

Quelques expériences sur l'imbibition du sable par les liquides et les gaz ainsi que sur son tassement.

(Mémoires de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie,
t. XVII, p. 13, 1903.)

Au cours de quelques recherches *Sur la filtration et la pénétration de l'eau dans le sable et le limon*, recherches dont M. le capitaine Rabozée a bien voulu donner à la Société belge de Géologie un compte rendu très détaillé (*), j'ai eu l'occasion de constater que l'imprégnation d'une masse de sable sec, c'est-à-dire le remplissage, par l'eau, des vides que les grains laissent entre eux, n'est pas un phénomène aussi simple qu'il le paraît à première vue.

Le sable peut, dans certaines circonstances, retenir considérablement plus d'eau que ne semblent le permettre les vides compris entre ses grains. La proportion peut même dépasser le double du volume théorique des *creux* du sable. Si l'on fait attention que, dans la réalité, les grains de sable ne sont ni sphériques ni égaux, comme le suppose la théorie, le volume vrai des *creux* sera nécessairement plus petit que ne le veut le calcul, si bien que l'on sera conduit à regarder les grains comme ne se touchant plus dans un sable complètement imprégné, mais comme écartés par une couche d'eau plus épaisse que celle qui résulte du simple jeu des forces capillaires. Il est concevable, dès lors, qu'une telle masse manque, le plus souvent, de toute solidité.

J'ai constaté aussi que la vitesse de filtration de l'eau au travers du sable remplissant un tube en verre d'une longueur plus ou moins grande, se trouve en relation étroite avec l'épaisseur de la couche d'eau. Elle présente donc des anomalies, et même des irrégularités, qui voilent les résultats à prévoir d'après les lois de l'écoulement

des liquides. La comparaison de deux filtres ne devient possible que lorsque ceux-ci ont pris, avec le temps, un état stationnaire en rapport, bien certainement, avec le degré du tassement du sable et que, de plus, le liquide filtrant a été privé des gaz qu'il peut tenir en solution. Quand ces conditions ne sont pas remplies, il est tout à fait illusoire de chercher à saisir, par l'expérience, les lois de la filtration.

La question du *tassement* du sable dans des milieux divers, liquides ou gazeux, se présentant, au cours du travail qui vient d'être rappelé, comme un problème à part, j'en avais réservé l'étude pour une époque où mes loisirs m'auraient permis de l'aborder.

Dans l'intervalle, j'ai pu prendre connaissance, grâce à la grande obligeance de M. E. Van den Broeck, des importantes études entreprises au sein de la Société belge de Géologie sur les *sables bouillants*. J'y ai vu, entre autres choses intéressantes, que la question du volume vrai des sables bouillants divise encore les savants les plus compétents dans la matière. Tandis que les uns, parmi lesquels se trouvent des praticiens qui ont eu à lutter avec cet ennemi désagréable, regardent le sable bouillant comme une sorte de boue plus ou moins fluide, donc sursaturée d'eau, d'autres, en particulier M. le professeur H. Höfer, de l'Académie impériale et royale des mines de Leoben, font remarquer que le départ de l'eau d'un sable bouillant ne diminue pas nécessairement son volume, car on n'aurait pas constaté d'affaissements dans des terrains bouillants après l'enlèvement de leur eau.

M. R. Feret, chef de laboratoire des ponts et chaussées à Boulogne-sur-Mer, a tenu à vérifier si l'opinion de M. Höfer trouve un appui dans les expériences de laboratoire. En opérant sur de la farine de marbre moulu et de l'eau, dans un tube en verre de dimensions appropriées, il est arrivé à conclure qu'un sable fin se tasse progressivement jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle même un enlèvement par aspiration de l'eau interposée ne produit plus d'effet, pour ainsi dire. Toutefois, dit M. Feret, si le sable retient plus d'eau que celle qui correspond à ce tassement maximum, — ce qui paraît être le cas des sables bouillants, — tout enlèvement de cette eau provoque « un tassement plus ou moins important suivant que l'état initial différerait plus ou moins du tassement limite ».

Les conclusions de M. Feret sont un grand appui pour l'opinion que m'avaient suggérée mes recherches récentes sur l'infiltration de l'eau dans le sable et le limon, opinion que la Société belge de

(*) Séance du 3 juin 1902. *Procès-Verbaux*, p. 269.

Géologie a bien voulu faire connaître dans les procès-verbaux de ses séances spéciales sur le *boulant*. Un sable fin *en place*, dans lequel les grains sont au contact vrai, me paraissait pouvoir perdre son eau d'imbibition sans éprouver une diminution de volume; mais il pouvait en être autrement d'une masse de sable libre; celle-ci peut, à mon sens, contenir assez d'eau pour que les grains soient vraiment écartés les uns des autres et, dans ces conditions, un enlèvement de l'eau doit nécessairement avoir pour conséquence une diminution du volume de la masse.

Ces divergences de vues, aussi bien que les anomalies de la vitesse de filtration de l'eau, auxquelles il a été fait allusion plus haut, m'ont engagé à soumettre la question de l'imbibition et du tassement du sable à quelques investigations complémentaires. Je serais heureux si les résultats obtenus dans ce travail pouvaient être de quelque utilité dans l'étude entreprise par la Société belge de Géologie.

§ 1^{er}. — *De la pression que peut produire l'imbibition d'une masse de sable enfermée dans un vase.*

L'eau qui pénètre une masse de sable sec, chasse nécessairement devant elle l'air emprisonné entre les grains. Si cet air ne peut s'échapper, la pression grandira. Il peut être intéressant de se renseigner sur la valeur de cette pression et surtout de savoir si elle est en état d'arrêter finalement l'imbibition.

A cette fin, j'ai construit l'appareil figuré ci-après. Un flacon en verre F, de 0^m18 de haut et de 0^m07 de diamètre, a été privé de son fond de manière à réaliser une cloche étroite, tubulée. La tubulure a été fermée hermétiquement à l'aide d'un bouchon en liège, imprégné de laque fondue, et livrant passage à un tube en verre *t* qui reliait la cloche à un manomètre M, comme on peut le voir dans la figure. Avant de faire le raccord avec le manomètre, on a mis un petit tampon de ouate sous le bouchon, à l'endroit où le tube *t* affleurait, puis on a rempli la cloche de sable en la tassant à l'aide d'un marteau de bois. Enfin, la cloche a été fermée par deux doubles de papier à filtrer maintenus en place par une fine toile métallique soudée à une douille, qui a été fixée au verre à l'aide de laque fondue.

Le sable qui a servi a été extrait du limon de Hesbaye à la suite

d'un traitement du limon par l'acide chlorhydrique jusqu'à dissolution complète des matières argileuses et ferreuses, suivi d'un lavage complet à l'eau. Il a été passé, finalement, à travers un tamis de soie telle qu'elle sert au blutage de la farine. La grosseur moyenne des grains de ce sable était de cinq à dix microns seulement.

Le remplissage de la cloche étant terminé, le tube *t* a été raccordé au manomètre et la cloche a été plongée dans un vase plein d'eau.

Aussitôt l'imbibition commence et l'air déplacé par l'eau se rend dans le manomètre. Au début, on voit des bulles d'air se frayer une voie à travers la toile métallique et la pression intérieure diminuer; mais lorsqu'une couche suffisante de sable est imbibée, l'air se rend complètement dans le manomètre. La pression monte rapidement d'abord, puis de plus en plus lentement. L'état stationnaire a été atteint après quatre à cinq heures, et il s'est maintenu, chaque fois, jusqu'au lendemain, c'est-à-dire jusqu'au moment où l'appareil a été démonté. La hauteur de la colonne d'eau soulevée dans le manomètre a été, une première fois, de 1^m80, et une autre fois, de 2^m15; la grande différence entre ces hauteurs doit être attribuée à cette circonstance

que dans la première opération il y a eu une plus grande perte d'air, au début, que dans la seconde, par suite, sans doute, d'un défaut dans le remplissage. En somme, la pression a monté jusqu'environ un cinquième d'atmosphère.

On pouvait voir distinctement le niveau auquel s'était arrêtée l'eau dans la cloche F. Les trois quarts, environ, du sable étaient imbibés d'eau; le dernier quart était simplement mouillé, sans que les intervalles entre les grains fussent remplis d'eau. La pression qui a régné dans l'appareil a donc empêché l'eau de remplir tous les vides, mais elle ne l'a pas empêchée de se répandre à la surface de tous les grains.

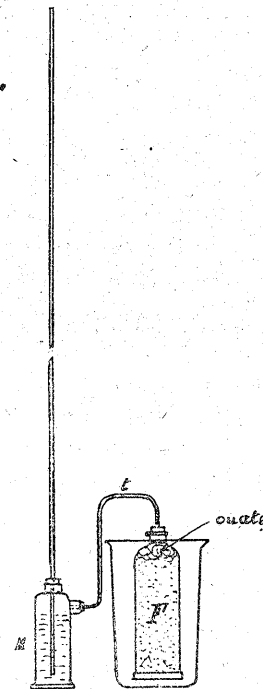


Fig. 1.

On remarquera la solidité étonnante qu'avait la couche de sable imbibée, au-dessus de la douille : elle résistait finalement à la pression intérieure sans laisser perdre la moindre bulle de gaz. Il paraît évident, d'après cela, que du sable simplement imbibé et soumis à une certaine compression ne peut être « boulant ». Cette propriété de *bouler* doit nécessairement être la conséquence d'un excès d'eau dans le sable, excès qui ne peut se produire que si le sable se trouve dans un certain état de *liberté* lui permettant de foisonner.

La grandeur de la pression qui se développe dans les conditions de cette expérience dépend dans une large mesure, sinon exclusivement, de la surface libre des grains de sable. En effet, si l'on emploie un sable à grains plus gros, offrant donc moins de surface sous le même poids de matière, la pression ne monte pas si haut. Le sable tongrien (lavé à l'acide chlorhydrique, comme le précédent) n'a fait monter l'eau dans le manomètre qu'à 40 centimètres. Il est vrai que dans un sable plus gros, les espaces compris entre les grains ne sont pas si étroits et qu'ils ne peuvent donc exercer une action capillaire si grande; mais cette circonstance est plutôt secondaire puisque les phénomènes de capillarité ont pour première condition l'extension des liquides sur la surface des corps. Notons encore que les autres particularités de l'expérience n'avaient pas changé dans le cas du sable plus gros : la couche inférieure était imbibée et la partie supérieure simplement mouillée.

Enfin, en remplaçant l'eau par l'alcool, corps dont la tension superficielle est près de trois fois moindre que celle de l'eau, la pression est restée également en dessous de celle développée par l'eau. Avec le sable fin, elle a atteint seulement 0^m70, nombre qui est remarquablement d'accord avec la théorie et qui donne à penser que les défauts de la méthode pratiquée ne sont pas tels qu'ils masquent les faits principaux.

§ 2. — *L'imbibition spontanée du sable a une limite.*

J'ai tenu à changer les conditions de l'expérience en vue de m'assurer, d'une façon décisive, si l'imbibition spontanée du sable sec a une limite assignable.

Pour cela, j'ai rempli une vessie bien dégraissée et imprégnée seulement de la quantité d'eau nécessaire pour donner de la souplesse

à la membrane, de sable fin du limon de Heshaye, bien tassé, et je l'ai fermée au moyen d'une ligature rendant tout départ d'air impossible. Le volume du sable ainsi enfermé dans la vessie a été déterminé en plongeant un instant le sphéroïde dans du *benzène* jusqu'à la ligature, et en mesurant le volume du liquide déplacé. Il est clair que le volume de la membrane est ainsi compris dans le résultat. J'ai trouvé 229^{cc}5, ce qui correspond à une sphère de 76 millimètres de diamètre. Après évaporation du benzène qui avait mouillé la vessie pendant cette opération, je l'ai introduite sous une cloche en verre, pleine d'eau, renversée sur une cuve à eau. De cette façon, je pouvais être renseigné sur l'étanchéité de la vessie, car si de l'air avait passé par la ligature, ou par un défaut de la membrane, il se serait montré dans la cloche.

La membrane s'est donc imprégnée d'eau et le sable sec a absorbé cette eau, à mesure, comme si la vessie avait été exposée à une dessiccation intérieure. L'air renfermé entre les grains de sable gonflait lentement la vessie. Au bout de trois semaines, son volume m'a paru stationnaire. En la retirant alors de l'eau, j'ai été étonné de l'état sous lequel se trouvait le sable : par la simple palpation, on constatait déjà qu'il formait une *masse compacte*, solide, au point de ne pas céder sous l'effort de la main, et entourée partout d'une couche de gaz de 2 à 3 millimètres d'épaisseur. L'air s'était donc dégagé uniformément et l'alimentation, en eau, de la masse de sable ne devait avoir eu lieu que par la partie inférieure qui restait au contact de la membrane, grâce à son poids. Le volume total, mesuré cette fois par le déplacement de l'eau, a été de 288 centimètres cubes; il y a donc eu un gonflement de $288 - 229.5 = 58^{cc}5$ qui représentent le volume d'eau absorbé par le sable à travers la paroi de la vessie, si l'on ne tient pas compte, bien entendu, de l'état de compression sous lequel se trouvait l'air. Cette compression est, à la vérité, peu importante, et on peut la négliger, car une membrane animale se distend aisément quand elle est exposée à une *macération* prolongée. Au surplus, en piquant la vessie à l'aide d'une épingle, il ne s'est produit qu'une très faible fuite de gaz.

Il est intéressant de rechercher à quoi correspond ce volume de 58^{cc}5.

A cet effet, comparons ce volume avec celui du sable. Il faut déduire, naturellement, des volumes mesurés avant et après l'imbibition, le

volume de la membrane gonflée. Ce dernier peut être estimé d'une manière suffisamment exacte par voie de pesée, car la densité de la membrane imprégnée d'eau est très près de l'unité. J'ai donc coupé la vessie sous la ligature et j'en ai retiré le bloc de sable. Le poids de la membrane imprégnée a été de 7^{cc}35. Il en résulte que le volume vrai du sable était 229^{cc}5 — 7^{cc}35, ou 222^{cc}15; le volume vrai du sable et de la couche d'air qui l'enveloppait : 288 — 7^{cc}35 = 280^{cc}65. Or, on sait, d'après les calculs de M. Edm. Van Aubel et du capitaine E. Cuvelier, que dans un sable idéal, formé de grains sphériques égaux, le volume des vides est indépendant de la grosseur des grains et égal à 26% du volume total. Calculons donc l'espace vide compris dans les 222^{cc}15 de sable supposé sec.

Nous trouvons :

$$\frac{222^{cc}15 \times 26}{100} = 57^{cc}739,$$

nombre qui se rapproche d'une manière surprenante des 58^{cc}5 trouvés. L'accord est même si grand, étant données les circonstances de l'expérience, qu'on peut regarder le sable comme s'étant *totalement imbibé d'eau*.

L'exactitude de cette conclusion ressort, d'ailleurs, de l'examen de la masse de sable elle-même. J'ai déjà dit qu'elle était dure et solide au point de résister à l'écrasement sous l'effort de la main. J'ajouterai qu'elle se laissait couper au couteau, en tranches fines, de moins de 1 millimètre d'épaisseur, restant parfaitement debout, comme si elles avaient été de terre plastique; mais ces lamelles ne supportaient pas la flexion; elles étaient cassantes. Jeté dans l'eau, ce sable imbibé s'éboulait en une boue fluide *sans laisser se dégager la moindre bulle d'air*, point qui prouve la conclusion précédente. Si au lieu de jeter ce sable dans l'eau, on dépose seulement une goutte d'eau sur une des tranches débitées au couteau, surtout sur les bords, on constate un foisonnement et aussitôt la solidité de la masse est détruite; le sable devient *boulant*.

Je crois utile d'insister sur la solidité qu'avait cette masse de sable imbibé, parce qu'on peut y trouver l'explication de quelques phénomènes souvent observés dans la nature, et peut-être aussi une *définition du boulant*. La masse ne renfermant que l'eau exactement nécessaire pour mouiller les grains et en remplir les intervalles, était

au maximum de solidité qu'elle pouvait devoir aux forces capillaires. Sa *compacité* était l'expression de la *somme* de toutes les actions capillaires élémentaires en jeu, entre les grains, sous l'influence de l'eau. Avec moins d'eau, il y aurait eu place pour de l'air, ce qui aurait causé une solution de continuité et, par conséquent, compromis la solidité. Avec plus d'eau, au contraire, les grains n'auraient pas été serrés les uns contre les autres; ils auraient glissé comme s'ils avaient été lubrifiés, et la masse aurait eu la consistance d'une boue épaisse.

Il est très remarquable que l'imbibition du sable, dans les conditions précédentes, s'arrête précisément au moment où les forces capillaires produisent le maximum de leur action. C'est qu'alors l'effort d'absorption exercé par le sable sur la membrane animale imprégnée d'eau est, selon toute apparence, en équilibre avec la force qui fait gonfler la membrane d'eau. Celle-ci n'agit, en réalité, *aucunement comme une passoire* au travers de laquelle pourrait passer un volume quelconque d'eau si on lui en laissait le temps, mais elle agit d'une manière limitée : elle ne cède l'eau qu'elle a absorbée elle-même qu'à des milieux dont le pouvoir absorbant est plus grand que le sien, de manière que quand le passage apparent du liquide est arrêté, *c'est qu'il y a équilibre entre les deux pouvoirs absorbants*. En un mot, l'emploi d'une membrane imprégnable est, peut-être, le meilleur moyen, sinon le seul, de faire pénétrer dans une masse pulvérulente ou autre, la quantité d'eau correspondant à la mise en jeu des seules forces capillaires, sans s'exposer à introduire un surplus de liquide.

La définition du *boulant*, qui semble se dégager de tout ceci, serait qu'un *sable commencerait à fluer à partir du moment où il contiendrait plus d'eau que ne le permettent les seules forces capillaires*; la fluidité de ce sable grandirait alors, naturellement, avec la quantité d'eau, du moins jusqu'à une certaine limite supérieure que nous allons voir se dégager des expériences suivantes.

Il serait intéressant de vérifier si l'argile, ou d'autres substances semblables, accusent un maximum d'imbibition dans les conditions susdites.

Il me sera permis de faire remarquer aussi l'analogie de forme qu'ont ces expériences avec celles qui conduisent à la constatation de la *pression osmotique*, que la chimie physique a su si bien utiliser. Peut-être l'analogie va-t-elle plus loin que la forme extérieure et

l'explication de la pression osmotique se trouverait-elle plutôt dans une faculté d'imprégnation propre aux solutions que dans l'action cinétique des molécules des corps dissous sur le dissolvant, comme on l'admet généralement aujourd'hui, assez gratuitement, il faut le dire? Mais l'examen de cette question s'écartant de notre sujet, je ne m'y arrêterai pas et passerai à la relation d'autres expériences.

§ 3. — Du tassement du sable dans des liquides différents.

Je me suis proposé de contribuer à la vérification de la thèse de M. le P^r Höfer, dont il a déjà été question au début de ce travail et qui a déjà fait l'objet d'un examen de la part de M. Feret (*), ainsi qu'il a été dit aussi.

On se souvient que pour M. Höfer, c'est une erreur de croire que le sable boulant se tasse par le drainage; ce savant base son opinion sur des observations faites en grand, dans des localités où, par suite de travaux industriels, on a pu épuiser plus ou moins complètement l'eau que contenaient des couches de sable bouillant : jamais on n'aurait observé d'affaissement du sol pouvant être rattaché à un tassement du sable.

En réalité, il n'en saurait être autrement si le sable bouillant observé ne peut fuir et surtout s'il est chargé d'autres terrains qui le compriment. En effet, alors, les grains de sable doivent se toucher ou être écartés, les uns des autres, tout au plus de l'épaisseur de la mince couche d'eau qui s'étale à leur surface par capillarité. On estime l'épaisseur de cette couche à $\frac{1}{20\,000}$ de millimètre. Une colonne idéale formée de 20,000 grains de sable rangés en file grandirait donc seulement d'un millimètre si de l'eau s'y insinuait par capillarité; dans la réalité, l'agrandissement serait même moindre, parce que la disposition des grains est plus compliquée. Étant données les dimensions les plus communes des grains de sable, on calcule facilement que pour produire un affaissement de 1 millimètre seulement, il faudrait enlever l'eau, voire dessécher complètement une couche de sable d'au moins 5 mètres de puissance. Cet affaissement rentre certainement dans les grandeurs dont les géomètres les plus habiles ne sauraient répondre dans un nivellement.

(*) Procès-verbaux des séances du *Boulant*, 2 juillet 1901, p. 125.

L'opinion de M. Höfer est donc fondée et naturelle. Quoi qu'il en soit, il est toujours utile au point de vue scientifique de modifier les conditions des observations et de s'assurer s'il ne reste plus rien de nouveau à apprendre.

On peut remarquer, par exemple, que si le foisonnement du sable dans un liquide est dû vraiment à l'insinuation de celui-ci entre les grains, il doit être différent d'un liquide à un autre et se trouver peut-être même en relation plus ou moins simple avec les constantes capillaires ou avec les grandeurs moléculaires.

J'ai donc délayé du sable fin, bluté, dans des liquides de nature différente; il y en avait douze en tout, dont les constantes capillaires et les volumes moléculaires étaient connus. La boue fluide a été abandonnée au repos et le dépôt de sable a été mesuré. Pour arriver à des résultats comparables, chaque liquide a été agité avec un poids égal de sable sec, 45 grammes, dans un tube en verre calibré et gradué. Le tableau que nous reproduisons ci-dessous renseigne sur les progrès du tassement du sable avec le temps.

	HAUTEUR DU SABLE EN MILLIMÈTRES			
	Après 1 jour.	Après 3 jours.	Après 6 jours.	Après 12 jours.
Eau	227	227	212	195
Alcool méthylique	230	230	217	195
Alcool éthylique	217	216	205	195
Alcool propylique	225	215	205	195
Alcool butylique	235	225	205	195
Alcool amylique	222	220	195	195
Éther éthylique	265	245	220	195
Formiate d'éthyle	245	220	195	195
Acétate d'éthyle	240	230	207	195
Acétate d'amyle	245	230	212	195
Benzoate d'éthyle	245	230	210	195
Benzène	252	242	222	204

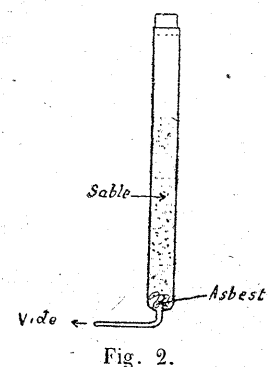
On peut le voir, le résultat a été contraire à toute attente. Le lendemain du jour où les tubes avaient été chargés, les hauteurs du sable différaient d'un tube à un autre au point d'écarter toute pensée d'intervention des forces capillaires ou des grandeurs moléculaires. Avec le temps, les différences de hauteur ont été *s'effaçant*, de sorte que le douzième jour (et même avant pour plusieurs tubes), toutes les hauteurs, hormis une, celle du sable dans le benzène, se sont trouvées au même niveau; la dernière a atteint la même valeur peu de temps après.

Il est donc établi que le sable finit par se tasser d'une manière égale dans des liquides différents; la vitesse de tassement, seule, varie beaucoup d'un liquide à un autre.

Quelle peut être la cause de ce phénomène inattendu? C'est ce que les expériences suivantes vont nous montrer.

§ 4. — Du tassement du sable sec dans le vide et dans des gaz différents.

Bien que, dans les expériences précédentes, la durée du tassement ne fût pas en rapport simple avec la viscosité des liquides, il m'a paru utile, néanmoins, de constater comment le sable se comporte dans les milieux dont la viscosité est nulle ou négligeable relativement à celle des liquides.



A cet effet, j'ai versé du sable fin dans un tube en verre, de la forme ci-contre. Le fond avait reçu un tampon d'asbeste pour retenir le sable, et le tube pouvait être relié à une trompe à eau par l'ajutage soudé au fond.

Le sable, librement versé dans l'air, atteignait une hauteur de 240 millimètres; le diamètre du tube était de 2 centimètres.

L'ouverture supérieure du tube ayant été bouchée, le vide a été fait. Le sable est alors descendu de 48 millimètres, soit donc de 20 % de sa hauteur première. L'air contribuait par conséquent à maintenir le sable comme suspendu.

Après avoir laissé rentrer l'air et avoir agité le sable dans le tube,

le niveau de 240 millimètres s'est rétabli, à très peu près. En ébranlant le tube par de petits chocs, ils se produisait aussi un tassement, mais dans aucun cas celui-ci n'a été aussi profond que dans le vide: le sable s'arrêtait à 200 millimètres environ, au lieu de descendre à 192 millimètres, comme cela avait lieu dans le vide. Les chocs produisaient donc une descente d'un peu plus de 16 %. Le restant, c'est-à-dire 4 %, ne pouvant plus être franchi à la faveur de l'ébranlement dû aux chocs, on peut en conclure, sans doute, que chaque grain de sable se trouve entouré d'une enveloppe d'air assez adhérente pour ne pas céder et qui empêche le contact réel des grains.

Pour contrôler cette conclusion, j'ai opéré de deux manières:

En premier lieu, j'ai chassé l'air et l'humidité adhérents aux grains en chauffant le sable au rouge sombre, dans un creuset de platine, puis j'ai versé le sable chaud dans le tube, où je l'ai laissé se refroidir. Il est descendu, après quelques chocs, à peu près aussi bas que dans le vide, à 195 millimètres au lieu de 192.

Le second contrôle est plus probant.

Si véritablement les grains de sable restent écartés les uns des autres par de l'air interposé, il faut qu'en chauffant le volume de sable, on détermine une forte dilatation, puisque l'air double son volume, comme on sait, pour une élévation de température de 273°. J'ai donc mis un tube contenant du sable tassé dans l'air, par chocs, dans une étuve chauffée. Le résultat a d'abord été nul. Cela devait être, car la chauffe ayant eu lieu progressivement, l'air dilaté a eu le temps de se dégager des grains et de s'échapper du tube qui était resté ouvert. Mais si l'on bouche le tube avant de le chauffer et qu'on l'ouvre quand la température s'est élevée, on voit le sable se soulever dans toute la masse, poussé qu'il est par l'air qui se dégage.

On peut donc regarder comme prouvé que l'air forme autour des grains de sable une enveloppe dont l'épaisseur est très sensible et que la solidité de cette enveloppe est d'autant plus grande que son épaisseur est plus petite; en deçà d'une certaine limite, elle ne cède plus aux chocs. Mais, chose curieuse, si les chocs ne l'ébranlent plus, le temps finit par en avoir raison. En effet, une colonne de sable fin, qui avait 363 millimètres de hauteur, ne cédant plus aux chocs, est tombée à 358 millimètres le lendemain, au premier ébranlement. Jamais, cependant, il ne s'est produit un tassement aussi profond que dans le vide.

Il est donc à noter que le tassement du sable dans l'air à la même allure que dans les liquides; il est d'abord rapide et s'achève avec une lenteur de plus en plus grande. Il est surprenant que l'ordre de grandeur du tassement dans les liquides et les gaz soit le même. Si l'on prend, en effet, la moyenne des nombres trouvés à l'aide des liquides (voir le tableau de la page 1545), après le premier jour, comme origine, on trouve qu'une hauteur de sable de 237 millimètres finit par devenir 195 millimètres, ce qui donne un affaissement d'un peu plus de 18 %, affaissement qui diffère bien peu des 20 % qu'on observe à l'aide de l'air.

Pour vérifier, enfin, si le tassement du sable diffère avec la nature des gaz, j'ai rempli le tube, figuré à la page 1544, de sable fin, en évitant de le faire descendre par chocs, puis, quand il s'est trouvé librement déposé dans son duvet d'air, j'ai fait arriver par-dessous un courant d'hydrogène. Je n'ai pu constater aucun changement dans la position du sable, même lorsque l'air fut complètement remplacé par l'hydrogène, soit après plus d'une demi-heure de circulation de gaz. Un courant d'anhydride carbonique a servi ensuite à déplacer l'hydrogène; mais le résultat est resté négatif.

Il paraît donc que la nature des gaz, c'est-à-dire, pour le cas qui nous occupe, la vitesse différente de leurs molécules, n'a pas d'influence sur le tassement du sable.

§ 5. — Le sable ADSORBE les gaz dissous dans l'eau.

Si la formation d'une enveloppe de gaz, d'épaisseur sensible, autour des grains est aisément admissible, il est plus difficile de concevoir que les liquides, qui sont si peu compressibles, en produisent une aussi au point de tenir les grains écartés les uns des autres dans la mesure signalée plus haut. Il est donc intéressant de rechercher comment les choses s'arrangent dans le cas d'un liquide qui tient un gaz en solution, c'est-à-dire dans le cas où le sable est à la fois aux prises avec un liquide et un gaz.

A cet effet, j'ai préparé une solution d'acide carbonique à l'état presque saturé, et j'ai observé le tassement du sable en opérant dans un tube, comme précédemment.

A peine le sable, qui avait d'abord été complètement délayé dans

l'eau chargée de gaz, fut-il simplement rassemblé, donc bien avant son tassement complet, qu'il est apparu une foule de bulles de gaz directement visibles parmi ses grains; à l'aide d'une loupe, on en découvrirait bien davantage encore. Ces bulles, qui ne parvenaient pas à se frayer un passage, maintenaient le sable *dilaté* et faisaient obstacle à son tassement. En faisant rouler le sable par renversement du tube bouché à l'aide du doigt, on déterminait le départ des bulles, mais il s'en formait de nouvelles par le repos, de sorte qu'un tassement complet n'avait pas lieu. Celui-ci ne s'est produit qu'après l'expulsion totale du gaz, par l'ébullition du liquide, dans le vide, pendant un certain temps. Le sable *adsorbait* donc le gaz dissous et le libérait de son état de dissolution.

Pour contrôler directement si le sable dépouille l'eau d'un gaz dissous, j'ai préparé une solution titrée d'acide carbonique et, après l'avoir traitée par du sable comme précédemment, j'ai déterminé son titre à nouveau.

Voici les données numériques obtenues à l'aide de sable gros et de sable fin :

	Sable gros.	Sable fin.
	—	—
Titre d'un litre de solution avant le contact du sable . . . «	4gr827	4gr827
Titre d'un litre de solution après contact.	0gr351	0gr117
Chute du titre	4gr476	4gr710
Id. en %	80.5	93.6

Le résultat est évident, mais il importait encore de s'assurer si le gaz était vraiment retenu autour des grains de sable et non, peut-être, simplement expulsé du liquide. Pour cela, il suffit de vérifier si le pouvoir *adsorbant* des grains de sable diminue par l'exercice de la faculté adsorbante, car il s'agissait, dans l'espèce, d'une simple expulsion mécanique; le grain de sable, instrument d'expulsion, devrait fonctionner toujours avec la même activité dans un liquide de même titre.

J'ai donc décanté le liquide clair qui se trouvait au-dessus des sables de l'essai précédent et je l'ai remplacé par une nouvelle portion de la solution mère d'acide carbonique.

Les résultats ont été les suivants :

	Sable gros.	Sable fin.
Titre de la solution mère	—	—
Id. après contact du sable.	1 ^{gr} 827	1 ^{gr} 827
Chute du titre.	1 ^{gr} 353	1 ^{gr} 693
Id. en %	0 ^{gr} 474	0 ^{gr} 434
	25.9	7.3

Le résultat est remarquablement net, comme on le voit. Dans la première opération, la chute du titre avait été énorme et plus grande pour le sable fin que pour le sable gros, sans être, toutefois, en relation simple avec le rapport des surfaces libres des deux sables; puis, dans la deuxième opération, non seulement la chute du titre a été plus faible, mais elle a été moindre encore avec le sable fin; ceci est très rationnel, puisque le sable fin avait adsorbé déjà plus de gaz dans la première opération.

Dans une troisième opération, les résultats se sont encore accentués pour le sable gros, mais non pour le sable fin, ainsi que le fait voir le tableau suivant :

	Sable gros.	Sable fin.
Titre de la solution mère	—	—
Id. après contact du sable.	1 ^{gr} 827	1 ^{gr} 827
Chute du titre.	1 ^{gr} 381	1 ^{gr} 275
Id. en %	0 ^{gr} 446	0 ^{gr} 252
	24.4	13.8

Autant qu'on peut juger par ces quelques déterminations, dont la valeur n'est d'ailleurs qu'*indicative*, un *état d'équilibre* s'établirait entre la solution d'acide carbonique et le gros sable quand celui-ci aurait fait tomber le titre primitif d'environ 25 %, le restant du gaz se dégageant mécaniquement; pour le sable fin, on pourra peut-être regarder la limite de 10 % comme assez probable.

Ces faits nous obligent donc à regarder l'homogénéité d'une solution de gaz dans l'eau comme rompue par la présence du sable. Il se fait un travail de concentration du gaz autour de chaque grain de sable; celui-ci s'entoure d'une atmosphère particulière, malgré la présence du liquide. Cette couche de gaz n'est pas visible, mais elle se trahit parce que le tassement du sable dans l'eau chargée de gaz ne se fait pas aussi complètement que dans l'eau qui a bouilli dans le vide, ainsi que nous l'avons vu plus haut.

Il importe de ne pas perdre de vue que l'état particulier du sable enveloppé de gaz, à sec, ou dans un liquide, ne peut être qu'un état instable cédant nécessairement devant toutes les actions physiques ou mécaniques qui engendrent ou détruisent l'état de saturation ou de sursaturation d'un liquide par un gaz, tels la lumière, la température, le choc ou l'agitation. Aussi n'est-il pas surprenant de constater, à la longue, la mise à jour du gaz dissous, au sein de la masse sableuse, sans changement apparent dans les conditions physiques extérieures. Quand les bulles libérées arrivent à se dégager, le sable se tasse d'autant; de sorte qu'à la fin, le tassement peut probablement devenir aussi complet que dans le vide.

Il est à noter également que le pouvoir d'*adsorption* du sable pour les gaz dissous n'a pas une intensité bien grande. Il ne pourra se manifester que dans les solutions qui sont près de leur point de saturation. Dans les autres, l'*affinité* du gaz pour le liquide peut dépasser de beaucoup celle du gaz pour le sable et alors les phénomènes mentionnés plus haut ne se manifesteront pas. Je ne m'étendrai pas, pour le moment, sur cette question particulière, parce qu'elle est plutôt du ressort de la chimie physique; je me bornerai à dire qu'on peut constater aisément le phénomène qui nous intéresse, en opérant sur certaines substances liquides qui se prêtent mieux aux manipulations que les solutions de gaz, ainsi qu'on pourra le voir dans le paragraphe suivant.

§ 6. — Le sable décompose certaines solutions.

L'eau et l'alcool sont, comme on sait, miscibles en toutes proportions; ils fournissent un exemple parfait de solutions réciproques de liquides.

Si l'on agite une de ces solutions avec du sable, gros ou fin, on ne constate cependant aucun changement dans leur composition : le titre en alcool reste exactement le même d'après les essais que j'ai faits. Ce résultat négatif est dû à ce que l'affinité réciproque de l'eau et de l'alcool est bien supérieure à l'affinité du sable pour l'eau. En effet, si l'on fait choix d'une autre couple de liquides le résultat devient positif.

L'eau et l'acide propionique sont aussi miscibles en toutes proportions, mais leur solution est facilement détruite si l'on y dissout un

sel, tel que le chlorure de calcium, qui a pour l'eau une grande affinité. On constate alors une mise en liberté d'acide propionique, parce que celui-ci surnage comme de l'huile sur l'eau. Eh bien, si l'on agite avec du sable une solution faite de volumes égaux d'eau et d'acide propionique et qu'on dégage ensuite l'acide propionique par l'addition de chlorure de calcium à un volume déterminé du liquide décanté de dessus le sable, on observe qu'il apparaît *au delà de 10 % d'acide de plus* que dans un autre volume égal qui n'a pas été agité avec du sable. Ceci prouve bien que le sable attire plus fortement à lui l'eau que l'acide propionique et qu'il l'accapare dans une proportion notable.

Un autre fait à mentionner aussi, dans le même ordre d'idées, est que si l'on agite du sable, fin ou gros, avec du benzène, de manière à le bien mouiller et qu'après on l'agite avec de l'eau, le benzène se trouve déplacé et vient former une couche au-dessus de l'eau; l'affinité du sable pour l'eau est donc plus grande que pour le benzène. Cette substitution de l'eau au benzène est analogue à la substitution des gaz à l'eau dans les expériences précédentes; on peut sans doute admettre même qu'on se trouve en présence d'un fait ayant un certain caractère de généralité.

§ 7. — *Densité apparente de l'eau dans laquelle du sable est en suspension.*

D'après ce qui précède, on ne peut plus regarder l'eau dans laquelle du sable est en suspension comme ayant une densité égale à celle de l'eau pure. Si autour de chaque grain de sable il y a une couche condensée de liquide, ou de gaz, qui se raccorde insensiblement au restant de l'eau, on devra envisager, jusqu'à un certain point, un mélange d'eau et de sable comme formant un seul corps et non comme la simple juxtaposition de deux corps différents. Quand du sable est en voie de se déposer au fond de l'eau, on ne doit pas penser qu'on assiste à une chute des grains de sable à travers l'eau, mais bien que le sable et du liquide descendent à la fois, comme s'ils étaient d'une pièce. Arrivés sur les couches du fond, ils seront renvoyés par suite de la vitesse acquise et remonteront jusqu'à une certaine hauteur dépendant de la force vive, pour retomber ensuite. Ce n'est qu'à la suite de l'épuisement de la force vive par le frottement intérieur que le calme s'établira.

L'exactitude de ces considérations se vérifie très aisément par l'expérience. En effet, si le sable et l'eau sont jusqu'à un certain point *solidaire*, leur ensemble devra avoir une densité spéciale.

Ceci étant admis, versons dans un tube en verre, fermé par un bout (un tube de 0^m60 de long et 0^m02 de large), du sable imprégné totalement d'eau jusqu'à la moitié de la hauteur et achevons le remplissage à l'aide d'eau pure. Fermons le tube et retournons-le; toute la masse de sable et d'eau se frayera un passage à travers l'eau pure, comme à travers une substance étrangère, de sorte que l'eau pure sera de nouveau au-dessus. Que c'est bien ainsi que les choses se passent, c'est ce que montre l'addition d'une trace de matière colorante, du bleu de méthyle ou de la fluorescéine, à l'eau qui imprègne le sable. En retournant le tube dans ces conditions, on assiste à tout le spectacle de la formation des deux courants liquides et de leur *côtoyement* sans mélange bien prononcé. Quand tout est rentré en repos, le liquide surnageant s'est à peine coloré. On peut retourner le tube plusieurs fois avant que la matière colorante soit uniformément répartie, tandis que si l'on fait le même essai sans sable, il suffit d'un renversement pour produire l'homogénéité de la coloration.

En résumé, l'eau pure et l'eau mêlée au sable se comportent comme deux liquides inégalement denses, superposés.

On peut vérifier le fait d'une manière plus probante encore. En effet, si, de deux vases communicants, on remplit l'un d'eau pure et l'autre de sable et d'eau, le niveau ne sera le même dans les deux vases *que si le sable repose sur le fond du vase*; si, au contraire, on le maintient en suspension dans l'eau en évitant, bien entendu, toute variation dans la hauteur de la colonne liquide, chose facile à faire à l'aide de l'agitateur mécanique de Loesner, *l'égalité de niveau ne s'établit plus*: une hauteur d'eau et de sable fin de 0^m120 fait contre-poids à une hauteur d'eau pure de 0^m134; c'est-à-dire qu'il y a une différence de niveau de 14 millimètres.

A l'appui de ce qui précède, je dirai que l'étude de la densité des liquides troubles proprement dits, et même des gaz chargés de fumée ou d'un brouillard, a déjà été faite. Le professeur V. Garcia de la Cruz, de Madrid, a publié, en 1894 (*), ses curieuses expériences à

(*) Barcelone. Imprimerie de la Casa P. de Caridad. Voir aussi *Revue scientifique*, mars 1895, p. 272.

ce sujet. Il montre, par exemple, dans le cas des gaz, qu'un petit ballon gonflé d'hydrogène, et lesté de manière à ne pas s'élever dans l'air pur, s'élève, au contraire, quand l'air est troublé en y faisant passer de la fumée quelconque. Les expériences précédentes ne sont donc qu'une extension de celle de M. Garcia de la Cruz au cas où les matières troublantes sont si volumineuses qu'elles ne restent suspendues que grâce à une agitation continue.

L'eau et le sable mêlés fonctionnent donc comme un liquide de densité plus grande que celle de l'eau. Il n'y a pas lieu de s'étonner, dès lors, que leur irruption produise, dans certains cas, des effets dépassant les prévisions.

§ 8. — *Influence des gaz dissous dans les liquides sur le tassement du sable.*

L'ensemble des renseignements que nous venons de recueillir nous permet, à présent, de résoudre la question du tassement des sables dans différents liquides, question que nous avons dû laisser en suspens.

L'obstacle le plus grand au tassement du sable se trouve dans la présence des gaz dissous dans les liquides. Les divers liquides qui ont été employés (voir plus haut) dissolvant plus ou moins bien les gaz doivent agir inégalement. Il est facile de vérifier, par exemple, que dans de l'eau saturée d'acide carbonique, le tassement est moins complet que dans de l'eau pure. En effet, ayant versé du sable dans une solution carbonique et l'ayant laissé se déposer, j'ai noté d'abord une hauteur de 178 millimètres. Après avoir expulsé tout le gaz en faisant bouillir l'eau dans le vide, la colonne de sable est tombée aussitôt à 158 millimètres, soit donc à 20 millimètres plus bas.

J'ai repris alors les expériences mentionnées page 22, en me bornant, cette fois, à opérer à l'aide des liquides dans lesquels le tassement avait été le plus lent, savoir : le *benzène*, l'*éther éthylique*, l'*alcool méthylique* et l'*acétate d'amyle*. En soumettant les tubes renfermant le sable et les liquides au vide, il s'est dégagé un volume énorme de gaz (de l'air ?). Après repos, le sable s'est tassé effectivement plus qu'il ne l'avait fait lors des premiers essais après une semaine d'attente; mais le tassement complet ne s'est cependant pas produit d'emblée : il a fallu attendre quelques jours encore. Il résulte de là que si la présence

du gaz a une influence capitale sur le retard du tassement, le liquide en exerce une de son côté.

Il est très remarquable que le dernier rapprochement des grains ait lieu lentement, bien que spontanément. Ce fait a déjà été observé par M. Feret au moyen de la farine de marbre (*loc. cit.*). Il paraîtrait plus naturel que l'enveloppe liquide dans laquelle chaque grain de sable se trouve logé fût permanente plutôt que temporaire. Sans doute se compose-t-elle de couches concentriques, en équilibre d'autant moins stable qu'elles sont plus éloignées du centre. Un sable à gros grains devra donc se tasser plus rapidement, indépendamment de l'action plus grande de la pesanteur, qu'un sable à grains plus fins.

Enfin, j'ai répété les expériences de M. Feret sur le tassement des sables en en modifiant les conditions.

Au lieu de laisser le sable se tasser dans l'eau, j'ai provoqué d'abord le tassement du sable mouillé, aussi complètement que possible, en l'exposant au vide jusqu'à dessiccation, puis j'ai fait arriver l'eau, lentement, par le dessous, afin de vérifier si la colonne de sable grandissait à la suite de l'imbibition.

Je me suis servi, à cet effet, du tube figuré page 1544. Après l'avoir rempli de sable et d'eau, j'ai fait le vide et renouvelé l'eau aussi longtemps que le tassement se produisait encore. Le sable a été ensuite desséché dans le tube même, par circulation d'air sec, déterminée par le fonctionnement incessant de la trompe. Enfin, le tube a été plongé verticalement dans une éprouvette pleine d'eau, de manière que le niveau du sable fût toujours dans le même plan que le niveau extérieur de l'eau. Le sable s'est donc imbibé d'eau, en commençant par le dessous, tandis que le dégagement de l'air se faisait par le dessus. *Dans ces conditions, le sable n'a pas foisonné.* Mais si l'on enfonce le tube dans l'éprouvette de manière que le niveau du sable soit *plus bas* de quelques centimètres (8 à 10) que le niveau de l'eau, *la colonne de sable foisonne*. Si elle était de 75 millimètres à l'origine, elle atteint 78^{mm}5; il y a donc un foisonnement de 5^{mm}5 ou

$$\frac{3.5 \times 100}{75} = 4.66 \text{ } \%.$$

Ces résultats n'ont rien que de très naturel, si l'on fait attention que l'eau chargée de sable a une densité plus grande que l'eau pure

(voir plus haut). Dans le premier cas, où le niveau du sable était au niveau de l'eau, le sable mouillé ne pouvait être soulevé par l'eau, car il fonctionnait comme une masse plus dense. Dans le second cas, au contraire, le sable imbibé devait s'élever en vertu du *principe des vases communicants*, jusqu'à ce que sa hauteur fût en raison inverse de sa densité apparente, relativement à la hauteur de l'eau à l'extérieur du tube.

Toutefois, cette cause de foisonnement du sable se trouve contrariée, naturellement, par l'action inverse du tassement due à la pesanteur, de sorte qu'on ne peut s'attendre qu'à un état d'équilibre entre les actions en jeu, état d'équilibre qui s'est trouvé atteint, dans le cas présent, par le foisonnement de 4.66 %.

En somme, il n'y aura foisonnement du sable qui s'imbibe d'eau que dans le cas où la contre-pression de l'eau sera au moins égale à la charge du sable imprégné, telle que la fait connaître sa densité apparente; alors seulement la masse de sable mouillé fusionnera, en quelque sorte, avec l'eau qui s'insinue et elle participera, dans une certaine mesure, des propriétés générales d'un corps liquide unique.

RÉCAPITULATION.

1. L'imbibition d'un sable sec a lieu jusqu'à ce que l'air expulsé d'entre les grains par le liquide ait atteint une certaine pression dont la grandeur dépend essentiellement de la constante capillaire du liquide et de la finesse du sable; toutefois, l'arrêt de l'imbibition n'empêche pas le mouillage général des grains de sable.

2. Une masse de sable sec et meuble, qui s'imbibe d'eau, passe par un *maximum de solidité*. Celui-ci est un état d'équilibre instable parce que l'addition ou l'enlèvement d'un peu de liquide provoque une dislocation marquée. Quand le sable se trouve dans cet état d'équilibre, il se laisse débiter en tranches fines, restant debout.

5. Le degré d'imbibition qui donne à une masse de sable le maximum de solidité est en équilibre physique avec le degré de libre imprégnation d'eau des membranes animales.

4. Le sable se tasse d'une manière égale dans des liquides chimiquement différents. Le degré de tassement ne dépend donc ni des constantes capillaires, ni des grandeurs moléculaires des liquides. Toutefois, la rapidité du tassement dans divers liquides

n'est pas la même; elle varie dans une large mesure sans être, non plus, en relation simple avec les constantes physiques des liquides.

5. Le tassement du sable dans les gaz présente le même caractère que dans les liquides. Il est aussi indépendant de la nature chimique des gaz. Ceci prouve que la densité des gaz n'intervient pas comme facteur essentiel dans le phénomène.

6. Le sable détruit l'état de *sursaturation* et même l'état de *saturation* d'une solution d'un gaz dans l'eau. Il *adsorbe* le gaz autour de ses grains au point d'en libérer une notable partie. L'enveloppe de gaz formée autour des grains fait obstacle au tassement, mais comme cette enveloppe est dans un état d'équilibre instable, elle finit par disparaître et le tassement s'achève.

7. Si l'on agite avec du sable une solution mutuelle de deux liquides n'ayant pas l'un pour l'autre une trop grande affinité, on constate que la solution change de composition. Le sable concentre autour de lui le liquide pour lequel il a le plus d'affinité, de sorte que la proportion de l'autre devient plus forte dans la partie éloignée du sable.

8. L'eau dans laquelle du sable se trouve suspendu accuse une densité plus grande que celle de l'eau pure. La différence peut dépasser 10 %.

9. Du sable mêlé d'eau se comporte comme un liquide particulier : il traverse même de l'eau pure sans lui abandonner celle qu'il retient autour de ses grains.

10. Les gaz dissous dans les liquides sont l'obstacle le plus grand au tassement rapide du sable, mais ils ne sont pas seuls à agir. La couche de liquide qui adhère aux grains de sable retarde, de son côté, le tassement d'autant plus qu'elle est plus fine, sans doute parce que sa solidité grandit à mesure que son volume diminue.

11. Du sable qui s'imbibe librement d'eau, de manière que l'air puisse s'en dégager, ne *foisonne* pas si le niveau de l'eau d'imbibition est égal ou inférieur à la surface libre du sable. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si l'eau pénètre dans le sable sous une certaine pression, même faible, le *foisonnement a lieu*; c'est qu'alors l'eau pourra faire équilibre et même soulever la masse de sable et d'eau qui fonctionne comme un corps unique et dont la densité apparente est supérieure à celle de l'eau pure.