Sur la cohésion des liquides

Leduc, Sacerdote

SUR LA COHÉSION DES LIQUIDES (1);

Par MM. LEDUC et SACERDOTE.

Le simple fait qu'une corde, une tige de verre ou de métal, etc..., fixée à sa partie supérieure, ne se rompt pas malgré la pesanteur, montre qu'il existe, entre les tranches consécutives du solide, des forces de réunion dites *forces de cohésion*, dont la valeur par unité de surface est supérieure à $\frac{p}{s}$, p désignant le poids de la tige et s sa section.

De même, si l'on arrive à réaliser une *colonne liquide continue fixée par sa partie supérieure*, on pourra affirmer que ce liquide est doué de cohésion et que cette cohésion est supérieure à $\frac{p}{s}$, p désignant le poids de la colonne liquide et s sa section.

(1) Communication faite à la Société de Physique, Séance du 18 avril 1902.

Il est, en outre, évident que, si l'on fait croître la longueur de cette colonne solide ou liquide, la pesanteur finira par l'emporter sur la cohésion, et il y aura rupture. Théoriquement, cette rupture devrait se produire à la partie supérieure, là où la traction est la plus forte ; en réalité, elle se produit dans une région quelconque, là où il existe un point faible : paille pour le métal ; vice de fabrication pour la corde ; bulles d'air, même invisibles, pour le liquide.

Des vibrations plus ou moins énergiques pourront, du reste, provoquer cette rupture bien avant que l'on ait atteint la limite de cohésion.

Première partie. — Expérience de Gay-Lussac.

L'expérience. — Un disque de verre (*fig.* 1) étant suspendu horizontalement sous un plateau d'une balance et équilibré, si l'on amène une surface d'eau en contact avec sa face inférieure, elle y adhère ; mettons ensuite des poids P dans l'autre plateau, le disque se soulève, entraînant avec lui une petite colonne d'eau ; pour des poids suffisants, cette colonne atteint 5 à 6 millimètres, puis se rompt, une mince couche liquide restant adhérente au disque : telle est l'expérience bien connue due à Taylor et répétée par Gay-Lussac, Simon de Metz, etc...

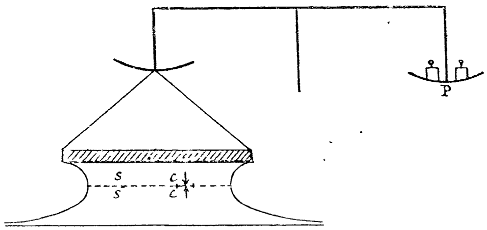

Fig. 1.

Son interprétation classique. — Dans bon nombre de traités de physique, cette expérience est interprétée d'une façon complètement erronée ; — on dit, bien à tort, qu'elle donne une mesure plus ou moins imparfaite de la cohésion du liquide ; — on dit :

Lorsqu'on a amené la surface d'eau en contact avec le disque, la couche superficielle y a adhéré ; le disque, en se soulevant, a entraîné avec lui cette couche superficielle, puisque l'eau mouille le verre, et les autres couches ont suivi, par suite de la cohésion qui les unit à la première ; la rupture a eu lieu lorsque les poids P l'ont emporté sur cette cohésion ; on a donc :

$$C \leq \frac{P}{S},$$

C désignant la force de cohésion par unité de surface ;
S, l'aire de la section de rupture ou, sensiblement, la surface du disque.

En opérant avec un disque de $11^{cm},8$ de diamètre, Gay-Lussac a vu la rupture se produire pour $P = 59^{gr},4$, d'où l'on déduit : $c \leq 0^{gr},5$ environ; on était ainsi amené à conclure que : *la cohésion de l'eau est de l'ordre de grandeur de* $0^{gr},5$ *par centimètre carré, c'est-à-dire équivalente à* 5 *millimètres d'eau environ* (1).

Son interprétation véritable. — Nous allons montrer que le raisonnement précédent est absolument inexact : *la cohésion du liquide n'intervient en rien dans cette expérience, qui réussirait tout aussi bien avec un liquide entièrement dénué de cohésion* (2).

Une comparaison le fera immédiatement comprendre :

Imaginons que la paroi d'une petite pompe aspirante soit très flexible, en caoutchouc mince, par exemple. La base du corps de pompe et le piston étant d'abord appliqués sur une surface d'eau, soulevons le piston; *le liquide le suivra, poussé par la pression atmosphérique*, en même temps que la paroi s'incurvera sous l'influence de l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure.

Dans l'expérience ci-dessus, la paroi flexible est représentée par la membrane élastique, à laquelle on assimile la surface d'un liquide, et c'est encore la pression atmosphérique qui fait monter le liquide dans cette sorte de corps de pompe (3).

---

(1) On peut trouver ce nombre autrement : il suffit de remarquer que le poids de la colonne liquide soulevée est évidemment égal à P ; donc $\frac{P}{S}$ représente sensiblement la hauteur de cette colonne liquide, qui est bien de 5 à 6 millimètres.

(2) Il s'agit, bien entendu, de la cohésion intérieure et non de la cohésion superficielle.

(3) Pour que la cohésion intervienne dans cette expérience, il faudrait opérer dans le vide ou tout au moins dans une atmosphère dont la pression fût inférieure à celle que représente la colonne liquide soulevée. Or, contrairement à ce que l'on a souvent énoncé, cela est impossible avec l'eau, puisque la force élastique de celle-ci est mesurée, même à 0°, par une colonne d'eau supérieure à 6 centimètres, tandis que la colonne soulevée n'est que de 0,5 centimètre.

Les poids P, mis dans le second plateau de la balance, représentent donc simplement la différence des pressions hydrostatiques sur les deux faces du disque, augmentée de la composante de la tension superficielle, si l'angle de raccordement n'est pas nul.

Quant à la rupture, elle se produit pour des raisons que nous développerons plus loin et qui, elles non plus, n'ont rien à voir avec la cohésion.

Pour confirmer cette manière de voir, nous avons répété l'expérience de Gay-Lussac avec tous les soins nécessaires, et nous l'avons soumise à des mesures précises; mais, avant d'indiquer ces vérifications expérimentales, nous allons faire la théorie de cette expérience.

Théorie.

Méridienne de la colonne liquide soulevée. — Son équation est évidemment $F\left(\frac{1}{\rho}+\frac{1}{\rho'}\right)+z\mu g=0$, en désignant par

z, l'ordonnée d'un point quelconque de la méridienne;
$\rho\rho'$, les rayons de courbure de deux sections normales rectangulaires par ce point;
$F\mu$, la tension superficielle et la densité du liquide;
g, l'accélération de la pesanteur.

Si l'on suppose d'abord le rayon du disque assez grand pour que la seconde courbure soit négligeable, il vient, en remplaçant $\frac{1}{\rho}$ par sa valeur $\frac{z''}{(1+z'^2)^{\frac{3}{2}}}$:

$$\frac{F}{\mu g}\frac{z''}{(1+z'^2)^{\frac{3}{2}}}+z=0,$$

d'où, en intégrant :

$$z=\sqrt{\frac{4F}{\mu g}}\cos\frac{\omega}{2}, \tag{1}$$

ω désignant l'angle de la tangente en M avec l'horizontale.

A cette équation correspond la méridienne dessinée sur la *fig.* 2.

Quand on soulève le disque, la forme de la méridienne reste invariable; mais la portion intéressée de cette méridienne croît de plus en *plus;* on obtient les divers aspects α, β, γ (*fig.* 2), comme le confirme l'expérience [1].

Remarque. — L'angle de raccordement $\hat{\alpha}$ varie de π à o (*fig.* 2), ce qui est possible sur une arête vive ; sa valeur, pour un soulèvement donné z du disque, est donnée par l'équation (1), où on remplace ω par α.

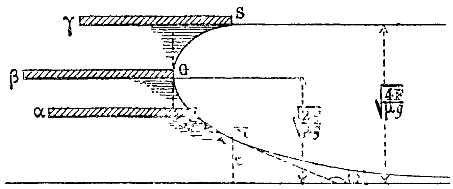

Fig. 2.

Remarque. — Si l'on veut tenir compte de deux rayons des courbures, le calcul est beaucoup plus compliqué [2] ; il montre qu'à mesure qu'on soulève le disque, non seulement la portion intéressée de la méridienne augmente, mais encore la forme de cette méridienne change légèrement. Entre l'angle de raccordement α et la

(1) Remarquons, en passant, que cette même courbe (ou sa symétrique) se retrouve dans beaucoup de phénomènes capillaires (*fig.* 3) :

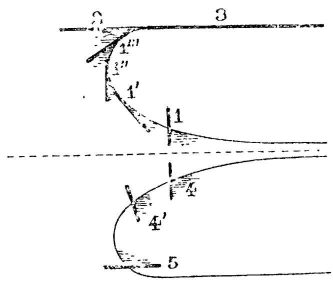

Fig. 3.

— Ascension d'un liquide le long d'une paroi verticale ou inclinée mouillée parfaitement ou non (1, 1', 1'', 1''').
— Expérience de Gay-Lussac (2), qui n'est, en somme, que le cas limite où la paroi, de plus en plus inclinée, est devenue parallèle à la surface liquide.
— Bulle d'un fluide moins dense à la surface d'un fluide plus dense (3).
— Dépression le long d'une paroi verticale ou inclinée non mouillée (4, 4').
— Goutte de mercure sur plan de verre (5).

(2) Consulter Laplace, *Œuvres*, t. IV, p. 467.

hauteur z du disque au-dessus de la surface du liquide, on a la relation approchée :

$$(1') \qquad z = \sqrt{\frac{4F}{\mu g}} \cos\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{3R}\frac{2F}{\mu g}\frac{1-\sin^3\frac{\alpha}{2}}{\cos\frac{\alpha}{2}},$$

dans laquelle R désigne le rayon du disque.

Calcul de l'effort P *nécessaire pour soulever le disque* à une hauteur z quelconque :

Cet effort devant équilibrer la différence des pressions hydrostatiques sur les deux faces du disque, ainsi que la composante due à la tension superficielle, on a :

$$(2) \qquad P = \pi R^2 z \mu g + 2\pi R F \sin\alpha \text{ (1)};$$

pour calculer cet effort P correspondant à une valeur donnée de z, on déduira α de (1) ou de (1′), et on portera la valeur obtenue dans (2).

Nous verrons plus loin que les valeurs ainsi calculées sont en parfait accord avec les valeurs observées.

Remarque. — Quand le disque a atteint la position γ (*fig.* 2), l'angle de raccordement α est égal à zéro ; on a donc, d'après (2), $P = \pi R^2 z \mu g$; mais, comme il est évident, d'autre part, que P représente le poids de la colonne liquide soulevée, on voit que :

Dans la position γ du disque, le volume de la colonne liquide soulevée (creusée en gorge sur son pourtour) est rigoureusement égal à celui de la colonne cylindrique ayant même hauteur et pour base le disque.

Causes de la rupture de la colonne liquide soulevée. — 1° *Si le disque se soulève tant soit peu au-dessus de la position γ (fig. 4), il y aura rupture ;* en effet :

Cette position γ correspond à l'ordonnée maximum $\sqrt{\frac{4F}{\mu g}}$ de la méridienne ; si on la dépasse, la méridienne LGS est obligée de se déformer en LGS′, sa courbure diminue ; donc la *pression exté-*

---

(1) Il est nécessaire de signaler que ce second terme relatif à la traction due à la tension superficielle est toujours très petit, souvent négligeable par rapport au premier ; il est même rigoureusement nul pour $\alpha = 0$, c'est-à-dire dans la position γ du disque (*fig.* 2).

rieure H *l'emporte sur la pression intérieure et vient étrangler la colonne liquide ;*

2° Si le rayon du disque est < SA (*fig.* 5), il y aura une certaine position D du disque (entre G et S) pour laquelle les *deux courbes*

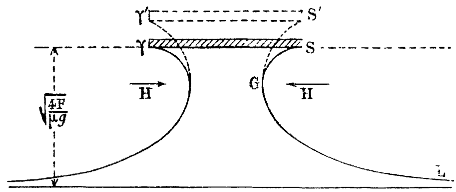

Fig. 4.

méridiennes se rencontreront, seront tangentes, et la rupture se produira.

Telles seront les deux seules causes de rupture, si l'on soulève le disque au moyen d'une vis micrométrique, par exemple ;

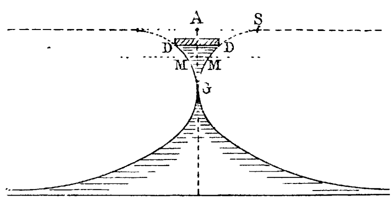

Fig. 5.

3° Mais, si le disque est suspendu sous le plateau d'une balance, comme dans l'expérience de Gay-Lussac, il y aura une autre cause de rupture que nous allons maintenant examiner.

Par un raisonnement géométrique excessivement simple, on démontrerait que le volume liquide soulevé (et, par suite, l'effort P à faire) augmente d'abord quand on commence à élever le disque, passe par un maximum pour une position MM (*fig.* 6) située entre G et S, et ensuite diminue.

Il s'ensuit immédiatement que *la rupture aura lieu lorsque le disque aura atteint le niveau* MM *de ce maximum*, puisque à la moindre oscillation de la balance les poids P mis dans l'autre plateau pour atteindre M l'emporteront sur l'effort à faire.

La cohésion du liquide n'intervient en rien dans aucune de ces causes de rupture.

Vérifications expérimentales avec l'eau.

Appareil. — Un disque circulaire D en verre, bien plan, à bords tranchants, de $8^{cm},65$ de diamètre, est suspendu sous un plateau d'une balance; un petit niveau permet de vérifier son horizontalité,

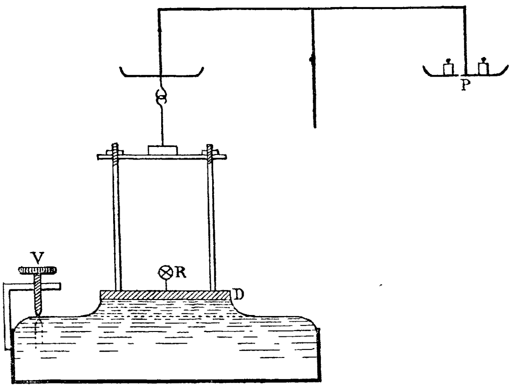

FIG. 6.

que l'on obtient par un réglage des tiges de suspension; — une vis V et un réticule R fixé au disque permettront de déterminer avec un cathétomètre le soulèvement du disque au-dessus de la surface libre du liquide.

Expérience. — Après avoir fait la tare du disque, on l'amène en contact avec la surface du liquide, en ayant soin de l'incliner pour éviter l'interposition de bulles d'air; puis on ajoute progressivement des poids P dans l'autre plateau, et à chaque fois on détermine au cathétomètre la hauteur de la colonne liquide soulevée; et ceci jusqu'à la rupture.

Remarque. — Les poids P sont d'abord constitués par des poids ordinaires, puis ensuite par de l'eau que l'on verse goutte à goutte au moyen d'une pipette et en évitant soigneusement les chocs; sans ces précautions, on produirait la rupture pour des valeurs de P irrégulières et beaucoup trop faibles.

Résultats. — Dans le tableau suivant,

$P_{obs.}$ représente les poids mis dans le second plateau de la balance;
z, la hauteur de la colonne liquide soulevée mesurée au cathétomètre;
$P_{calc.}$, la valeur de P obtenue au moyen de la formule (2), en y remplaçant z par sa valeur observée, et α par sa valeur déduite de (1').

On a pris :

$$F = 75 \text{ C. G. S.}, \qquad \mu = 1, \qquad g = 981, \qquad R = 4^{cm},325.$$

$P_{obs.}$	z	$P_{calc.}$
$10^{gr},0$	$0^{cm},148$	$9^{gr},80$
20 ,0	0 ,308	20 ,05
25 ,0	0 ,392	25 ,14
28 ,0	0 ,445	28 ,06
30 ,0	0 ,486	30 ,18
30 ,2	0 ,489	30 ,30
30 ,7	0 ,503	30 ,90
rupture		

L'accord entre les $P_{obs.}$ et les $P_{calc.}$ est très satisfaisant ; en outre, la rupture de la colonne liquide soulevée a lieu lorsque sa hauteur dépasse légèrement 5 millimètres, valeur comprise, comme cela devait être, entre les ordonnées des points G et S.

$$z_G = \sqrt{\frac{2F}{\mu g}} = 3^{mm},9, \qquad z_S = \sqrt{\frac{4F}{\mu g}} = 5^{mm},5.$$

Vérifications expérimentales avec le mercure.

Des expériences exécutées par Gay-Lussac avec le mercure, il semblait résulter que le disque adhérait bien à sa surface, mais qu'il s'en détachait sous l'action de poids P variables très irrégulièrement (de 158 grammes à 296 grammes pour le disque de $11^{cm},8$ de diamètre) et sans qu'il y ait soulèvement sensible du mercure.

Il n'en est rien : la marche du phénomène est la même avec le mercure qu'avec l'eau, et les vérifications numériques se font tout aussi bien.

Des résultats consignés dans le tableau suivant, il résulte en effet qu'à mesure qu'on ajoute des poids, le mercure est progressivement soulevé ; ces poids P sont bien égaux à chaque instant à la différence des pressions hydrostatiques sur les deux faces du disque augmentée de la traction due à la tension superficielle ; quant à la rupture, elle a lieu pour une valeur de P déterminée au moment où l'angle α atteint une valeur égale à l'angle de raccordement du mercure pour le verre, comme cela était à prévoir.

P_{obs}	ϖ	$P_{calc.}$
50^{gr}	$0^{cm},058$	$50^{gr},18$
100	0 ,116	100 ,03
110	0 ,127	109 ,85
115	0 ,134	115 ,38
120	0 ,140	120 ,48
125	rupture	$\alpha = 132^\circ 13'$

Deuxième partie. — EXPÉRIENCES DESTINÉES A METTRE EN ÉVIDENCE LA COHÉSION DES LIQUIDES ET A EN DONNER UNE LIMITE INFÉRIEURE.

Nous avons beaucoup insisté sur l'expérience de Gay-Lussac, parce qu'elle était la seule invoquée jusqu'à présent dans les traités comme preuve de la cohésion des liquides; de ce qui précède, il résulte clairement qu'elle ne nous renseigne en rien sur ce point.

La question de la cohésion des liquides restait donc entière? Y a-t-il ou n'y a-t-il pas cohésion et, si oui, quel en est l'ordre de grandeur ?

Pour la résoudre, il faut, comme nous l'avons dit au début, essayer de réaliser une colonne liquide continue soutenue par sa partie supérieure; nous y sommes parvenus par les deux procédés suivants :

1° Ascension capillaire dans le vide;

2° Emploi des baromètres tronqués.

1° *Ascensions capillaires dans le vide.*

Dans un tube capillaire de rayon r (*fig.* 7), l'eau s'élève à une hauteur h sensiblement égale à $\frac{2F}{r}$, r désignant le rayon du tube et F la tension superficielle du liquide.

Soit ϖ la pression ambiante mesurée en colonne d'eau.

A la base de la colonne liquide soulevée s'exerce de bas en haut une pression ϖ supérieure à la pression $(\varpi - h)$ [1] qui s'exerce de haut en bas sur son sommet : *la colonne liquide est donc soutenue par dessous.*

Si l'on diminue la pression ambiante, il en est encore de même tant que $\varpi \geqq h$.

---

[1] $h = \frac{2F}{r}$ représente, en effet, la diminution de pression qui se produit en traversant le ménisque et qui est due à sa courbure.

Mais, au delà, si la colonne liquide ne se rompt ni ne s'abaisse, le niveau de pression nulle descendra de plus en plus au-dessous du ménisque : la région inférieure de la colonne, sur une longueur ϖ, sera toujours soutenue par dessous, mais la *partie supérieure* $(h - \varpi)$ *sera, en quelque sorte, suspendue à la membrane superficielle*, qui est elle-même fixée à la paroi du tube ou, plus exactement, à la mince couche d'eau qui la recouvre.

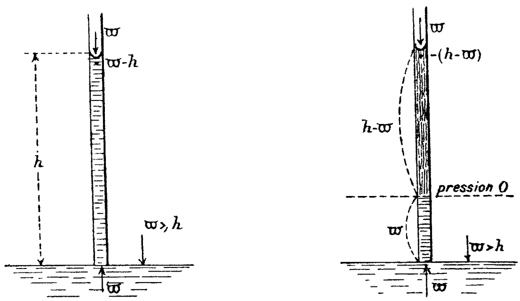

Fig. 7.

Nous aurons réalisé une colonne liquide de longueur $(h - \varpi)$ soutenue par sa partie supérieure et qui ne se rompt pas, grâce à la cohésion.

Remarque. — Pour que l'expérience soit probante, il est donc absolument nécessaire d'amener la pression ambiante à une valeur ϖ inférieure à h ; or, en admettant même qu'on arrive à faire le vide d'air absolu, il restera toujours la pression maximum de la vapeur d'eau qui, à la température ordinaire, est équivalente à 20 centimètres d'eau environ ; d'où la double nécessité d'employer un tube capillaire assez fin pour que l'eau s'y élève à plus de 20 centimètres et de réaliser un vide d'air très parfait.

C'est dire que l'expérience qui a été faite bien des fois, et qui consiste à placer un tube capillaire quelconque sous la cloche d'une machine pneumatique ordinaire, ne prouve absolument rien.

Remarquons qu'il faut, en outre, *purger d'air le liquide, avec beaucoup de soins*, car, s'il reste la plus petite bulle d'air, dès qu'on diminuera la pression, on la verra grossir et rompre la colonne.

Appareil. — L'appareil qui nous a servi à réaliser l'expérience est représenté par la *fig.* 8 : un tube capillaire C, de $0^{cm},007$ de diamètre environ, est élargi à sa partie inférieure et soudé à un ballon de verre A qui formera la cuve à eau; l'orifice B qui sert à l'introduction du liquide est ensuite fermé avec un bon bouchon à l'émeri;

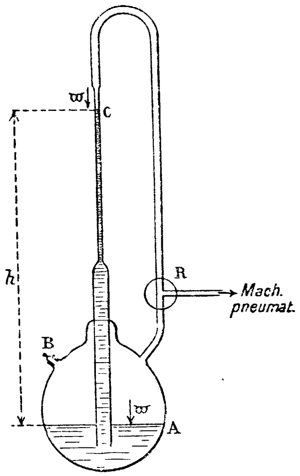

FIG. 8.

le robinet à trois voies R permet les différentes manœuvres du remplissage, puis on le tourne dans la position indiquée sur la figure, de manière à faire le vide simultanément au-dessus de A et de C.

Résultats. — En faisant le vide d'air presque absolu, la colonne liquide, qui avait une longueur de 43 centimètres, ne s'est point rompue : elle a conservé exactement la même hauteur et le même aspect, quel que soit le degré de vide : *la cohésion de l'eau est donc supérieure à* 23 *centimètres d'eau* (1).

Cette méthode nous eût difficilement permis d'aller beaucoup plus loin, car il eût fallu employer des tubes beaucoup plus fins et la colonne liquide devient alors peu visible.

(1) L'expérience était faite à 16° : la pression résiduelle était donc uniquement constituée par la pression maximum de la vapeur d'eau qui, à 16°, équivaut à 20 centimètres d'eau environ.

2° *Méthode des baromètres tronqués.*

Un tube de verre à deux branches très inégales, comme celui représenté sur la *fig.* 9, est soigneusement nettoyé, puis rempli d'eau parfaitement purgée d'air; soit ϖ la valeur en colonne d'eau de

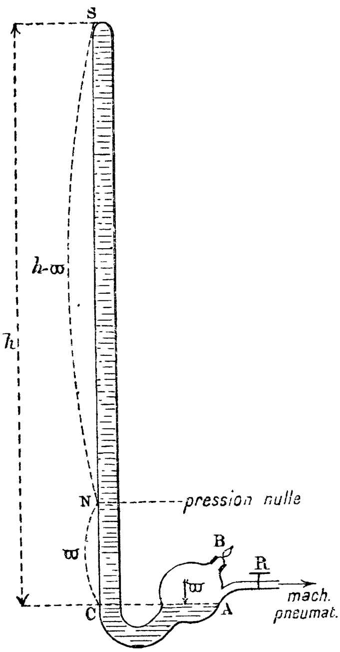

Fig. 9.

la pression qui s'exerce sur le liquide de la petite branche A, pression que l'on peut faire varier à volonté en reliant la tubulure R à une machine pneumatique.

Si le remplissage a été bien conduit, l'*expérience montre que l'on peut diminuer progressivement la pression ϖ jusqu'à une valeur bien inférieure à la différence h des niveaux dans les deux branches*, c'est-à-dire abaisser le plan de pression nulle bien au-dessous de S, *sans que l'eau quitte le sommet du tube.*

Dans ces conditions, la partie inférieure de la colonne liquide, de C en N, sur une longueur ϖ, est soutenue par la pression résiduelle ϖ

qui s'exerce en A ; mais toute la partie supérieure SN *constitue une sorte de corde d'eau de longueur* $(h - \varpi)$ *suspendue au sommet du tube* (1) *et qui ne se rompt pas, malgré son état de tension*, grâce à la cohésion du liquide.

Pour mesurer cette dernière, il suffirait de suspendre ainsi une colonne de plus en plus longue, jusqu'à ce que la rupture se produisît ; mais on conçoit que la moindre bulle de gaz, même invisible, détermine dans la corde un point faible où la colonne se rompt sous un effort bien inférieur à la charge limite ; on ne peut donc obtenir ainsi qu'une limite inférieure de la cohésion du liquide.

Première expérience. — Le tube avait environ $1^{m},50$ de longueur et $0^{m},005$ de diamètre intérieur. Après l'avoir soigneusement nettoyé aux acides, potasse, alcool et eau, on procède à son remplissage, comme on le fait ordinairement pour les baromètres normaux :

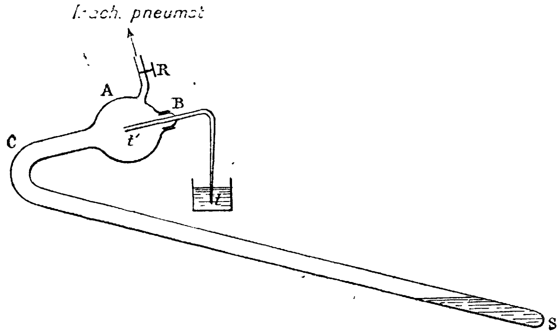

FIG. 10.

Le tube étant placé dans la position indiquée sur la *fig.* 10, on adapte dans la tubulure B un bouchon rodé traversé par un tube tt' très effilé et fermé à la lampe en t; on relie R à une bonne machine pneumatique actionnée par un moteur électrique et qui fonctionnera sans cesse pendant toute la durée du remplissage. Le vide d'air étant très avancé dans le tube, on fait plonger l'extrémité t dans une capsule remplie d'eau bouillie chaude, puis on casse la pointe t : l'eau monte et vient perler très lentement en t', où elle se vaporise en grande partie, se purge très bien de son air, puis coule en S ; dès

(1) Par suite de l'adhésion bien connue de l'eau pour le verre.

qu'il y a, en S, un index d'eau suffisant, on chauffe pour provoquer l'ébullition de l'eau qui s'y trouve et on continue cette ébullition en remontant progressivement tout le long du tube, jusqu'à ce que le remplissage soit terminé.

On laisse alors refroidir l'appareil pour que les dernières traces d'air se dissolvent dans l'eau ; on rend la pression atmosphérique en A, puis on retourne le tube dans la position de la *fig.* 9 ; on remplace le bouchon à tube tt' par le bouchon rodé plein, et l'appareil est prêt à fonctionner.

La différence des niveaux h était de $1^m,35$; nous avons pu faire le vide d'air presque absolu au-dessus de A, sans produire la rupture ; comme la pression résiduelle ϖ se compose alors uniquement de la pression maximum de la vapeur (équivalente à 20 centimètres d'eau environ), il en résulte que la *cohésion de l'eau est supérieure à* $1^m,15$ *d'eau.*

Lorsque nous avons exécuté cette expérience pour la première fois, nous craignions que cet état de tension d'une colonne liquide, si nous arrivions à le réaliser, fût très instable ; aussi avions-nous pris toutes sortes de précautions pour éviter de transmettre au tube toute trépidation, choc ou vibration. Le résultat cherché étant obtenu, nous avons pu parler, frapper sur la table, et même frotter le tube avec les doigts mouillés sans rompre la colonne d'eau ; il fallut, pour provoquer cette rupture, faire vibrer le tube très fortement en le frottant longitudinalement avec les doigts enduits de colophane (1) : *nous étions donc encore très loin de la limite de cohésion.*

Remarque. — Pour remettre l'appareil en état, il suffit de rendre la pression atmosphérique en A ; l'eau remonte alors en S, mais on y voit une toute petite bulle d'air ; il suffit de chasser cette bulle en inclinant le tube, puis de le laisser reposer quelques heures pour qu'il soit de nouveau prêt à servir.

On peut répéter l'expérience quinze, vingt fois... avec le même tube ; si, à la longue, il devient hors d'usage, il suffit de procéder à

---

(1) Quand cette rupture se produit, la colonne liquide SC retombe brusquement, et l'égalisation des niveaux a lieu en AC ; il est à noter que cette rupture se produit en un point quelconque de la colonne, là où il y a un point faible ; mais il reste toujours un petit index d'eau au sommet du tube : c'est donc bien la cohésion de l'eau pour elle-même qui est vaincue et non pas son adhésion pour le verre.

nouveau au remplissage, en remplaçant en B le bouchon plein par le bouchon à tube *tt'*. Ce petit appareil, construit par M. Chabaud, peut donc servir d'*appareil de démonstration* pour les cours.

Deuxième expérience. — L'expérience précédente nous ayant montré que nous étions encore très loin de la limite de cohésion, nous avons fait construire un tube de verre de $5^m,30$ de hauteur et 1 centimètre de diamètre intérieur. Après l'avoir rempli avec les mêmes précautions que le premier, nous l'avons fixé sur un long madrier, puis dressé verticalement dans une salle attenant au grand amphithéâtre de physique de la Sorbonne : nous avons encore pu faire le vide d'air au-dessus du liquide de la petite branche sans rompre la colonne.

Bien que la corde d'eau ainsi suspendue ait ici une hauteur supérieure à 5 mètres, nous sommes encore fort loin de la limite, car la rupture de cette colonne d'eau ne s'est produite qu'à la suite d'une friction énergique avec les doigts enduits de colophane (1).

Troisième expérience. — Expérience mixte eau-mercure. — Il eût été difficile d'aller beaucoup plus loin dans cette voie, par suite de difficultés d'ordre pratique faciles à concevoir. Mais, lorsqu'on veut mesurer l'effort qu'une corde peut subir, on ne s'avise pas d'augmenter sa longueur jusqu'à ce qu'elle se rompe d'elle-même : on y suspend des poids progressivement croissants.

Il s'agissait donc de *réaliser une colonne d'eau fixée par sa partie supérieure et d'exercer sur elle une traction croissante, jusqu'à provoquer sa rupture;* nous y sommes parvenus de la manière suivante :

Un tube de verre de forme analogue à ceux qui nous ont déjà servi est rempli, avec les mêmes soins usités pour les expériences précédentes, d'une longue colonne de mercure surmontée de quelques centimètres d'eau (*fig.* 11).

Quand on diminue progressivement la pression ϖ, le plan de

(1) Pour répondre à une objection qui peut se présenter à l'esprit, je signale que les actions des parois latérales du tube ne peuvent nullement aider à soutenir la colonne liquide, car ces actions sont, par symétrie, normales aux parois, c'est-à-dire horizontales : elles n'ont donc pas de composantes verticales.

Du reste, l'objection tombe d'elle-même, si l'on songe au baromètre : que deviendrait la théorie de cet instrument si les parois latérales pouvaient aider à soutenir la colonne liquide : il n'indiquerait plus la pression atmosphérique?

Enfin, signalons que nos expériences ont été exécutées avec des tubes de diamètres très différents, et qu'elles réussissent aussi bien avec des tubes larges de 15 millimètres de diamètre qu'avec des tubes beaucoup plus fins.

pression nulle s'abaisse progressivement bien au-dessous de L, et une *colonne de mercure de plus en plus longue tire sur l'eau.*

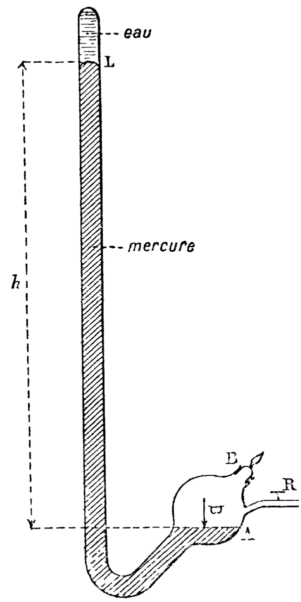

Fig. 11.

Le tube employé avait 1 mètre de longueur et 1 centimètre de diamètre intérieur environ ; on a pu le dresser verticalement et ensuite faire le vide absolu au-dessus du liquide, en A, sans produire la rupture : la *colonne de mercure suspendue à l'index d'eau avait alors* 90 *centimètres de hauteur ;* bien plus, il a fallu, pour provoquer cette rupture, faire vibrer énergiquement le tube comme dans les expériences précédentes [1].

---

[1] Pour réussir cette expérience, il ne suffit pas d'effectuer le remplissage, comme il a été dit plus haut ; celui-ci terminé, on dispose le tube dans la position de la *fig.* 10, on fait le vide aussi complet que possible par R, puis on fait vibrer le tube très énergiquement dans toute sa longueur, et particulièrement au niveau du ménisque eau-mercure.

De nombreuses bulles prennent alors naissance et viennent se dégager dans l'ampoule. Il est facile de voir que le mécanisme de cette ébullition ne diffère pas essentiellement de celui du phénomène désigné ordinairement sous ce nom.

Au bout d'un certain temps, les bulles apparaissent plus difficilement : on rétablit alors la pression atmosphérique, puis on redresse le tube qui est prêt à servir.

La cohésion de l'eau, son adhésion pour le mercure et la cohésion de celui-ci (1), *qui toutes trois interviennent dans cette expérience, sont donc de beaucoup supérieures à* 90 *centimètres de mercure, c'est-à dire à plus de* 12 *mètres d'eau* (1,2 mégadyne par centimètre carré).

CONCLUSION.

On voit par ce qui précède que *la cohésion de l'eau, loin d'être mesurée approximativement, comme on l'a souvent répété, par une colonne d'eau d'environ* 5 *millimètres de hauteur, a une valeur plusieurs milliers de fois plus grande.*

Par un raisonnement approximatif, nous avons pu nous rendre compte que cette cohésion doit être de l'ordre de $\frac{F}{\varepsilon}$, F désignant la constante superficielle du liquide et ε le rayon de la sphère d'action moléculaire. Elle serait donc représentée par plusieurs centaines de mètres d'eau. Rappelons à ce propos les expériences déjà anciennes de M. Berthelot sur la dilatation forcée des liquides, expériences dans lesquelles la tension de rupture a été évaluée à une vingtaine d'atmosphères.

Remarque. — Cette grande valeur de la cohésion des liquides a comme conséquence immédiate de faire rejeter le raisonnement classique par lequel on justifie la loi de Tate relative à l'écoulement des gouttes par un orifice capillaire ; nous nous proposons de revenir ultérieurement sur cette question.

---

(1) Quelques expériences ont été effectuées avec le *mercure seul* par la méthode des baromètres tronqués ; cette fois, la rupture a lieu entre le verre et le mercure ; c'est donc l'*adhésion verre-mercure* qui est vaincue et non la cohésion du mercure. — Nous avons pu soutenir ainsi par son sommet une colonne de 30 centimètres de mercure ; mais les difficultés du remplissage font supposer que nous étions loin de la limite.