

corps mobile et sur le corps fixe : c'est le cas d'une sphère ou d'un cylindre roulant sur le sol.

Dans ce genre de mouvement, comme dans le glissement, il y a des frottements tant au départ que pendant le mouvement même. Mais la valeur de ces frottements, forces qui s'opposent au mouvement, est bien moindre que dans le cas du glissement. Aussi y a-t-il toujours avantage à substituer le roulement au glissement, dès que les forces en jeu ont une certaine valeur. D'où l'emploi des roues dans les véhicules, en général (dans les traîneaux, l'effet du glissement est sans grand inconvénient, à cause du poli des surfaces qui sont en contact); d'où aussi l'emploi des galets qui, dans un grand nombre de cas, sont usités pour guider le mouvement de certaines pièces et remplacer les glissières dans lesquelles, comme leur nom l'indique, il y a glissement des surfaces en contact.

Il importe de remarquer qu'il ne suffit pas qu'une pièce soit affectée d'un mouvement de rotation pour qu'il y ait roulement : il y a glissement dans le mouvement d'un axe dans un coussinet, parce que le contact a lieu toujours au même point de l'une des pièces, tandis que dans le roulement, le point de contact doit changer à la fois sur les deux pièces qui se touchent.

93. **Usure. Dureté.** — Lorsque deux corps solides glissent l'un sur l'autre il arrive presque toujours que la surface de l'un des corps au moins est entamée, que des fragments plus ou moins fins s'en détachent : il y a *usure* de ce corps.

L'usure a été étudiée à deux points de vue suivant l'étendue de la surface, suivant laquelle le contact a lieu : on a surtout examiné le cas où l'un des corps touche l'autre par une partie tranchante, aiguë; s'il se produit une action, elle se manifeste par l'apparition d'un sillon plus ou moins large, plus ou moins profond : on dit alors que le corps sur lequel apparaît ce sillon a été *rayé* par l'autre corps; d'autre part, celui-ci est dit plus *dur* que le premier.

Dans le langage courant, les mots *dur*, *dureté* ne sont pas nettement définis; tantôt on les emploie dans le sens que nous venons d'indiquer, tantôt on les confond avec *tenace*, *ténacité*, tantôt on les oppose aux mots *mou*, *plasticité*. En physique, en chimie et en minéralogie ces mots ont un sens précis : un corps A est plus *dur* qu'un corps B s'il est susceptible de rayer celui-ci.

A ce point de vue, le diamant est le plus dur de tous les corps et le corindon vient immédiatement après.

Pour les métaux, l'ordre de dureté est le suivant :

Acier trempé, fer, platine, cuivre, argent, or, antimoine, étain, plomb.
D'après Burdach, les principales matières organiques peuvent être rangées ainsi qu'il suit par ordre de dureté :

Émail, ongles, os, cartilages, tendons, muscles, glandes, membranes muqueuses, membranes séreuses, substance cérébrale, neurine, tissu cellulaire, tissu adipeux.

Nous devons dire que, seules, les quatre premières substances de cette liste peuvent être réellement considérées comme solides, et que ce n'est réellement qu'à elles que peut s'appliquer l'idée de dureté.

Dans le cas de corps cristallisés dans un système autre que le système cubique, la dureté peut n'être pas la même sur les diverses faces, ou, dans une même face, suivant des directions différentes, comme Huyghens l'a reconnu pour le spath d'Islande. Ces faits répondent bien à l'idée qu'on se fait de la constitution moléculaire dissymétrique des cristaux, de leur anisotropie.

Lorsqu'on frotte contre une surface un corps plus dur réduit en poudre, chaque particule de ce corps raye la surface, et si l'action est suffisamment prolongée la surface peut être entièrement renouvelée, une couche excessivement mince ayant été enlevée; si la poussière employée est très fine, la nouvelle surface peut présenter un beau poli.

Signalons la particularité qui se présente dans la taille du diamant : ce corps, qui est le plus dur, ne peut être rayé par aucun autre; il ne peut être usé que par sa propre poudre qui est connue sous le nom d'*égrisée*.

Si les corps frottent par des surfaces étendues, il y a usure de l'un des corps, quelquefois des deux : l'usure augmente avec la force qui presse les corps l'un contre l'autre. On étudie ce phénomène en maintenant les corps en mouvement pendant un temps déterminé et pesant les résidus provenant de l'usure.

Dans le cas des corps hétérogènes, il se produit quelquefois des effets particuliers dont chacun exige une explication spéciale.

Les effets que nous venons d'indiquer présentent de nombreuses applications; on les retrouve dans la gravure au burin sur métal, dans l'action des râpes, des limes; ils expliquent l'usage de certaines poudres pour nettoyer, pour polir, ils rendent compte de l'emploi des meules pour affûter les lames tranchantes, etc.

ART. II. — ACTIONS RÉCIPROQUES DES SOLIDES ET DES LIQUIDES

94. — Les actions réciproques des solides et des liquides doivent être étudiées dans des conditions variées :

Les deux corps en présence peuvent conserver l'un et l'autre leur état; mais on peut les considérer lorsqu'ils sont en repos l'un par rapport à l'autre ou lorsque l'un des deux est en mouvement par rapport à l'autre. Le premier cas correspond aux phénomènes que l'on désigne

d'une manière générale sous le nom de *phénomènes capillaires*; le second cas comprend l'étude du *frottement* entre liquide et solide.

Il peut arriver que dans l'action d'un solide sur un liquide, celui-ci cesse d'exister à l'état libre : on dit alors qu'il y a *imbibition* du solide par le liquide.

Enfin il peut arriver, au contraire, que le solide cesse d'exister à cet état et que la masse entière devienne liquide; il y a alors *dissolution* du solide dans le liquide.

Nous examinerons successivement ces divers cas.

95. Capillarité. Ménisques. — Lorsque dans un liquide on plonge, par exemple, une baguette d'un corps solide, il peut arriver qu'en l'en retirant, la baguette entraîne à sa surface une couche du liquide, ou qu'elle sorte absolument sèche. Dans le premier cas, on dit que le liquide *mouille* le solide; dans le second cas, le liquide ne *mouille pas* le solide.

Lorsqu'un liquide mouille un solide, tout se passe évidemment comme s'il existait une attraction entre les deux corps; dans le cas contraire, on ne peut pas dire que l'attraction n'existe pas, mais simplement, si elle existe, qu'elle est moindre que l'attraction du liquide par lui-même.

On ignore d'ailleurs absolument à quelle autre condition se rapporte cette propriété pour un solide d'être mouillé par un liquide déterminé ou de n'être pas mouillé.

Les conditions d'équilibre indiquées en hydrostatique (LIX) pour un liquide se rapportent au cas où le liquide serait absolument libre, c'est-à-dire serait soustrait à toute action autre que celle de son poids. On comprend donc que la présence d'un solide qui exerce sur le liquide une certaine action doit modifier les conditions de l'équilibre : c'est en effet ce qui arrive.

Dans les conditions simples étudiées en hydrostatique, nous avons vu que, au moins sur une étendue restreinte, la surface libre d'un liquide doit être plane et horizontale. En réalité, et sauf des cas exceptionnels, cette condition n'est jamais réalisée pour un liquide dans le voisinage des parois solides qu'il touche. L'observation montre, en effet, que tantôt, dans le voisinage d'un solide *ab* (fig. 68), le li-

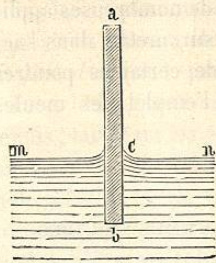


Fig. 68.

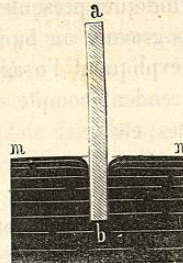


Fig. 69.

quide se relève au-dessus du plan horizontal de la surface libre *mn*; que tantôt, au contraire, il s'abaisse au-dessous de ce plan (fig. 69).

La surface courbe ainsi constituée par le liquide est appelée un *ménisque* : le ménisque est concave s'il y a élévation du liquide, il est

convexe s'il y a dépression. La forme de la surface liquide dépend de celle du solide : elle est cylindrique si le solide est plan, c'est une surface de révolution si le solide a la forme d'un cylindre circulaire. Pour les autres formes du solide, qui se rencontrent rarement d'ailleurs, le ménisque est constitué par des surfaces moins simples.

Il existe une relation importante entre ce phénomène et le précédent : le ménisque est concave toutes les fois que le liquide mouille le solide, il est convexe dans le cas contraire.

96. Dénivellations capillaires. — On dit, d'autre part, en hydrostatique, que dans des vases communicants, les surfaces libres sont dans un même plan horizontal. En réalité, il n'en est ainsi que si les surfaces libres ont des dimensions assez grandes, dépassant par exemple 35 millimètres pour l'eau et le mercure, ou si les surfaces libres ont exactement la même forme et les mêmes dimensions. Nous supposons, dans ce qui suivra, que l'une des surfaces libres est de grandes dimensions, soit qu'il s'agisse d'un tube recourbé à branches ayant des diamètres inégaux (fig. 70, 71), soit que, dans un vase de grand diamètre, on introduise un tube de moins de 35 millimètres de diamètre (fig. 72, 73).

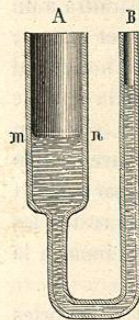


Fig. 70.

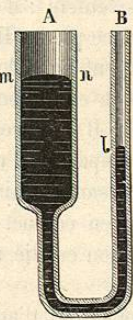


Fig. 71.

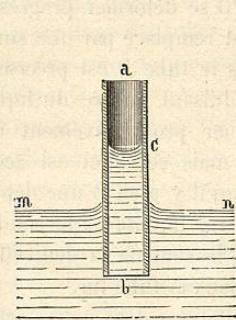


Fig. 72.

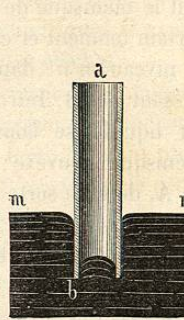


Fig. 73.

Dans ces conditions, on reconnaît que la surface libre dans le tube fin n'est jamais dans le plan horizontal *mn* de la surface libre du reste du liquide : il y a toujours dénivellation. Tantôt il y a élévation dans le tube fin, tantôt il y a dépression : le premier cas correspond à l'existence d'un ménisque concave dans le tube fin, le second à l'existence d'un ménisque convexe.

En général, par conséquent, l'élévation dans le tube fin se produira lorsque le liquide mouillera le solide, la dépression lorsque le liquide ne mouillera pas le solide. Mais il importe de remarquer que la dénivellation est liée, non à la nature des corps en présence, mais à la forme du ménisque, de telle sorte que pour les mêmes corps on observe l'un ou l'autre cas, si l'on parvient à obtenir des ménisques de forme différente.

C'est ce que prouve l'expérience suivante : soient A, B (fig. 74), deux tubes communiquants, de diamètre différent, dans lesquels on introduit un liquide mouillant la paroi, de l'eau par exemple. Si la quantité de

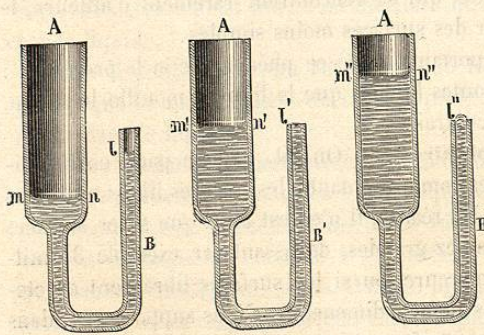


Fig. 74.

liquide est insuffisante pour remplir ces tubes, on voit (I) qu'un ménisque concave se forme dans le tube fin B et que son niveau b est au-dessus de celui mn du liquide dans le tube A.

Si on ajoute du liquide en A, le niveau monte des deux côtés, et la différence de niveau reste la même jusqu'à ce que le liquide arrive au

sommet de B. En continuant à verser lentement du liquide en A, on voit le ménisque de B se déformer progressivement : il disparaît à un certain moment et est remplacé par une surface plane (II) ; à cet instant, le niveau $m'n'$ dans le tube A est précisément dans le plan horizontal passant par B. Introduisant encore du liquide en A, on voit la surface du liquide se bomber progressivement en B et présenter ainsi un ménisque convexe ; mais cet effet est accompagné d'une surélévation en A, de telle sorte qu'il y a en B une dépression du niveau par rapport à celui $m''n''$ de A. Le liquide et le solide en contact étant restés les mêmes, on voit que le sens de la dénivellation est lié uniquement à la forme du ménisque dans le tube fin.

97. — Les dénivellations dont nous parlons sont d'autant plus fortes que les ménisques se produisent dans des espaces plus restreints : elles ont été étudiées surtout dans des tubes dont le diamètre a été comparé, avec quelque exagération, à celui des cheveux : d'où le nom de *phénomènes capillaires* appliqué à ces actions et celui de *capillarité* à l'ensemble des faits qui s'y rattachent.

On étudie également les dénivellations qui se produisent entre des plans parallèles très rapprochés pour lesquels aussi les dénivellations augmentent lorsque la distance des plans diminue.

Ces dénivellations sont soumises à des lois simples qui ont été étudiées par divers physiciens, notamment par Jurin et par Gay-Lussac. Voici les lois auxquelles on a été conduit.

1^{re} LOI. — *Pour un même solide et un même liquide en contact dans des tubes cylindriques à section circulaire, les dénivellations sont en raison inverse des diamètres des tubes.*

2^e LOI. — *Les dénivellations entre deux plans parallèles sont la moitié de ce qu'elles seraient dans des tubes dont le diamètre serait égal à la distance des plans.*

Il est très important de remarquer que les diamètres des tubes ou les distances des plans qui interviennent dans ces lois sont les valeurs de ces grandeurs à la hauteur où sont formés les ménisques. Il est facile de vérifier cette dernière loi en prenant des cloches ou tubes de grand dia-

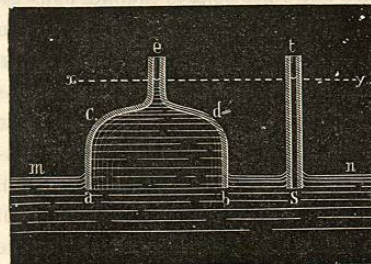


Fig. 75.

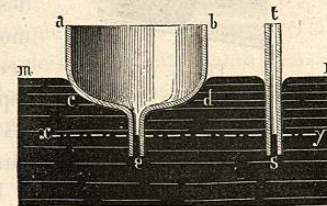


Fig. 76.

mètre $abcd$ terminés par des tubes fins e (fig. 75, 76) : les dénivellations sont les mêmes que celles observées dans des tubes cylindriques st ayant le même diamètre que les tubes fins e qui terminent les cloches.

98. — En examinant les différents cas que nous venons d'examiner, on reconnaît que tout se passe comme si chaque ménisque était le siège d'une force dirigée de sa convexité vers sa concavité, force d'autant plus grande que le rayon du ménisque serait plus petit. L'existence de cette force s'explique d'ailleurs par l'existence de la tension superficielle : si la surface du liquide se comporte comme constituée par une sorte de membrane élastique tendue, et si l'on admet que cette membrane soit fixée par ses bords sur les parois du tube, la tension qui résulte de sa forme courbe doit avoir pour effet d'exercer sur le liquide une pression dirigée de la convexité vers la concavité, la membrane tendant à reprendre la forme plane.

99. **Effets divers dus à la capillarité.** — L'existence des ménisques permet de se rendre compte de certains mouvements dus aux actions capillaires.

Nous signalerons, par exemple, les déplacements observés pour une goutte liquide qu'on introduit dans un tube conique (fig. 77) : la goutte se rapproche du sommet du cône si le liquide mouille le solide (I), elle s'en éloigne dans le cas contraire (II). Il doit en être ainsi, si l'on remarque que chaque ménisque correspond à une force et que cette force est d'autant plus grande que le rayon de courbure du ménisque est plus petit. C'est donc la force correspondant au ménisque le plus voisin du sommet qui est la plus considérable, c'est elle qui donne le sens de la résultante

des deux actions et par suite le sens du mouvement de la goutte liquide; ce sens doit donc être dirigé de la convexité à la concavité du petit ménisque, vers le sommet du cône pour le cas du ménisque concave (liquide mouillant le solide), vers la base du cône pour le cas du ménisque convexe (liquide ne mouillant pas le solide).

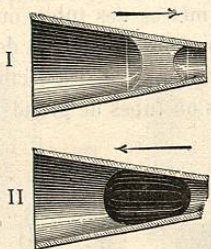


Fig. 77.

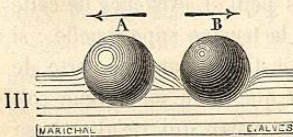
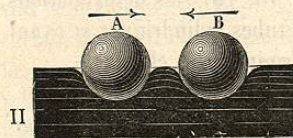
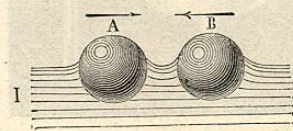


Fig. 78.

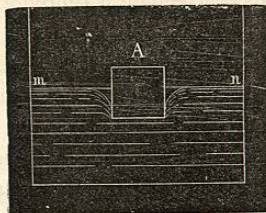


Fig. 79.

Dans ces deux cas, on peut dire que, par suite de la formation des ménisques qui prennent naissance autour du corps, le volume de liquide déplacé est très supérieur à celui du corps lui-même, et que la poussée qui en résulte peut être égale au poids du corps. On se rend encore mieux compte de l'effet, en considérant la couche superficielle comme une membrane élastique dont la déformation fait naître des forces dont la résultante fait équilibre au poids du corps.

C'est par un effet de ce genre que certains insectes marchent à la surface de l'eau : les forces résultant de la déformation de la couche super-

ficielle par les pattes qui ne sont pas mouillées suffisent pour faire équilibre au poids du corps.

Des mouvements peuvent également se produire entre des solides mobiles dans un liquide, des lames plongeant en partie ou des corps flottants (fig. 78) : l'observation montre, et la considération des pressions permet de comprendre, que les corps se rapprochent si tous les deux ils sont mouillés par le liquide (I) ou s'ils ne le sont ni l'un ni l'autre (II), mais qu'ils s'éloignent si l'un est mouillé tandis que l'autre ne l'est pas (III).

100. — L'existence des ménisques, ou ce qui revient au même au fond, celle de la tension superficielle, permet de se rendre compte du fait que certains corps peuvent flotter à la surface d'un liquide moins dense. C'est ainsi que certains cristaux, le sel marin, par exemple, peuvent flotter à la surface de leur dissolution aqueuse, d'une densité moindre (fig. 79); on peut également faire flotter à la surface de l'eau une aiguille d'acier qu'on a légèrement graissée, par exemple en la passant entre les doigts, de manière à ce qu'elle ne soit pas mouillée par le liquide.

Dans ces deux cas, on peut dire que, par suite de la formation des ménisques qui prennent naissance autour du corps, le volume de liquide déplacé est très supérieur à celui du corps lui-même, et que la poussée qui en résulte peut être égale au poids du corps. On se rend encore mieux compte de l'effet, en considérant la

ficielle par les pattes qui ne sont pas mouillées suffisent pour faire équilibre au poids du corps.

101. — Les phénomènes de mouvement que nous avons signalés dans des tubes coniques sont liés absolument à l'existence des ménisques : ils ne sauraient exister sans ceux-ci. Il n'y a donc pas à invoquer les actions capillaires pour rendre compte des mouvements du sang dans le système des vaisseaux dits capillaires à cause de leur petit diamètre : la masse sanguine est continue, il n'y a donc pas de ménisque et par suite pas d'actions capillaires.

Les actions de ce genre ont été invoquées d'autre part par certains auteurs pour expliquer le mouvement de la sève ascendante dans les végétaux. Si dans ceux-ci il y avait des vaisseaux continus remplis de liquide, la même objection que ci-dessus se présenterait; mais, en réalité, le phénomène n'est pas aussi simple : la sève se meut dans une succession de cellules ne constituant pas des vaisseaux, et rien ne prouve qu'il y ait continuité dans le liquide. La question est donc complexe et l'on n'a pas encore une explication certaine de ce phénomène.


Par contre, les actions capillaires expliquent d'une manière suffisante l'élévation des liquides dans les corps poreux, comme l'ascension de l'eau dans un morceau de sucre dont le pied baigne seulement dans ce liquide, l'action du papier buvard plongé dans l'encre qui s'élève au-dessus de son niveau, l'élévation de l'eau dans un tube rempli de sable fin, etc.

102. **Influence perturbatrice des actions capillaires.** — L'existence des forces dues à la formation des ménisques doit entrer en ligne de compte toutes les fois qu'il s'agit de l'équilibre des liquides. C'est ainsi que, dans un baromètre, si le diamètre intérieur du tube est moindre que 35 millimètres, l'action capillaire a pour effet de produire une dépression relative, c'est-à-dire d'empêcher le mercure d'atteindre le niveau auquel il parviendrait s'il n'y avait pas à tenir compte de la capillarité, si le diamètre du tube dépassait 35 millimètres; il y a donc lieu de faire une correction pour avoir la véritable valeur de la hauteur barométrique.

Dans un autre ordre d'idées, la capillarité amène également des perturbations dans le cas des corps flottants; la production d'un ménisque autour de la tige des aréomètres modifie la condition de la flottaison. S'il s'agit de l'aréomètre de Nicholson, qui reste toujours plongé dans le même liquide, on peut admettre, au moins approximativement, que l'action reste invariable et qu'elle disparaît dans les évaluations des différences de poids; mais il ne saurait en être de même lorsque des aréomètres à tige fine (aréomètre de Fahrenheit, de Baumé, alcoomètre etc.) sont plongés successivement dans des liquides différents. L'action capillaire varie alors et on ne peut la négliger sans commettre des erreurs; comme d'autre part il est au moins difficile d'en tenir compte, on voit qu'on ne peut compter sur l'exactitude des valeurs fournies par ces appareils.

103. **Des chapelets de bulles de gaz.** — L'existence de bulles gazeuses dans un tube fin contenant un liquide, produit des effets qu'il est utile de signaler.

Supposons un tube cylindrique AB (fig. 80) dans lequel soit un liquide mouillant les parois par exemple, et présentant des bulles gazeuses en

I  A h \leftarrow \rightarrow h B


II  A h_1 \leftarrow \rightarrow h_1 B

Fig. 80.

divers points. Si la pression H est la même aux deux extrémités du tube, il s'établira un état d'équilibre dans lequel, nécessairement par raison de symétrie, les ménisques qui terminent chaque goutte liquide seront identiques. Pour une goutte déterminée, les forces h résultant de l'existence de ces ménisques se contre-balancent et les pressions des bulles de gaz situées de part et d'autre seront égales.

Si à une extrémité A la pression H s'accroît, et devient H' son premier effet, si la variation est progressive, est non de déplacer la goutte liquide, mais de modifier les ménisques : la courbure du premier ménisque en A augmente, celle du deuxième diminue ; la force résultant de l'existence du ménisque en A augmente et devient $h_1 > h$, la force due à l'existence du ménisque en B diminue et devient $h'_1 < h$: la pression transmise à la bulle BC est donc seulement $H' - h_1 + h'_1$, valeur plus petite que H' . L'action se continue à la goutte suivante, et à celles qui viennent ensuite, si bien qu'à une certaine distance de l'origine du tube, les bulles de gaz ne subissent aucune modification de pression résultant de la variation de H à H' . Une colonne liquide coupée de bulles gazeuses peut donc, pour une longueur suffisante, s'opposer à la transmission des pressions. Dans des expériences directes, Jamin a pu, à l'aide d'une colonne d'eau coupée de bulles d'air, faire équilibre à une pression de trois atmosphères.

Un raisonnement analogue au précédent montre que le résultat est le même lorsque le liquide ne mouille pas le solide. On le comprend aisément d'ailleurs, car si, dans ce cas, des forces agissent en sens contraire de celui qu'elles ont dans le cas précédent, les modifications des ménisques, par suite d'une augmentation de pression, sont également en sens inverse, ce qui fait compensation.

104. — L'observation montre que pour des tubes mouillés par un liquide, l'élévation est indépendante de la nature du tube. On peut se rendre compte de cet effet en remarquant que le liquide forme une première couche très mince adhérant absolument à la paroi et que, en réalité, le liquide monte dans un tube formé par sa substance même.

Il n'en est pas de même pour les cas où le tube n'est pas mouillé par le liquide : et, en effet, on ne saurait alors invoquer la même explication.

On ne sait rien de précis, dans le premier cas, sur l'influence de la nature des liquides. Plusieurs physiciens, M. Decharme notamment, ont étudié l'action de sels divers en dissolution dans l'eau : bien que quelques résultats intéressants aient été obtenus, on ne saurait encore citer de lois dont la connaissance puisse être utile au point de vue où nous avons à nous placer.

Disons enfin que les phénomènes capillaires varient avec la température, les dénivellations étant d'autant moindres en général que la température est plus élevée.

105. **Résistance dans les liquides en mouvement.** — Lorsqu'un liquide et un solide en contact sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre, il se produit des actions mécaniques qui ne sont pas négligeables, en général. Nous nous occuperons des deux cas simples où la vitesse est perpendiculaire ou parallèle à la surface du solide que nous supposons être un plan.

Lorsqu'une lame solide est placée verticalement dans un liquide au repos, cette lame éprouve sur ses deux faces des pressions égales et directement opposées qui se font équilibre, et prend, par suite, la même position que si elle était soumise à la seule action de la pesanteur. Il n'en est plus ainsi si le liquide est en mouvement : les pressions qui s'exercent sur les deux faces de la lame ne sont plus égales : si la direction de la vitesse du liquide est horizontale, il y a augmentation de pression d'un côté, diminution de l'autre : sous cette double influence, la plaque, si elle est mobile, s'incline d'un certain angle qui dépend de la vitesse du liquide. On peut même déduire cette vitesse de l'inclinaison observée ; dans des recherches d'hydraulique on a souvent remplacé la lame solide par un pendule constitué par une sphère suspendue à l'extrémité inférieure d'une tige mobile autour de son extrémité supérieure ; c'est le *pendule hydrométrique*.

Le même principe a été appliqué en physiologie par divers observateurs, Vierordt, Chauveau, Lortet, pour mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux : les appareils, dont certains modèles enregistrent les valeurs obtenues, ont été appelés *hématochromètres*, *hémadromomètres*, *hémadromographes* ; ils consistent en un petit pendule, ou une petite lamelle solide, soumis à l'action du sang en mouvement soit dans une caisse, soit dans un tube interposé entre les deux bouts d'un vaisseau préalablement divisé.

Il n'existe pas de relation simple qu'on puisse indiquer *a priori* entre la déviation observée et la vitesse du liquide, et les appareils doivent être gradués directement en les soumettant à l'action de courants liquides de vitesse connue.

Il y a également production d'une force lorsqu'une veine liquide vient rencontrer un corps solide placé dans l'air ; mais ici le phénomène est

d'une autre nature et il est analogue à ce qui se produit dans le cas du choc des corps, la veine liquide agissant en vertu de la force vive qu'elle communique au solide. En même temps, la veine disparaît et est remplacée par une lame liquide qui s'étale autour de la surface solide choquée : Savart a étudié quelques-uns des effets qui se produisent, mais il n'y a pas lieu d'insister.

106. Frottement dans les liquides. — Lorsqu'un liquide est en mouvement dans le voisinage d'un solide dont la surface est parallèle à la direction de la vitesse du liquide, il y a production d'un frottement qui a pour effet mécanique de ralentir le mouvement du liquide, de diminuer sa vitesse : ce frottement croît avec la vitesse du liquide.

Considérons un tuyau cylindrique reliant deux réservoirs où l'on maintient à des niveaux différents, mais invariables, les surfaces libres; la pression n'est donc pas la même aux extrémités de ce tuyau et, sous l'influence de cette différence de pression, l'écoulement se produit dans le tube. On peut déterminer, par le raisonnement, quelle vitesse le liquide devrait prendre dans le tube, s'il n'existait aucune résistance et par suite quel devrait être le *débit*, c'est-à-dire la quantité de liquide écoulé dans un temps donné, une seconde par exemple. L'expérience montre que le débit réel est toujours plus petit que la valeur ainsi calculée; la différence tient précisément à l'effet du frottement exercé par les parois du tube sur le liquide qui y circule.

Il est sans intérêt de signaler ici les formules qui ont été données pour le cas des conduites dont les dimensions sont celles employées dans la pratique de l'hydraulique.

Il n'en est pas de même pour le cas où les tuyaux traversés par le liquide sont de très petits diamètres, où il s'agit de tubes capillaires. On peut comprendre que, dans ces tubes, la résistance de la paroi prenne une importance de plus en plus grande, en remarquant que dans une section du tube, la surface variant comme le carré du rayon du tube, décroît plus rapidement quand ce rayon diminue que le périmètre mouillé qui varie seulement proportionnellement au rayon. La question, qui présente un intérêt réel parce qu'elle a son application dans l'écoulement du sang dans les capillaires, a été étudiée par Poiseuille, qui a évalué le débit de tubes capillaires, en faisant varier successivement la pression et la longueur, et en opérant sur des tubes de diamètres différents. Il est parvenu à l'énoncé suivant qui a été sensiblement vérifié par des recherches ultérieures dues à divers physiciens :

La quantité de liquide qui traverse dans un temps donné un tube capillaire est proportionnelle à la pression qui produit l'écoulement, en raison inverse de la longueur du tube, et proportionnelle à la 4^e puissance du diamètre.

Cette loi est applicable, d'une manière générale, à l'écoulement des liquides à travers des espaces capillaires quelconques.

107. — L'influence des parois des tuyaux dans lesquels s'écoulent les liquides, se manifeste par des effets qui ne se rattachent pas directement aux questions que nous venons d'étudier, mais qu'il est cependant nécessaire de signaler.

Lorsque, dans une conduite traversée par un liquide animé d'une certaine vitesse, on vient à arrêter brusquement l'écoulement, il se produit, par suite de l'incompressibilité de l'eau et de la rigidité des parois, un choc d'autant plus violent que la vitesse était plus grande, choc qui est connu sous le nom de *coup de bélier*. Ce choc a pour effet de tendre à détériorer la canalisation et, à cause de cela, il y a intérêt à l'éviter : il faut pour cela employer la force vive du liquide en mouvement à produire une action qui ne soit pas nuisible; on obtient ce résultat en mettant en communication avec la canalisation un vase clos rempli d'air. Lors de l'arrêt brusque du liquide la force vive de celui-ci produit la compression du gaz, et, se trouvant ainsi utilisée, ne produit plus d'effet sur les parois. Cette disposition doit être adoptée toutes les fois que le liquide est soumis dans les conduites à une forte pression qui lui communique une vitesse notable. Il importe de remarquer, d'autre part, que lorsque l'écoulement du liquide recommence, la pression du gaz a pour effet d'amener plus rapidement la vitesse à sa valeur définitive, ce qui augmente le débit initial.

Le rôle utile du réservoir d'air est surtout important si, pour une cause quelconque, l'écoulement du liquide est fréquemment interrompu : on reconnaît alors que, par suite du retour plus rapide au régime permanent (LXIX), le débit de la conduite est augmenté.

On peut facilement concevoir que le résultat doit être le même si l'on met en jeu les propriétés élastiques de corps quelconques autres qu'une masse d'air : c'est ce qui se produit, en particulier, si la conduite, au lieu d'avoir des parois rigides, présente des parois élastiques. M. Marey a mis directement en évidence, par l'expérience suivante, l'augmentation du débit dans ce cas :

On adapte à un réservoir rempli de liquide un tube en caoutchouc sur lequel peut presser un levier qui interrompt à volonté le passage du liquide. Ce tube se bifurque et communique d'une part à un tube rigide, en verre, par exemple, d'une certaine longueur, et d'autre part à un tube en caoutchouc de même diamètre et de même longueur. Tant que l'écoulement est continu, le débit est le même pour les deux tubes, comme on peut aisément le reconnaître en recueillant le liquide qui s'écoule à l'extrémité de ces tubes. Mais si l'on agit sur le levier de manière à agir périodiquement sur le premier ajutage et à interrompre l'écoulement, une différence appréciable se manifeste : l'élasticité du