rivière Ohio

des particules encore dix fois plus petites, un centième de micron (1); mais on se demande comment des dimensions de cet ordre peuvent être appréciées, même approximativement.

On remarquera, non sans quelque surprise, l'omission, dans la définition de Hazen, de la finesse du grain. Il reconnaît que, généralement, les sables boullants sont les plus fins, mais il déclare expressément que cette condition n'est pas nécessaire et que des sables grossiers peuvent prendre les mêmes allures.

Il en est de même de la régularité de la forme du grain. Alors que Landreth mentionne dans sa diagnose la sphéricité des particules, Hazen prétend au contraire que les grains très anguleux de quartz concassé ou écrasé peuvent avoir la même mobilité.

Ainsi, il y a trois différences par omission : absence de l'argile, caractère chimique ; dimensions et forme, caractères physiques.

La quatrième différence est l'addition de la notion de « sursaturation ». On se figure facilement une masse de sable imbibée d'une quantité d'eau insuffisante pour remplir tous les interstices et qui sera alors « non saturée » ; imbibée d'une quantité d'eau suffisante pour remplir ces interstices, et alors on aura la saturation ; mais il semble évident que c'est là un état-limite, et l'on ne voit pas bien, au premier abord, comment il puisse y avoir un troisième état de sursaturation.

M. Hazen explique sa pensée par un exemple : les filtres à sable dits « mécaniques » ou « américains ». Dans une séance de l'année 1900, je vous ai donné une description sommaire de ces appareils, assez répandus aux États-Unis, pour le filtrage des eaux traitées par l'alun : l'eau est foulée sous pression à travers une couche de sable dans un réservoir en tôle. Le sable se tasse d'une façon tellement compacte qu'il est impossible de pousser un bâton seulement de quelques centimètres dans la masse ; la surface garde à peine la trace des pas quand on marche dessus. Par l'accumulation des sédiments, le filtre se ferme et on le nettoie en renversant le courant. Alors la masse semble se distendre, gonfler et n'offre plus aucune résistance à la pénétration. Il est clair que les grains se sont quelque peu écartés les uns des autres, agrandissant les interstices, qui se sont remplis d'eau. Par rapport au premier état de tassement, on peut dire que les grains sont plus ou moins en suspension dans l'eau. On peut concevoir une vitesse ascensionnelle de l'eau, telle que le frottement contre le grain soit égal à son excès de poids dans l'eau : on aura le boullant idéal.

Les vitesses nécessaires pour amener cet état d'équilibre instable du

(1) G. W. FULLER, *Louisville Report*, 1898, p. 62.

grain varie nécessairement avec les dimensions du grain et peuvent être calculées. Le tableau ci-dessous donne ces diverses vitesses en mètres de colonne d'eau débitée par vingt-quatre heures :

Grains de	0 ^{mm} ,50	250 mètres d'eau par vingt-quatre heures.		
»	0 ^{mm} ,40	160	»	»
»	0 ^{mm} ,30	90	»	»
»	0 ^{mm} ,20	40	»	»
»	0 ^{mm} ,10	10	»	»
»	0 ^{mm} ,05	2,5	»	»
»	0 ^{mm} ,03	0,9	»	»

Les termes supérieurs de cette série comportent des vitesses excessives; mais les dernières vitesses existent sûrement dans la nature. La grosseur du grain qui peut devenir boulant est uniquement fonction de la vitesse du courant d'eau; le sable fin deviendra donc plus facilement boulant; mais le sable grossier peut le devenir aussi, et c'est, je crois, ce qu'on a constaté avec le bruxellien. M. Hazen a donc eu raison d'écarter de sa définition la notion de dimension.

De même, la forme du grain ne peut avoir qu'une influence restreinte. Et quand on réfléchit, on trouve que la sphéricité n'est pas une condition favorisant la mobilité; elle réalise, en effet, pour le maximum de masse, le minimum de surface et, par conséquent, de frottement. Or, un de nos correspondants allemands signale que l'irrégularité du grain, amenant des surfaces d'impact plus grandes, constitue un élément important dans la production de la mobilité.

On peut considérer la notion de sursaturation comme relative; une masse de sable, dont les grains ne sont pas agencés de façon à réaliser le minimum géométrique de porosité, est sursaturée par rapport à cet agencement minimum; elle doit devenir d'autant plus stable et moins mobile qu'elle se rapproche davantage de cet état. Supposons du sable avec grains de 0^{mm},03 de diamètre en une couche de 3 pieds d'épaisseur et avec une porosité de 42 %, exactement saturée d'eau. Supposons que cette couche se tasse, de façon à réduire sa porosité à 40 %; cela signifie qu'il va y avoir un excès d'eau, que la couche sera dans un état de sursaturation tant que cet excès d'eau ne se sera pas échappé; d'après le calcul, une demi-heure. Voilà donc une couche qui, entre deux états stables, va être bouillante pendant un certain temps.

Quelles peuvent être les causes dérangeant l'équilibre primitif pour produire un équilibre plus stable? Quand nous voulons tasser des matériaux meubles, nous imprimons au vase des mouvements de trépidation,

dès secousses. Les trépidations peuvent donc transformer du sable convenable en une masse bouillante.

Et ce paradoxe se trouve confirmé par les faits. Dans la suite de la discussion, M. North a rappelé un travail de Charles L. Mc. Alpine (1), donnant un exemple de sable devenant bouillant, où l'on avait soin de cesser le camionnage et de retirer les ouvriers aussitôt qu'on s'apercevait de quelque mouvement; « il n'y a rien à gagner à continuer le travail quand il s'agit de cette importante question de donner au sol le repos nécessaire; après une nuit de repos, pendant laquelle il y a eu départ de beaucoup d'eau dans les tranchées de drainage, le sol est de nouveau en bon état, et, pour employer l'expression des ouvriers, se travaille à la pelle comme de la cendrée. Des mottes de cette terre, bien cohérentes et paraissant sèches, se mouillent et se transforment en une masse pâteuse dans les wagonnets qui les transportent, de façon qu'il fallait mettre des hommes supplémentaires pour vider les tombereaux au lieu de déversement ».

Il est assez curieux de voir M. North citer ces faits, non comme un argument en faveur de la théorie de M. Hazen, mais, au contraire, comme une objection. C'est que l'auteur de 1881, M. Mc. Alpine, insiste sur la nature argileuse du sol. Seulement, on peut se demander s'il n'y a pas ici une erreur analogue à celle déjà relevée par Hazen, et il y a un détail qui porte à le croire. Le sol est décrit comme de couleur grisâtre (couleur de plomb) à l'état naturel, mais presque blanc quand il est bien sec; « il est si complètement exempt de sable qu'il peut être employé à nettoyer l'argent et à le polir ». Ces deux caractères semblent s'accorder beaucoup mieux avec du sable très fin qu'avec de l'argile. Il y a également l'affirmation « que l'agitation cause une rétention plus tenace de l'eau par le sol ». L'explication est probablement là suivante : le sol saturé ne laisse pas suinter l'eau qu'il retient par capillarité; les secousses amènent, comme on l'a vu, la sursaturation et l'eau devient visible. Encore un exemple de la difficulté de bien voir, quand on n'est pas guidé dans l'interprétation par une notion théorique.

Les vues de Allen Hazen forment donc un tout complet et logiquement coordonné et s'accordant bien avec les faits; mais englobent-elles tous les cas? La théorie est-elle exclusive et n'y a-t-il pas des fois où une explication autre que la sursaturation pourrait être admise? Outre M. Hazen, neuf autres ingénieurs ont pris part à la discussion, soit oralement, soit par correspondance; comme il y a au moins une demi-douzaine de points à prendre en considération dans les deux définitions

(1) TRANSACTIONS AMER. SOC. CIV. ENG., 1881, X, p. 275.

proposées, cela fait $9 \times 6 = 54$ opinions à émettre; dans ces conditions, il est impossible de s'attendre à un accord parfait et des divergences sont inévitables.

Malgré l'intérêt de la plupart de ces communications, généralement basées sur des constatations faites au cours de travaux d'une certaine importance, nous ne pouvons signaler que les points tout à fait saillants et la tendance générale des opinions. Toutefois, en bonne justice, une exception devait être faite en faveur de M. Landreth; il eût été intéressant de voir comment il aurait défendu sa théorie. Mais dans sa réplique, il ne parle que des travaux et des devis; pour les sables boullants, il se borne à dire que la discussion a traité le sujet scientifiquement et pratiquement et qu'elle constitue une addition importante à la littérature spéciale du sujet.

Ce qui a rencontré le plus d'objections, c'est le rôle tout à fait secondaire attribué à l'argile. Mais, quand on examine les arguments, on constate que tout se borne d'ordinaire à l'affirmation du caractère boullant de couches de sable avec beaucoup d'argile. Nous avons déjà vu avec quelle prudence l'on doit accepter les renseignements sur la composition minéralogique du sol, et l'un des orateurs, M. G. Hill, insiste, avec raison, sur les défauts de la nomenclature usuelle des ingénieurs, qui se laissent toujours quelque peu influencer, dans leurs appréciations à ce sujet, par ce que dit l'entrepreneur, lequel n'est souvent que l'écho des ouvriers. La plupart des exemples cités à l'appui des objections ne paraissent pas très pertinents; le plus typique est celui que nous avons déjà cité, emprunté par M. North à une ancienne communication de M. Mc Alpine; et cette objection se laisse, sans beaucoup d'efforts et par une interprétation rationnelle, transformer en argument favorable. Néanmoins, il y a lieu de faire remarquer, une fois de plus, que la théorie de Hazen n'a pas pour conséquence nécessaire de dénier le caractère boullant aux sables réellement argileux; il est possible, probable même, que parmi les exemples cités, il y ait réellement des cas de ce genre. Quand il se fait un dépôt régulier et homogène d'argile et de sable, ce dernier élément sera le plus souvent extrêmement fin, plus fin que ne le sont d'ordinaire les sables purs. On comprend bien, dès lors, comment l'un des orateurs, M. Tait, a pu dire que le boullant avec argile est le plus difficile à arrêter; seulement, la cause est dans les dimensions très réduites des éléments et nullement dans une action spécifique de l'argile, dont personne, du reste, ne fait mention. Or, c'est précisément là l'explication à fournir par ceux qui considèrent la présence de l'argile comme nécessaire.

La question de la sphéricité du grain a également été débattue avec une tendance assez marquée à attribuer une certaine importance à la régularité de forme dans la production de la mobilité. M. Owen raconte qu'il a eu à construire une de ces maisons élevées de New-York sur un sable renseigné comme boulant; mais, le sable se montrant anguleux à l'examen, il a risqué de faire des fondations ordinaires, qui ont parfaitement bien tenu; il n'aurait pas osé agir ainsi avec des grains arrondis. M. Tait dit que le boulant à grains anguleux est plus facilement retenu que le boulant à grains arrondis. Mais, dans une lettre, M. Richardson, du laboratoire d'essai à New-York, arrive à la rescousse avec des analyses microscopiques: des sables très boullants sont fortement anguleux. Ces analyses démontrent, en outre, qu'un élément très important est l'égalité de dimensions des grains, comme le porte la diagnose de Hazen et qu'aucun des autres orateurs ne semble avoir relevée. Les sables à grains égaux ont le plus de porosité, parce qu'ils ne possèdent pas de matériaux plus petits pour se loger dans les interstices entre les grains ordinaires; ils renferment donc beaucoup plus d'eau et sont donc relativement plus mobiles.

Le rôle absolument prépondérant attribué à l'eau a donné lieu à certaines réserves. M. North fait observer que la cessation du courant ascensionnel, en permettant au sable de se remettre en place, devrait supprimer le caractère boullant, ce qui n'est certainement pas le cas dans la réalité. Il admet l'intervention de l'eau, « mais les relations » avec la masse terreuse sont mystérieuses dans certains sables boullants; tous deviennent stables en se desséchant, mais parfois il y en a, surtout ceux qui contiennent de l'argile, qui bougent après qu'ils semblent secs ». C'est ici qu'il cite Mc Alpine. M. Whinery raconte le cas d'une tranchée de chemin de fer dans l'État d'Indiana, dont le creusement a été arrêté par des sables boullants, très fins, sans argile, saturés d'eau, mais d'eau stagnante; des conditions de niveau ne permettraient pas, du reste, d'admettre de courant ascensionnel; un drainage méthodique eut raison de la difficulté. Mais ici aussi, les opposants ont à leur tour trouvé des contradicteurs. M. Hazen a peut-être eu tort de prendre dès le début le cas extrême d'un mouvement ascensionnel, alors que, dans la nature, ce sont bien plus généralement des mouvements latéraux qui se présentent.

M. Hill a insisté avec beaucoup de raison sur l'importance d'un dégagement dans une situation quelconque qui permet à l'eau de se mettre en mouvement; parlant après M. Owen, il a dit que les fondations sur sable boullant n'offraient aucun danger, pourvu qu'on suppri-

mât tout moyen de dégagement ; il a cité le cas d'un bâtiment à New-York qui s'est mis à s'affaisser par le prélèvement d'eau dans des puits, affaissement qui s'est arrêté aussitôt qu'on a cessé de pomper.

M. Cooley estime que le caractère boulant dépend de l'eau plutôt que des qualités inhérentes aux matériaux solides ; ce qui l'a surtout porté à accorder une valeur prépondérante à cette cause, c'est qu'il a foncé des centaines de pilotis uniquement au moyen d'un jet d'eau. Il semble que, dans sa pensée, une couche devenant bouillante passe par les phases suivantes : un travail de tranchée met à nu une portion de couche sableuse à grains fins, saturée d'eau ; il y a asséchement rapide de la portion ainsi exposée, éboulement restreint et crevassement ou faillage exposant de nouvelles portions de surfaces croissantes. Ainsi de proche en proche, des sections de sable arrivent ; non par un transport en masse de toute la couche, mais en intéressant graduellement des points de plus en plus éloignés de l'endroit primitif où s'est faite la rupture d'équilibre.

La plupart de ceux qui ont participé à cette discussion ont constaté, et quelques-uns ont déploré le manque presque total de renseignements précis ; il n'y a pas eu une voix discordante pour soutenir que tout était pour le mieux dans le meilleur des mondes techniques et que les ingénieurs n'avaient plus rien à apprendre. Y aurait-il de l'exagération à soutenir que les sables bouillants font perdre chaque année quelques centaines de millions dans le monde entier ? Et quatre-vingt-dix-neuf fois sur cent, on ne sait même pas à quelle substance, sable ou argile, on a affaire ; une question que quelques minutes de microscope permettraient de résoudre, ou pour laquelle, quand on veut faire du luxe, on aura recours à une analyse chimique pouvant bien coûter 50 francs. Dans combien de cas, même pour des travaux importants, s'est-on donné la peine de faire déterminer les dimensions des grains ; on dit « fin », « très fin », comme l'entrepreneur, comme le terrassier, mais on ne conçoit même pas la possibilité d'exprimer cette grandeur en chiffres concrets. Est-il étonnant que l'on ait des déboires ? Dans ce canal de l'Erié, ces déboires ont été exceptionnels, comme les difficultés du terrain et le manque de préparation scientifique. En venant exposer, un peu naïvement, toutes ces tribulations, M. Landreth avait surtout en vue les efforts déployés pour vaincre des difficultés sans cesse renaissantes ; mais la discussion a tout de suite porté au cœur même de la question, à la cause de toutes ces difficultés : les faits doivent être constatés avec toute la précision que comportent les méthodes de la science moderne. Le martyr des ingénieurs du canal de l'Erié n'aura

pas été inutile, si la leçon a profité à leurs collègues et à la corporation en général. Même dans les Ponts et Chaussées, l'Église souffrante prépare l'Église triomphante.

M. le *Président* se félicite d'avoir entendu la communication de M. Kemna, dont il apprécie la haute portée générale. Il estime que c'est là une entrée en matières très pratique de l'étude envisagée et qui fait bien augurer de l'avenir.

L'orateur, qui habite la province, étant obligé de quitter la séance, la discussion de sa communication est remise à une prochaine réunion.

M. *Van Ertborn* émet la réflexion que l'exposé des travaux du canal de l'Érié constitue la preuve d'une absence d'expérience pratique assez déconcertante de la part des ingénieurs chargés de ce travail. Il établit une comparaison entre ces travaux et ceux exigés par les fondations de la tour de la cathédrale d'Anvers qui, bien que construite dans le bouillant, n'a donné lieu à aucun déboire, par suite des dispositions techniques spéciales prises lors de l'établissement de ses fondations. Le massif de celles-ci constitue d'ailleurs une pyramide rectangulaire tronquée, de fort petites dimensions par rapport au volume de l'édifice qu'elle soutient ; l'angle de la pyramide est tout au plus de 45°.

M. *van Ertborn* donne ensuite lecture du travail suivant :

ÉTUDE SUR LES SABLES BOULANTS

ET SUR

LE MOYEN D'EN PRÉVENIR L'INVASION PAR ASSÈCHEMENT PROGRESSIF

PAR

le baron O. VAN ERTBORN.

La question des sables mouvants est toute d'actualité en ce moment.

Tout le monde sait ce qu'on entend par *sables mouvants* ou *boulants*. Exposons en quelques mots les causes de cette manière d'être des sables.

Les sables résultent de la décomposition des roches ; ils peuvent donc être constitués de nombreux éléments. Le quartz est le plus abondant au point de vue minéralogique. Nous ne nous occuperons que de

celui-ci. Les grains de quartz sont souvent mêlés à des grains de glauconie : silicate de fer, qui aurait été fixé par des Foraminifères.

Le pourcentage des grains de glauconie est relativement faible dans nos couches d'âge éocène, mais dans la partie grossière du Diesien et surtout dans les sables à *Pectunculus pilosus* des environs d'Anvers, la quantité de glauconie est si considérable que la couche prend une belle teinte noir verdâtre.

La densité du quartz est de 2.65; celle de la glauconie est moindre; il s'ensuit que ces corps perdent plus d'un tiers de leur poids dans l'eau.

Ce fait est très important dans la question qui nous occupe, comme nous le verrons plus loin.

Les sables sont formés de grains de toutes dimensions, mais généralement de grains uniformes dans la même couche et au même niveau. Il en est dont les grains sont de petits graviers, comme les *grains de riz* de la base du Rupélien inférieur; d'autres sont rudes au toucher, comme les sables bruxelliens; il en est de doux, comme ceux du Ledien. Il est aussi des sables à grains très fins, presque pulvérulents.

Le sable le plus fluide de nos couches tertiaires est le sable vert landenien, recouvert par l'argile ypresienne dans les Flandres, le Brabant et la province d'Anvers; viennent ensuite les sables de l'Ypresien supérieur, du Rupélien inférieur lorsqu'il est recouvert par l'argile de Boom, puis les sables de l'Éocène et, enfin, le Bruxellien, qui est le moins fluide de tous.

La grosseur des grains joue donc un rôle capital, à conditions égales, bien entendu, car l'abondance et la pression de la nappe aquifère exercent d'autre part une influence des plus considérables.

La mobilité des sables est donc due à l'action de la nappe aquifère qu'ils recèlent; dès qu'ils sont asséchés, ils se maintiennent en parois presque verticales, même ceux qui, à l'état mouillé, sont les plus fluides et les plus fins, tels que ceux de l'Ypresien, que nous avons pu observer dans ces conditions soit à Saint-Gilles, soit dans la brasserie de Koekelberg, au moment où l'on y faisait une grande fouille.

Les interstices dont sont criblés les dépôts sableux renferment de 15 à 50 % d'eau. Cette eau circule dans les pores de la couche avec une vitesse, ou plutôt avec une lenteur variable suivant les dimensions des grains, mais toujours très faible.

Il y a des années, nous fîmes une expérience avec du sable landenien provenant d'un puits artésien, foré à Aerschot; cette expérience permit de constater qu'il fallait à l'eau trois siècles et demi pour arri-

ver du point d'affleurement le plus rapproché. Celle que nous voyons sourdre du sol à Aerschot, serait tombée dans le Brabant central pendant le règne de Charles-Quint.

Cette circulation de l'eau dans les couches perméables se présente dans deux conditions fort différentes, soit à l'état libre, soit à l'état forcé.

La couche à circulation libre contient la nappe dite *phréatique*, celle qui alimente les puits domestiques.

Lorsque la couche sableuse est comprise entre deux bancs d'argile imperméable, les eaux y circulent à l'état forcé. La sonde, en perçant la couche imperméable supérieure, donne naissance aux sources artésiennes.

On ne peut mieux comparer la nappe phréatique qu'à une rivière circulant à l'air libre et la nappe artésienne ou forcée qu'aux eaux emprisonnées dans les tuyaux des distributions publiques.

Inutile de dire qu'à l'état forcé les couches perméables sont complètement saturées d'eau. Il en est tout autrement lorsqu'elles recèlent la nappe libre.

Les dépôts sableux sont parfois sillonnés de profondes vallées, comme dans les environs de Bruxelles. Ces vallées font office de drain et assèchent les couches perméables. Elles nous offrent alors des coupes superbes, à parois presque verticales, hautes parfois de 15 à 20 mètres.

Lorsqu'on fait une fouille dans une couche sableuse saturée d'eau, celle-ci ne tarde pas à envahir la fouille. En l'épuisant, l'eau afflue d'avantage, les grains de sable des parois sont entraînés et une partie de leur masse devient fluide.

N'oublions pas que les grains perdent une bonne partie de leurs poids dans l'eau et qu'ils n'ont aucune adhérence entre eux.

L'afflux du sable est d'autant plus fort que les grains sont plus fins et que la pente de la nappe aquifère est plus forte. Des sables argileux, légèrement perméables, peuvent se transformer ainsi en une vraie bouillie.

Dans de grandes fouilles, en épuisant progressivement les sables, on finit par les assécher complètement, mais dans celles de peu d'importance, telles que celles des puits domestiques et des fondations, les sables mouvants présentent souvent des difficultés presque insurmontables en procédant par épuisement.

Il n'en est pas de même lorsqu'on procède sur une vaste échelle.

Les travaux de fortifications, les bassins creusés à Anvers depuis quarante ans, nous ont permis de constater qu'un épuisement lent et progressif asséchait les nappes dans un rayon considérable.

Le bassin de batelage, les bassins *Africa* et *America*, ces derniers creusés à la cote 2, dans les Polders, la fosse de la Cloche à gaz de Zurenborg, voisine du fossé de l'enceinte, ont pénétré de 8 à 10 mètres dans la couche aquifère. Plusieurs d'entre nous ont visité ces travaux et ont pu constater qu'on y circulait parfaitement à pieds secs et que la récolte des Fossiles y était tout aussi facile que dans les sablières des environs de Bruxelles et, enfin, que les parois des fouilles étaient en pentes raides.

La fluidité des sables est donc causée par la dénivellation de la nappe aquifère, qui cherche à reprendre son niveau et qui entraîne les grains avec d'autant plus de facilité qu'ils sont plus fins et plus légers et que la pente de la nappe aquifère est plus forte.

Quant à la forme arrondie ou anguleuse des grains, elle a certainement une influence, mais, d'après nous, elle est loin d'être prépondérante.

Lorsque la couche perméable renferme une nappe forcée, les sables remontent parfois à une grande hauteur. M. Alimanestiano, ingénieur en chef des mines du royaume de Roumanie, a lu une notice au Congrès d'hydrologie de Liège, au sujet de l'ensablement d'un trou de sonde sur près de 200 mètres de hauteur. Les ensablements de 50 mètres ne sont pas rares; ils sont faciles à provoquer et tout aussi faciles à empêcher.

Ainsi, le sable landenien, dont nous avons cité la fluidité, peut être percé sur 8 ou 10 mètres de hauteur, contenu par une colonne de tubage, en une journée, sans qu'il remonte dans le trou de sonde.

En déprimant brusquement la nappe aquifère, on peut faire remonter la base du sable bruxellien de plusieurs mètres, malgré les éléments pondéreux qui la composent.

Il nous est permis de conclure de tous ces faits que l'écoulement de l'eau est la seule cause de la mobilité des sables; lorsque le liquide est au repos, le coulage le long des parois est faible; il devient nul lorsque l'on charge le niveau de la nappe aquifère.

Des trous de sonde peuvent se maintenir, sans colonne de retenue, sur 40 et 50 mètres de hauteur; on peut y faire fonctionner des outils à percussion de 4 à 500 kilogrammes, mus par la vapeur, pour percer les grès lediens, sans qu'il y ait le moindre éboulement, pourvu qu'il y ait surcharge de la nappe aquifère.

Il a été souvent question des sables mouvants dans ces derniers temps, au sujet du raccordement projeté entre les gares du Nord et du Midi à Bruxelles. Le tracé suivrait le niveau perfide des sables ypresiens,

et l'on annonçait déjà l'éroulement d'une partie de la ville et de ses monuments.

Nous connaissons tous les formations géologiques des environs de Bruxelles. Le flanc oriental de la vallée de la Senne est formé, à la partie inférieure, d'argile ypresienne. La carte géologique nous apprend que cette argile est surmontée de sables ypresiens dont la base, un peu sinueuse, suit à peu près la rue du Marais, passant ensuite un peu plus haut que le Passage et la Grand'Place, et va rejoindre le boulevard du Midi à peu près au point où débouche la rue de Constantinople.

Ces sables ypresiens sont très fins, très fluides et, à ce niveau, très imprégnés d'eau; toutefois, la filtration y est fort lente à cause de l'exiguïté des interstices qui séparent les grains.

Ces sables ypresiens sont surmontés d'autres sables beaucoup plus grossiers, désignés sous le nom de sables bruxelliens, que nous connaissons tous. Ces sables sont très aquifères et très perméables; en un mot, les plus aquifères et les plus perméables de la Belgique. Il est rare d'en rencontrer de pareils. Leur base suit à peu près la rue Pachéco, passe un peu plus bas que l'église Sainte-Gudule, puis au pied de la Montagne de la Cour, pour suivre la rue Haute et aboutir à la Porte de Hal.

Les sables ypresiens et une partie des sables bruxelliens sont fortement imprégnés d'eau, et, si l'on ouvrait une tranchée dans les premiers, il se ferait un drainage énergique. Les sables ypresiens ne fourniraient que peu d'eau, si celle-ci ne devait que filtrer dans leur couche, mais il y aurait partout une alimentation d'eau verticale, provenant des sables bruxelliens. Cette venue d'eau serait certainement des plus abondantes.

M. Daubrée, dans son remarquable ouvrage sur « Les eaux souterraines », nous dit (1), en parlant de Bruxelles et de ses environs :
 « Les puits d'une profondeur atteignant 35 mètres sont alimentés par
 » une nappe d'eau que soutient l'argile compacte éocène (ypresienne).
 » D'après les études de M. Verstraeten, cette couche aquifère existe
 » sans interruption; on la voit affleurer au fond des vallées sous forme
 » de suintement et de sources qui donnent naissance à des ruisseaux,
 » des étangs et des rivières.

» Lorsqu'on passe d'une vallée à une vallée voisine, par exemple
 » lorsqu'on traverse Bruxelles, de la Senne au Maelbeek, on reconnaît,
 » d'après le niveau de l'eau des puits, que la surface supérieure de la
 » couche aquifère s'élève constamment dans le sous-sol jusque sous
 » le plateau pour descendre ensuite vers le Maelbeek.

(1) Tome I, pp. 29 et 30.

» Cette surface supérieure est convexe et sa forme détermine le
 » partage des eaux de source alimentant les deux vallées. Dans la
 » vallée de la Senne, la nappe d'eau est découverte à la cote 14;
 » dans le Parc elle atteint la cote 49; à proximité de la place de la
 » Société Civile elle s'élève à la cote 51; elle revient au jour au Mael-
 » beek à la cote 46, pour former l'étang du Jardin zoologique (1). »

En consultant la « carte topographique et hydrographique de l'Entre-
 Senne-et-Dyle », œuvre des plus remarquables de notre confrère et
 ami M. Verstraeten, nous voyons que du Parc au pied de la pente, soit
 sur un parcours de 800 mètres environ, la nappe aquifère s'infléchit
 de 35 mètres ou de 44 millimètres par mètre, ce qui est énorme.

On se demandera peut-être comment ces eaux ne se font pas jour à
 la surface. Il y avait jadis des sources, peu considérables il est vrai,
 dont quelques-unes existent encore, mais la nappe liquide presque
 tout entière traverse les dépôts quaternaires qui recouvrent en stratifi-
 cation transgressive les couches tertiaires, les éboulis, les remblais,
 dont la puissance doit être assez considérable. Elle se déversait jadis
 dans la Senne, et depuis son voûtement elle s'épanche dans la couche
 de cailloux très perméable qui forme la base des dépôts quaternaires
 dans le fond de la vallée.

Il ressort à l'évidence de ces faits, que si l'on ouvrait une tranchée
 dans les sables ypresiens, il y aurait une venue d'eau et de sable dont
 les mésaventures du Maelbeek ne peuvent donner qu'une faible idée.

On pourrait, il est vrai, congeler la partie orientale de la tranchée;
 mais rien ne nous dit que cette muraille artificielle serait en état de
 résister à la poussée des sables. Le premier mur de quai à Anvers
 n'a-t-il pas fléchi un peu par la poussée des sables imprégnés d'eau
 emmagasinés derrière lui, et cependant ce mur a 11 mètres de base.

La muraille de glace ne sera certainement pas aussi résistante et la
 poussée sera bien autrement forte qu'à Anvers.

Enfin, la muraille de glace aurait pour base l'argile ypresienne. Cette
 argile est exceptionnellement diluable dans l'eau. Le système de son-
 dage que nous employons nous l'a démontré au moins cent fois.

Si l'on avait affaire à l'argile de Boom ou à l'argile glauconifère,
 telles qu'on les rencontre dans le sous-sol de la province d'Anvers,
 celles-ci offriraient une bien plus grande sécurité.

Se figure-t-on une fuite, produisant bientôt une brèche, un vrai
 cataclysme. Que l'on ne perde pas de vue l'accident de l'écluse du

(1) Actuellement le Parc Léopold.

Kattendyk, à Anvers, qui s'est produit dans des circonstances à peu près analogues.

Il est toujours dangereux d'attaquer un ennemi puissant de front, il vaut mieux le tourner; tel est, pour nous, la véritable solution du problème.

Que l'on assèche les sables, ils se maintiendront parfaitement, et les travaux s'exécuteront avec la plus grande facilité.

Les nombreux travaux de fortifications à Anvers, le bassin de batelage à Anvers, les bassins *Africa* et *America*, creusés en plein Polder; la fosse de la Cloche à gaz, à Zurenborg-Anvers, déjà cités, n'ont-ils pas été creusés dans des sables exceptionnellement aquifères que l'on avait asséchés *progressivement* jusque 8 et 10 mètres de profondeur; les sables, qui primitivement étaient mouvants comme l'eau, finissaient par se maintenir en parois presque verticales, malgré le voisinage du fleuve ou des fossés de fortifications, remplis d'eau. Le fond des excavations était parfaitement sec et l'on y circulait facilement, comme nous l'avons déjà dit.

La solution du problème consiste donc dans l'assèchement des sables; le résultat n'est pas bien difficile à obtenir.

Examinons la topographie des lieux : les vallées de la Senne et du Maelbeek se rejoignent près de la station de Schaerbeek, où la colline qui les sépare se termine en biseau. La carte géologique nous montre les sables ypresiens affleurant en sous-sol jusqu'à la place Jourdan, c'est-à-dire sous le parallèle du Palais de Justice. Le grand axe de la colline est dirigé nord-sud.

La nappe superficielle ne peut donc être alimentée dans la zone occupée par les sables bruxelliens que par les pluies tombant sur la surface du Parc et du jardin du Palais royal; tout le reste des eaux pluviales disparaît par ruissellement.

La nappe phréatique ne profite donc que d'une superficie d'une vingtaine d'hectares tout au plus, tout le restant des eaux doit donc lui arriver par infiltration du côté sud, dans la direction de la plaine de Ten Bosch.

La surface occupée par les sables bruxelliens, au nord du parallèle de la porte de Hal, forme un triangle ayant 2 kilomètres de base et 4 kilomètres de hauteur, soit très approximativement 400 hectares, dont la moitié tout au plus serait à assécher, soit la zone s'épanchant du côté de la Senne.

Un travail de l'espèce ne serait pas bien dispendieux ni bien difficile à exécuter, surtout si on le compare aux résultats à obtenir.

Il y aurait lieu de faire d'abord une expérience préparatoire.

On foncerait dans le Parc un puits de 2 mètres de diamètre, revêtu d'un cuvelage en tôle. On l'entourerait, dans un rayon de 100 à 200 mètres, de quelques petits puits de 0^m,20, de diamètre. On repèrerait ensuite les niveaux de la nappe aquifère.

La surface du puits de 2 mètres de diamètre étant de 3^m,14, on pourrait en extraire facilement 2 mètres cubes d'eau par minute (1).

On constaterait dans les puits secondaires la dépression rapide de la nappe aquifère et la surface de la zone influencée.

L'expérience étant concluante, il y aurait lieu d'établir un certain nombre de puits d'exhaure, parallèlement au tracé.

Les fouilles diverses faites à Anvers asséchaient le sol dans un périmètre considérable ; le drainage de la forêt de Soignes produit souterrainement des résultats analogues. La galerie filtrante des eaux de Liège fait sentir son influence dans une zone de 4 kilomètres de large et son débit a diminué de beaucoup. Tous ces faits sont de notoriété publique. Les nappes libres s'assèchent donc facilement.

Les nappes forcées, dont l'alimentation se fait dans des conditions plus favorables, ont leur niveau fortement influencé par les puits artésiens. Le débit du puits de Grenelle, à Paris, fut sensiblement diminué par le forage du puits de Passy. A Londres, de nombreux puits artésiens ont fortement abaissé le niveau des nappes artésiennes. Il en est de même à Bruxelles, où, sur quelques points, il a fléchi de 20 mètres.

Les mines d'Anzin ont pour ainsi dire asséché une nappe forcée : le célèbre *torrent*. La surface de cette nappe aquifère est de 26 1/2 kilomètres carrés et son épaisseur moyenne de 9 mètres ; on n'y puise plus que 200,000 mètres cubes par an (2), ce qui est fort peu ; il est des puits artésiens à Bruxelles dont, en pompant, on extrait le double annuellement.

Comme conclusion, nous nous permettrons de dire que si l'asséchage du promontoire entre Senne et Maelbeek n'était même pas complet, les travaux seront certainement facilités dans des proportions considérables et que de sérieux mécomptes seront ainsi évités.

M. Van den Broeck fait remarquer le rôle prépondérant de la *vélocité* — et surtout de la *force ascensionnelle* — du *mouvement véhi-*

(1) Les puits forés de la brasserie de la Chasse royale plongent dans le Bruxellien, l'un a 0^m,50, l'autre a 0^m,70 de diamètre. On y puise, sans qu'il y ait entrainement de sable, 200 litres par minute et par puits, d'une manière continue.

(2) DAUBRÉE, *Les eaux souterraines*, t. I, p. 87. De 1856 à 1868, on a pompé 10,228,000 mètres cubes ; on ne puise plus à présent que 200,000 mètres cubes par an.

culatoire de l'eau, dans les caractères différentiels que paraît présenter le « boulant », dont il semble exister DEUX TYPES assez distincts. Le boulant des eaux ascensionnelles, telles que celles des nappes captives rencontrées par les puits artésiens, paraît pouvoir se distinguer physiquement du boulant des nappes phréatiques rencontrées dans les travaux de fouille et de fondation. Ces dernières eaux sont animées d'un mouvement descendant ou rarement ascensionnel et pouvant comme tel agir sur une certaine hauteur verticale; aussi, pour cette cause, n'aident-elles en rien, ou seulement dans une faible mesure, au phénomène de suspension et d'écartement des grains sableux; ceux-ci, au contraire, noyés et isolés les uns des autres au sein des eaux du type ascensionnel, s'y maintiennent sous forme d'une véritable émulsion, où les matières solides, tant par la perte de poids que par la suppression de la cohésion dues aux forces capillaires, deviennent en quelque sorte un élément inerte ou négligeable, annihilé pour ainsi dire au sein des eaux qui affluent, sans cesse en mouvement et constamment renouvelées. Ainsi s'expliquent fort aisément l'hétérogénéité générale et aussi les dimensions minimales de certains des sédiments constituant le boulant des nappes phréatiques, en opposition avec l'homogénéité relative, le classement plus régulier et les plus grandes dimensions des grains sableux que peuvent mettre en mouvement, sous forme de boulant, les eaux des nappes jaillissantes ou captives, c'est-à-dire à déversement ascensionnel.

M. Van den Broeck se propose de développer ultérieurement cette manière de voir, dont il s'est borné pour le moment d'exposer l'énoncé sommaire, qui lui paraît appelé à expliquer les prétendues contradictions et divergences de constatations signalées au cours de l'intéressant exposé de M. Kemna.

M. van Ertborn a observé, rue Ten Bosch, qu'en imprimant une certaine vitesse à l'eau, on a fait remonter le Bruxellien de 5 à 6 mètres, malgré la grosseur de ce sable, l'un des plus réfractaires à la formation du boulant.

M. Van den Broeck, comme suite à ce qu'il vient de dire précédemment, et d'accord en cela avec les déclarations de l'intéressante lettre de M. Lang, lue à la séance du 15 janvier dernier, fait observer qu'il n'y a d'autre limite à la grosseur des particules solides amenées par des eaux ascensionnelles que celle de la vitesse des eaux d'entraînement. Il rappelle à ce sujet le curieux type projeté de bateau dragueur automatique, dont un appareil de démonstration a figuré à l'Exposition de 1880, à Bruxelles. C'était un bateau dont la cale, percée, était tout

simplement munie d'un tube affouilleur descendant, dont l'extrémité inférieure allait atteindre le dépôt de gravier fluvial à draguer. Sous l'action de la différence de pression atmosphérique existant entre la surface de la rivière et le niveau supérieur du tube dans la cale du navire, l'eau remontait violemment dans le tube, entraînant dans son ascension les graviers, qui se déversaient dans la cale aussi longtemps que la différence des pressions se maintenait suffisante. Le travail de dragage s'opérait ainsi automatiquement. On arrivait de cette manière à constituer une sorte de boulant graveleux et caillouteux, uniquement dû à la véhiculation rapide dans le tube, des eaux de la rivière, rendues ascensionnelles.

M. Rutot rappelle le point de la communication de M. Kemna relatif à la sursaturation, et il explique que les nombreux sondages qu'il a pratiqués pour le service de la Carte géologique lui ont permis de s'en rendre compte. C'est ainsi qu'il a pu constater assez souvent que si l'on prélève un échantillon de sable, celui-ci, qui arrive à l'état humide, ne paraît nullement mouillé; mais si l'on imprime à la masse des grains sableux réunis sur la main un mouvement de translation avec trépidation, on la voit se former en boule et se couvrir d'eau; elle est alors réellement mouillée, car, si on la jette, elle laisse des traces très sensibles d'eau dans la main. Conséquemment si, par un petit mouvement de trémulation, une minime quantité de sable peut se dégorger d'eau, le tassement d'un amas considérable de grains irréguliers doit amener la sursaturation.

MM. van Ertborn et Simoens partagent cette manière de voir et signalent qu'elle s'appuie d'expériences concluantes, que chacun peut faire sur nos plages.

M. Rutot estime que l'existence de sable à grains absolument sphériques est purement théorique; chacun sait que les sables du pays sont généralement à grains irréguliers et polyédriques. Toutefois, il y aurait lieu de faire l'examen au microscope des principaux d'entre eux, de manière à permettre la détermination d'une échelle de grosseur des grains.

M. Van den Broeck a souvent fait, au cours de ses sondages pour le levé de la carte géologique, des observations montrant combien la mise en mouvement de l'eau est directement en rapport avec la production de l'état boulant du sable.

Lorsque la sonde portative spéciale dont il se sert pour ses recherches rencontre des limons, même très aquifères, des glaises, des sables argileux, etc., on n'éprouve, malgré la résistance due à la pression atmo-

sphérique, qu'une peine fort minime à retirer la sonde. La vrille, chargée de limon ou d'argile formant bouchon, se détache à l'aide d'un effort relativement minime, et les résistances sont toujours faciles à vaincre.

Mais lorsque l'outil est descendu quelque peu au sein de sables aquifères purs et très noyés d'eau, il devient parfois, à cause du tassement du sable et de la compression que l'on produit en voulant retirer la sonde, impossible absolument de la faire remonter par traction directe. On ferait vainement opérer cette traction par une nombreuse équipe, par des chevaux même, que rien ne bougerait. La facilité d'accès dans le sable, si grande à l'entrée de l'outil, contraste étrangement avec cette résistance à la sortie, causée par le tassement qu'opère tout effort énergique de traction de bas en haut. Or, ces résistances, qui ont souvent étonné et désespéré les débutants en matière de sondage à main, sont très faciles à vaincre par un *truc* utile à connaître. Pour transformer la masse dure et tassée des sables, que ne peut déplacer la traction directe, en une *émulsion fluide*, qui est l'ÉTAT BOULANT, et dont la sonde se dégage alors aisément, il suffit de provoquer, à l'aide de tractions et de poussées rythmées de la sonde et se succédant rapidement, un mouvement vertical de va-et-vient qui, d'abord *insensible*, vu le tassement sableux initial, ne tarde pas à s'accroître. On sent la sonde se libérer peu à peu et bientôt toute la masse dure, résistante et tassée, se transforme en un *boulant fluide*, dont il devient facile de dégager l'appareil si l'on continue le va-et-vient de la vrille avec persistance jusqu'au moment où la traction directe est devenue possible.

Le motif pour lequel, d'après M. Van den Broeck, le sable est passé d'un état à un autre et est *devenu bouillant* est tout simplement l'action des secousses continues et de plus en plus amples qui ont mis l'eau *en mouvement* au sein du dépôt sableux. En produisant bientôt la mise en suspension des particules sableuses dans cette eau en mouvement, cette action a fait perdre au dépôt la forte résistance qui, combinée dans l'état de repos avec le tassement dû à l'effort du retrait de l'instrument, provient de la cohésion des grains, réunis à la fois par la gravité, par la tension capillaire et par l'impossibilité où se trouve ainsi l'eau de dissocier l'amas de grains solides, asséchés et pressés par la traction directe de bas en haut.

C'est donc bien *la mise en mouvement* de l'eau et *l'état de suspension* des grains sableux dans celle-ci, causé par les secousses alternantes, qui a transformé un sable tassé, dur et résistant, en un sable *fluide et bouillant*.

M. *Delecourt-Wincqz* pense que le phénomène de résistance du sable signalé par M. *Van den Broeck* serait simplement dû à la pression atmosphérique, dont la force de succion serait ensuite vaincue en rendant le sable boulant. Toute la théorie de ces sables peut se résumer à ceci : l'eau contient en suspension des corps excessivement mobiles participant au mouvement de circulation aquifère. Conséquemment, pour les travaux à exécuter dans le boulant, il suffit de produire un dégagement latéral des eaux en mouvement.

M. *Putzeys*, relativement à la résistance au retrait de la sonde, dont a parlé M. *Van den Broeck*, fait observer que le procédé employé pour effectuer ce retrait s'explique par ce fait que les coups donnés sur la sonde provoquent une intervention de l'air atmosphérique et diminuent par conséquent graduellement la pression de celui-ci. M. *Putzeys* croit même que si l'on pratiquait un trou au milieu de la sonde, cette résistance serait vaincue.

M. *van Ertborn* ne partage nullement cette manière de voir. Il a constaté les mêmes phénomènes que ceux signalés par M. *Van den Broeck*, et ce quand il employait précisément le dispositif des sondes creuses dont vient de parler M. *Putzeys*. D'après lui, on ne peut nullement attribuer à la pression atmosphérique la résistance des sables autour de la vrille, retenue immobilisée pendant le mouvement direct de retrait dans un sable aquifère tassé.

M. *Van den Broeck* fait observer en outre que cette opinion de MM. *Delecourt-Wincqz* et *Putzeys* ne peut être soutenue en présence du fait avéré que ni glaises ni limons — formant, encore bien mieux que les sables, bouchon compact lors du retrait de la vrille — n'amènent de résistance pareille à celle du sable aquifère. Lorsqu'on retire brusquement ces bouchons d'argile ou de limon glaiseux, on entend parfois un coup d'air, une sorte de petite détonation accompagnant la brusque rentrée d'air, et il est facile de juger dans ce cas, où seule la pression atmosphérique est nettement en jeu, qu'elle offre une résistance pour ainsi dire négligeable aux efforts de traction du sondeur. Cette résistance, due à la pression atmosphérique, est pour ainsi dire nulle par rapport à l'énorme et déconcertante résistance du sable tassé, comprimé (et, par conséquent expurgé d'eau autre que son eau de capillarité) que la sonde cherche vainement à ramener, dans l'acte de *retrait direct*, à la force des bras. Toute résistance est au contraire vaincue dès que le mouvement de va-et-vient a mis l'eau en circulation et provoqué sa rentrée abondante entre les grains sableux, bientôt mis en suspension et n'opposant plus alors aucune base de résistance. La pression atmosphérique,

qui a continué d'agir, aussi bien pendant le retrait par chocs que pendant l'essai de retrait par traction directe, n'intervient *pour aucune part sensible* dans les résistances d'abord subies, ensuite vaincues dès la mise en mouvement de l'eau.

M. *Delecourt-Wincqz* rapporte, en ce qui concerne le dragage automatique auquel vient de faire allusion M. *Van den Broeck*, les phénomènes réellement extraordinaires constatés en Roumanie lors du creusement d'un puits à pétrole de très grand diamètre et de 350 mètres de profondeur; en une nuit, le sable le bouchait complètement, était remonté au dessus de l'orifice et formait un cône au-dessus du puits artésien.

En matière de boulant, c'est donc l'eau qui donne de la mobilité à la partie solide et qui permet ainsi d'enlever toute espèce de matériaux, suivant le degré de vitesse de l'élément liquide.

Appel aux membres au sujet des « échantillons » et de la Bibliographie du « boulant ».

M. *Van den Broeck* fait appel à ses collègues pour obtenir des *échantillons de divers types géologiques et lithologiques* de « boulant », afin d'en permettre l'étude comparative.

Il annonce que notre confrère M. *Bleicher*, de Nancy, micrographe des plus compétents, se propose de procéder bientôt à l'examen au microscope des échantillons qu'il lui a déjà envoyés et dont notre collègue désire voir s'augmenter le nombre.

Il demande aussi que chacun, dans la limite de ses moyens, veuille bien fournir également tous les renseignements propres à assurer l'établissement et la publication, sous les auspices de la Société, d'une *Bibliographie* aussi complète que possible du « boulant » et de tout ce qui s'y rapporte.

Cet appel s'adresse spécialement à nos collègues *de l'étranger* qui, ne pouvant assister à nos séances du « boulant », trouveront ainsi le moyen, dont nous leur serons très reconnaissants, de montrer l'intérêt qu'ils prennent à nos recherches et à nos études d'intérêt général.

Comme la question du « boulant » a dû se poser maintes fois en de nombreux pays, il n'est pas douteux que les sources de cette *Bibliographie* soient géographiquement très étendues, et ce n'est qu'avec le bienveillant concours de tous que l'on peut espérer arriver à réunir les éléments d'une publication un peu complète, à laquelle tout le monde pourra trouver grande utilité.

Les recherches de MM. Marboutin et Schloesing au sujet de l'étude des eaux potables.

Profitant du grand nombre de nos collègues assistant à la séance de ce jour (une cinquantaine), M. *Van den Broeck* croit utile, avant la clôture de la séance et au risque de s'écarter quelque peu de l'ordre du jour, de signaler à leur attention le vif intérêt pratique des recherches, peu connues chez nous, de MM. *Marboutin* et *Schloesing*, de Paris. Ces recherches ont trait à la question des eaux potables et à l'étude scientifique des problèmes qu'elles présentent.

Grâce à l'emploi d'un type de fluoroscope spécial, représentant une modification du fluoroscope Trillat, et grâce aussi à l'emploi d'une fluorescéine extrêmement diluable, M. *Marboutin*, chef adjoint du Service chimique de l'Observatoire municipal de Montsouris, est parvenu à étudier la vitesse de propagation des eaux souterraines, non seulement dans les terrains fissurés, mais dans des terrains sableux aquifères.

Il est parvenu ainsi à dresser des courbes, appelées *isochronochromatiques* par M. *L. Janet*, permettant d'apprécier les diversités d'allure et de rapidité de la véhiculation souterraine des eaux.

L'avantage du dispositif, très simple, employé par M. *Marboutin*, est que l'emploi de la fluorescéine révélatrice n'est même pas soupçonné par les propriétaires des sources et des puits soumis aux expérimentations. La coloration des eaux n'est, en effet, pas modifiée à l'œil nu, alors que le fluoroscope *Marboutin* permet de déceler la dilution de la substance colorante à un dix-milliardième.

M. *Van den Broeck* vient de faire l'acquisition d'un de ces appareils, qu'il mettra à la disposition de son collègue M. *Putzeys*, ingénieur en chef des travaux de la Ville, afin que des expériences puissent être faites dans la nappe phréatique de nos sables bruxelliens.

M. *Van den Broeck* annonce également que M. *Marboutin* a bien voulu promettre, pour la Société, une Note détaillée sur ses expériences et constatations.

Passant ensuite aux études de M. *Th. Schloesing*, directeur de l'École d'application des Manufactures de l'État, à Paris, M. *Van den Broeck* signale l'intéressante synthèse de ses recherches sur la proportion des nitrites dans les eaux soit courantes, soit de ruissellement, soit de sources. La résultante de ces recherches, que M. *Putzeys* a bien voulu

promettre de résumer pour notre *Bulletin*, est que l'étude de ces nitrates contenus dans les eaux de sources permet, chose particulièrement importante dans les régions calcaires ou rocheuses fissurées, de déterminer si une eau de source est chargée d'apports d'infiltration superficielle ou d'eaux circulatoires souterraines, non élaborées et filtrées efficacement par le sol, ou bien si elle est pure, et si elle a subi une élaboration et un filtrage souterrain permettant de la considérer, en toute sécurité, comme eau alimentaire. Bien entendu, ce mode d'investigation ne dispense nullement, dans la plupart des cas, de l'examen géologique, bactérioscopique et chimique complet; mais il paraît avoir une réelle valeur par lui-même et, en tout cas, il constitue, par ses données confirmatives, une preuve, aisée à obtenir, des conclusions de l'ensemble de ces recherches. Il y a là une voie nouvelle des plus intéressantes, qui ne peut manquer d'attirer l'attention de tous ceux qui s'occupent de l'importante question *des eaux alimentaires*.

La séance est levée à 10 h. 40.
