

Bibliothèque numérique

medic@

Maissiat, Jacques. - Des lois du mouvement des liquides dans les canaux, et de leurs applications à la circulation des êtres organisés en général

1839.

Paris : Imprimerie de Béthune et Plon

Cote : 90975



Licence ouverte. - Exemplaire numérisé: BIU Santé (Paris)

Adresse permanente : <http://www.biusante.parisdescartes.fr/histmed/medica/cote?90975x1839x03x02>

2

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS.

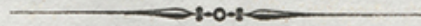


DES LOIS
DU
MOUVEMENT DES LIQUIDES
DANS LES CANAUX,
ET
DE LEURS APPLICATIONS A LA CIRCULATION DES ÊTRES ORGANISÉS EN GÉNÉRAL.

THÈSE DE PHYSIQUE

SOUTENUE AU CONCOURS D'AGRÉGATION POUR LES SCIENCES ACCESSOIRES
A LA MÉDECINE,

PAR JACQUES MAISSIAT, D.-M.-P.



PARIS,
IMPRIMERIE DE BÉTHUNE ET PLON,
RUE DE VAUGIRARD, 36.

1839.



MOUVEMENT DES LIQUIDES

MM. ORFILA, PRÉSIDENT.

DUMAS,

PELLETAN,

RICHARD,

ROYER-COLLARD,

JUGES TITULAIRES.

ADELON,

JUGE SUPPLÉANT.

BUSSY, secrétaire,

BOUCHARDAT,

JUGES ADJOINTS.

BAUDRIMONT,

JUGE SUPPLÉANT.

PARIS.

IMPRIMERIE DE BETHUNE ET PLOU.

RUE DE VAUGRAN, 30.

1839.

DES LOIS

III

MOUVEMENT DES LIQUIDES

DANS LES CANAUX,

ET DE LEURS APPLICATIONS

A LA CIRCULATION DES ÊTRES ORGANISÉS EN GÉNÉRAL.

A MON PÈRE.

Paris, le 10 mai 1861.

(HALLÉ, 10, rue de la Harpe, Paris.)

(HALLÉ, 10, rue de la Harpe, Paris.)

Voici l'ouvrage que j'ai écrit sur le mouvement des liquides dans les canaux, et de leurs applications à la circulation des êtres organisés en général.

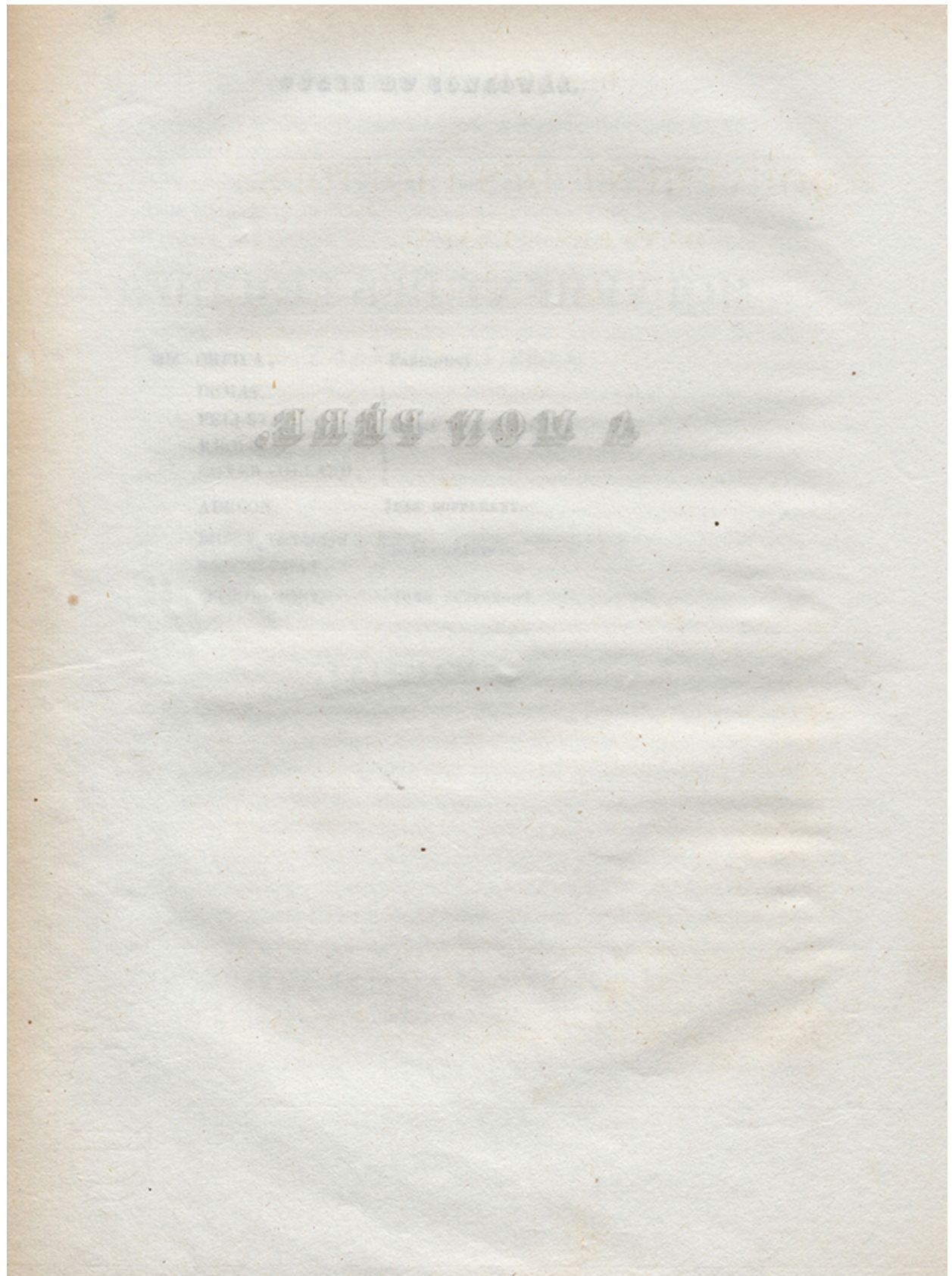
Dans la première partie j'expose les lois d'abord dans des canaux non capillaires, puis dans des canaux capillaires.

Dans la seconde partie je cherche à réunir tout ce qu'on devrait connaître pour que la question de la circulation dans les canaux organisés soit complètement résolue. Je discute ainsi ensuite les principales questions qui se posent sur cette matière.

Voici le tableau synoptique de la marche de l'ouvrage.

De la circulation dans les canaux non capillaires.	De la circulation dans les canaux capillaires.
De la circulation dans les canaux non capillaires.	De la circulation dans les canaux capillaires.

Tableau synoptique de la marche de l'ouvrage.



DES LOIS

DU

MOUVEMENT DES LIQUIDES

DANS LES CANAUX,

ET DE LEURS APPLICATIONS

A LA CIRCULATION DES ÊTRES ORGANISÉS EN GÉNÉRAL.

Ce sera la géométrie elle-même qui corrigera les erreurs des géomètres ; avantage propre à cette science, elle nous éclaire toujours ; quand il faut rétrograder, elle nous dirige ; et ce n'est qu'en l'abandonnant qu'on se perd.

(HALLES *St. des An.*, note de Sauvages
à l'Introd., p. XIX.)

Voici l'ordre que je mettrai dans l'étude de cette question :

Dans une première partie je dirai les lois du mouvement des liquides dans les canaux ; dans une seconde je traiterai de leurs applications.

Dans la première partie j'exposerai les lois d'abord dans des canaux non capillaires, puis dans des canaux capillaires.

Dans la seconde partie je tâcherai, avant tout, de préciser ce qu'on devrait connaître pour que le problème de la circulation dans les corps organisés fût complètement résolu ; je discuterai ensuite les principaux travaux faits sur cette matière.

Voici le tableau synoptique de la marche que je dois suivre :

DES LOIS DU MOUVEMENT DES LIQUIDES.	{ Dans les canaux larges } à parois rigides, état statique. à parois molles, état de mouvement.
	{ Dans les canaux capillaires } Id...
APPLICATIONS A LA CIRCULATION.	{ Problème dans les êtres végétaux. Discussion des principaux travaux.
	{ Problème dans les êtres animaux. }

PREMIÈRE PARTIE.

Je crois devoir préalablement rappeler en peu de mots quelle est la constitution des liquides, car les lois de leur mouvement en dépendent.

Un fluide en général est un corps dont les molécules n'opposent aucune résistance à leur séparation mutuelle, et sont par conséquent parfaitement mobiles les unes autour des autres.

Une conséquence, c'est, dans l'état d'équilibre, l'égalité de pression en tous sens autour d'une même molécule.

Les fluides se divisent en deux classes, les gaz ou fluides éminemment compressibles et élastiques, et les liquides ou fluides très-peu compressibles.

Abstraction faite de la pesanteur, les gaz, pour l'équilibre, exigent une enveloppe complète qui les coërce et contre laquelle ils exercent une certaine pression. Pour les liquides, dans la même hypothèse théorique, il n'y aurait aucune pression sur l'enveloppe.

Dans la réalité, la mobilité des molécules n'est parfaite que dans les fluides élastiques ; dans ceux liquides, il existe une force d'attraction moléculaire, petite, variable d'un liquide à un autre, et, pour un même liquide, avec la température. A cette force se rattachent les explications des phénomènes capillaires et de la viscosité.

On peut déduire toutes les propriétés des liquides en équilibre, de ce principe fondamental, *qu'un liquide transmet sans altération à toutes ses parties une pression exercée sur une portion quelconque de sa surface.*

Pour bien comprendre en quoi consiste ce principe, concevons un vase polyédrique fermé plein de liquide : si l'on fait abstraction de la pesanteur et si l'on suppose en deux points quelconques des parois deux ouvertures égales fermées par deux pistons, le principe ci-dessus est que, si l'on exerce une certaine pression sur un des pistons, il faudra pour l'équilibre exercer sur l'autre une pression égale. En d'autres

termes, si l'on prend pour mesure de la pression celle exercée sur l'unité de surface, elle sera la même partout sur les parois du vase ou sur toute surface plane d'un corps qui serait plongé dans ce liquide.

Si l'on ne fait plus abstraction de la pesanteur, il résulte du principe précédent, qu'un liquide étant renfermé dans un vase et en équilibre, chaque point de la paroi éprouvera, outre la pression extérieure exercée à la surface libre, une autre pression due à l'action de la pesanteur sur les molécules liquides; et cette dernière pression ne dépendra que de la profondeur du point considéré au-dessous de la surface libre.

On peut déduire de là le corollaire suivant : Soit un vase de forme quelconque, de la forme d'un cœur, par exemple, avec ses colonnes et ses valvules, si on lie tous les vaisseaux, à l'exception d'un seul auquel on aurait adapté un tube plein de liquide ainsi que le cœur; chaque élément de la surface interne supportera normalement une pression égale au poids d'une colonne liquide, ayant pour base cet élément et pour hauteur sa distance verticale au niveau. Cette pression sur un élément pourra être décomposée en trois autres rectangulaires, et la somme, pour tous les éléments, des composantes efficaces à dilater le cœur parallèles à une même direction, se réduira à deux forces égales et de sens opposé, ayant chacune pour grandeur le poids d'une colonne liquide qui aurait pour base la projection de la surface interne du cœur sur un plan perpendiculaire à leur direction, et pour hauteur la distance moyenne de cette surface au niveau du liquide. Cette grandeur ne changera pas si la capacité est traversée par des membranes ou des colonnettes, et les composantes parallèles à une colonnette seront diminuées d'une quantité représentée par le poids d'une colonne liquide, ayant pour base la moindre section et pour hauteur la distance au niveau.

Lorsqu'un liquide est contenu dans un vase et en équilibre, chaque portion du liquide en contact avec une paroi éprouve de dedans en dehors une pression égale à celle exercée sur la surface libre, augmentée de celle due au poids du liquide; si on ouvre la paroi, le milieu environnant exercera de dehors en dedans une certaine pression directe-

ment contraire à la précédente; si elles sont inégales, la tranche du liquide située à l'ouverture marchera dans le sens de la plus grande.

1° Cas d'un orifice en mince paroi, le niveau étant constant et la pression extérieure égale à la surface et à l'orifice. Le liquide s'échappe avec une vitesse

$$v = \sqrt{2gh}$$

v indiquant la longueur de l'arête du cylindre liquide sorti pendant l'unité de temps, g exprimant la vitesse acquise après l'unité de temps par un corps tombant librement dans le vide au lieu de l'expérience, et h la hauteur verticale du liquide au-dessus du centre de gravité de l'orifice ou la charge sous laquelle se fait l'écoulement.

Cette formule est l'expression d'un théorème de Toricelli, qu'en général et abstraction faite de tout obstacle ou cause de perturbation, *la vitesse d'un liquide à sa sortie par un orifice pratiqué dans la paroi d'un réservoir est égale à celle qu'aurait acquise un corps grave tombant librement de la hauteur comprise entre le plan du niveau de la surface libre du liquide dans le réservoir et le centre de l'orifice.*

On le prouve par la hauteur qu'atteint un jet vertical ascendant qui s'échappe par un orifice en mince paroi, hauteur qui est sensiblement la même que celle du niveau dans le réservoir, et approche d'autant plus de l'égalité que la charge est moindre, et d'après ce principe de mécanique que, *pour qu'un corps lancé verticalement atteigne une certaine hauteur, il faut qu'il soit parti avec une vitesse initiale égale à celle qu'il aurait acquise en tombant librement de cette même hauteur.*

On le prouve encore par la portée du jet horizontal ou la distance sur un même plan horizontal inférieur à l'orifice, de deux points dont l'un serait la projection du centre de cet orifice, et l'autre le centre de l'intersection du jet par le plan supposé. Comme on a fait usage de ce théorème et que peut-être encore il serait bon d'y avoir recours comme

je dirai, je vais en rappeler la démonstration qui est fort simple en partant de principes admis.

Représentons-nous deux lignes droites (1), l'une verticale, l'autre horizontale, qui se coupent en P ; au-dessus de P, à une certaine hauteur, soit un point A sur la verticale, c'est le centre de l'orifice ; le jet partant horizontalement dans le plan des deux lignes avec sa vitesse propre due à la charge, commence à obéir à la pesanteur dès l'orifice ; il s'incline donc peu à peu, vient couper la ligne horizontale en Q, et la trajectoire de chaque molécule est une ligne courbe dépendant à la fois de l'action de la pesanteur et de la vitesse due à la charge.

Or, d'après le principe de l'indépendance des mouvements, PQ est l'espace qu'aurait parcouru, en vertu de la charge et en ligne droite, une molécule liquide pendant le même temps qu'elle met à parcourir sa trajectoire de A en Q. Si donc je connaissais ce temps, en divisant l'espace par le temps j'aurais la vitesse que je cherche. Mais ce temps est le même que celui que la molécule met à tomber de A en P, et je puis le conclure d'après les lois de la chute des corps de la formule

$$e = \frac{gt^2}{2}$$

e étant un espace parcouru par un corps qui tombe, g la vitesse acquise après l'unité de temps et t le temps employé à parcourir l'espace e , j'en tire :

$$t = \sqrt{\frac{2AP}{g}}$$

pour le temps qu'une molécule mettrait à tomber de A en P, et la vitesse horizontale v due à la charge est :

$$v = \frac{PQ}{t} = \frac{PQ\sqrt{g}}{\sqrt{2AP}}$$

Des ajutages ou tuyaux courts adaptés à l'orifice, la résistance de l'air, l'adhésion des molécules liquides entre elles introduisent des perturbations dans la vitesse de sortie et la hauteur des jets : les premières

(1) Le temps m'a manqué pour faire graver des figures. J'ai taché de les indiquer assez bien pour qu'on pût les tracer.

sont constantes pour des vitesses différentes en un même ajutage, elle peuvent diminuer d'un tiers la hauteur du jet pour certains ajutages ; les secondes ne sont notables que pour les grandes vitesses, et ne diminuent moyennement la hauteur théorique des jets que d'une quantité égale $0,01h^2$, h étant la charge ; les troisièmes varient avec le liquide, et pour un même liquide avec la température, en sorte que pour un même système, un même liquide, des températures et des variations de charge entre de certaines limites, on peut tirer de la formule de Toricelli le principe général de l'écoulement des liquides, que *les vitesses varient comme les racines carrées des charges*

$$v : v' :: \sqrt{H} : \sqrt{H'}$$

principe vérifié depuis Mariotte par plusieurs expérimentateurs.

Ce principe général s'étend à tous les fluides, à l'eau, au mercure, à l'huile, et même aux fluides aériformes, en sorte que leur vitesse de sortie par un orifice ne dépend que de la charge ; l'expérience le prouve, et l'on peut facilement s'en rendre compte en comparant les masses à mouvoir, et les forces motrices, qui varient toutes deux comme les densités.

Revenons au cas d'un orifice en mince paroi, mais supposons que la pression extérieure sur la charge et sur l'orifice ne soit pas la même.

Pour un tel cas on transforme la différence des pressions en colonnes du même liquide, et pour trouver la vitesse de sortie on ajoute ou l'on retranche cette différence selon qu'elle est positive pour la surface ou pour l'orifice. On rentre ainsi dans le premier cas considéré. Si la charge varie à chaque instant, le rapport des vitesses d'écoulement $\frac{v'}{v}$ pour deux instants considérés sera toujours donné par celui des

racines carrées des charges $\frac{\sqrt{H'}}{\sqrt{H}}$, H' et H étant les charges correspondantes aux deux époques.

Si le liquide afflue dans le réservoir avec une vitesse acquise, la composante de cette vitesse, dans le sens de la sortie, devra être ajoutée

pour avoir la vitesse de sortie. Pour ajouter la vitesse acquise ci-dessus dite, on la transformera en hauteur h de colonne liquide qui la produirait (1). Si n représente cette vitesse on a $n = \sqrt{2gh}$, d'où $h = \frac{n^2}{2g}$, et en l'ajoutant à la charge H on a la vitesse de sortie

$$v = \sqrt{2g(H+h)} = \sqrt{2gH + n^2}.$$

$v = \sqrt{2gh}$ est ce qu'on appelle en hydraulique la *vitesse théorique* ; la vitesse réelle est généralement différente : cela tient à diverses causes qu'il n'entre pas dans mon but d'examiner, et qui sont l'effet des ajutages quand il s'en trouve à l'orifice, et, pour les écoulements en mince paroi, la *contraction de la veine* ou jet du liquide dont le diamètre va en diminuant à partir de l'orifice, diminution qui peut être telle que la section de la veine ne soit que les 0,6 ou 0,7 de l'aire de l'orifice à une assez petite distance. Quand le jet est ascendant, il y a diminution des sections successivement plus éloignées de l'orifice, section minima, puis augmentation au-delà. Quand la veine est horizontale, il y a contraction d'abord jusqu'à une plus grande distance, puis accroissement des sections, mais peu sensible ; si la veine descend, si elle est verticale surtout, il y a contraction rapide d'abord, puis plus lente, mais continue, jusqu'à ce qu'elle se détache en globules qui forment la partie trouble et qui sont périodiquement variables de forme et de dimensions.

Si, dans un réservoir transparent, on mêle au liquide de petits corps qui y restent suspendus, on voit à une petite distance de l'orifice les molécules converger de toutes parts suivant des lignes courbes qu'elles parcourent d'un mouvement insensible d'abord, puis de plus en plus rapide, et enfin précipité lorsqu'elles atteignent l'orifice. La direction de ce mouvement, que les molécules tendent à conserver en vertu de l'inertie, est la cause première de la formation de la veine et de ses effets.

(1) On appelle *hauteur due* à une vitesse, et réciproquement *vitesse due* à une hauteur, celles liées dans leur grandeur respective par la formule du théorème de Toricelli.

La vitesse du liquide dans la veine, à une distance de l'orifice égale à $\frac{1}{2}$ du diamètre de cet orifice, est sensiblement la même que la vitesse théorique.

Canaux. Les canaux, tels qu'on les considère en hydraulique, sont des vases prismatiques dont une dimension, celle des arêtes, est généralement fort grande relativement aux deux autres.

Les canaux dont nous allons d'abord nous occuper sont ceux dont le fond est un plan incliné et qui manquent de paroi supérieure. La section normale est constante partout, d'après la définition.

On appelle pente du canal p la différence de niveau des deux extrémités de l'unité de longueur d'une arête du prisme que ce canal représente; si λ est la longueur d'une portion quelconque de canal, δ la différence de niveau des deux extrémités d'une arête, δ est la pente absolue, et l'on a toujours $\frac{\delta}{\lambda} = p = \sin. i$, en représentant par i l'angle d'inclinaison ou celui que fait avec une arête une droite horizontale menée dans le plan vertical qui contient l'arête.

La section du canal est la surface de section du liquide du canal déterminé par un plan normal aux arêtes.

On appelle *périmètre mouillé* la portion de contour de la section en contact avec la paroi.

L'eau coule dans un canal comme sur un plan incliné dont la pente serait celle du canal, de sorte que la force qui la sollicite à se mouvoir est une force accélératrice $gp = g \sin. i$. Ainsi le mouvement des molécules liquides dans le canal ne provient que de la pente.

Le mouvement devrait donc être accéléré: on observe qu'il devient uniforme; il survient donc une résistance précisément égale à la force accélératrice qui serait due à la gravité, et l'eau ne continue à se mouvoir qu'en vertu de la vitesse acquise pendant les premiers instants.

Cette résistance provient de ce que la première couche de liquide en contact avec la paroi y adhère, y pénètre, se substitue à la paroi; et de ce que les molécules du liquide adhèrent entre elles, il résulte

de là que les différents filets liquides n'ont pas la même vitesse ; elle est plus grande pour ceux du centre. On appelle *vitesse moyenne* celle dont on obtiendrait l'expression en divisant par la section le volume de liquide qui traverse cette section pendant l'unité de temps.

Dubuat a trouvé par des expériences directes *que la résistance de l'eau à se mouvoir dans un canal est indépendante de la pression et de la nature de la paroi*, pour des substances diverses qu'il a essayées.

Cette résistance au mouvement du liquide dans les canaux étant un effet de l'action des parois mouillées du lit, plus ces parois auront d'étendue, c'est-à-dire plus, sur l'unité de longueur, le périmètre mouillé sera grand, plus la résistance sera considérable.

Cette résistance se communiquera par la viscosité à toutes les molécules de la section ; ainsi plus ces molécules seront nombreuses relativement au périmètre mouillé, moins chacune aura de résistance à vaincre ; c'est-à-dire que *l'effet de la résistance sera en raison inverse de la section*.

Il croîtra avec la vitesse et comme le carré ; car plus elle sera grande, plus dans l'unité de temps il faudra arracher de molécules à leur adhérence mutuelle et à la paroi ; en outre, plus il faudra les arracher promptement.

La viscosité du liquide donne encore lieu à une autre résistance d'autant plus grande que la vitesse est moindre. C'est Dubuat qui l'a indiquée. Coulomb démontra par des expériences qu'elle est proportionnelle à la simple vitesse, et que le terme qui l'exprime est moindre que celui du terme où entre le carré de la vitesse, tant que celle-ci excède 0^m, 07 par seconde ; au-dessous il devient plus grand.

En sorte que la résistance qu'un liquide éprouve en se mouvant dans un canal *est proportionnelle au périmètre mouillé au carré de la vitesse, plus une certaine fraction de la vitesse, et en raison inverse de la section*. L'expérience le confirme sensiblement.

Tuyaux. Dans un tuyau cylindrique rectiligne incliné plein de liquide ou *conduite*, le liquide se mouvra en vertu de son poids ou

plutôt en vertu de la composante de ce poids parallèle à l'axe, comme dans un canal. Dans les deux cas, la force accélératrice ou celle qui agit sur l'unité de masse est $g \sin. i$ en gp , ou g multiplié par la différence de niveau des deux extrémités du tuyau, en sorte que *la vitesse du liquide à la sortie sera encore due à la hauteur verticale du liquide ou à la charge.*

Dans le cas du canal, il n'y a aucune pression exercée à l'entrée ; dans les tuyaux, il y a le plus ordinairement sur l'entrée une charge en vertu de laquelle le liquide s'engage dans le tuyau avec une vitesse qui lui est due : cette vitesse et celle que le liquide tend à prendre dans le tuyau en vertu de son poids s'ajouteront, et la somme donnera la vitesse de sortie à l'orifice inférieur, laquelle serait théoriquement $v = \sqrt{2gH}$, H exprimant la hauteur totale du liquide au-dessus de l'orifice de sortie.

Aussi dans les tuyaux comme dans les canaux la force accélératrice et les effets qu'elle tend à produire sont les mêmes. Sous l'action d'une telle force le mouvement du liquide dans les tuyaux devrait s'accélérer indéfiniment ; si donc il devient promptement uniforme, comme l'expérience le prouve, c'est qu'il a dû survenir une résistance qui détruit à chaque instant l'accélération que la pesanteur tend à produire : il faut donc que cette résistance soit égale à la force accélératrice.

Cette résistance ne peut naître que de l'action des parois du tuyau sur le liquide qui s'y meut, et il faudrait répéter ici ce que nous avons dit de la résistance dans les canaux. Les tuyaux ne sont donc qu'un cas particulier des canaux ; seulement, comme le périmètre mouillé est ici le même que celui de la section, la formule de la résistance se simplifie, et cette *résistance qu'éprouve un liquide se mouvant dans un canal est proportionnelle au carré de la vitesse, plus une certaine fraction de la vitesse, et en raison inverse du diamètre.*

Si le tuyau est coudé, le mouvement devra éprouver un changement angulaire de direction.

Or, tout mobile qui, après avoir suivi une direction, en change brusquement, perd une partie de sa vitesse, représentée par le sinus

verse du plus petit angle que font entre elles les deux directions; car en appelant α cet angle, la composante, suivant la nouvelle direction, est $v \cos \alpha$; or la perte $v - v \cos \alpha = v(1 - \cos \alpha) = v \sin. verse d' \alpha$. Ainsi, la vitesse initiale étant 1, celle après le changement de direction sera $1 - \sin. verse d' \alpha$. Si donc le mobile suit une ligne courbe, il change de direction à chaque instant, mais la perte à chaque instant n'est qu'un infiniment petit du second ordre; et ainsi, quoique le nombre des pertes soit infini, leur somme ou la perte totale n'est qu'un infiniment petit du premier ordre, ou une quantité négligeable.

Bossut a vérifié par expériences que la perte réelle de vitesse est plus grande pour les liquides se mouvant dans des tuyaux courbes, et que cette perte est appréciable; ce qu'on attribue à des chocs entre les molécules aux réflexions.

Il résulte d'expériences faites par Dubuat que *la perte de vitesse qu'éprouve un liquide se mouvant dans un tuyau coudé brusquement est sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse et au carré du sinus de l'angle de réflexion pour un coude. Elle est du reste évidemment proportionnelle au nombre des coudes.*

S'il y a des étranglements ou points de moindre section dans le tuyau, si l'étranglement n'existe que sur une petite longueur du tuyau, que ce soit par exemple un diaphragme mince perpendiculaire à l'axe, la perte de vitesse qui en résulte dans la conduite est très-petite même pour un diaphragme d'ouverture moindre que $\frac{1}{10}$ de la section du tuyau (expérience de M. d'Aubuisson).

Dans le cas de renflements, la résistance qui en naît est plus grande, comme il résulte d'expériences faites par Venturi.

Ainsi les résistances au mouvement des liquides dans les tuyaux sont de trois sortes : 1° celles dues à la paroi et à la viscosité du liquide; 2° celles dues aux courbures; 3° celles dues aux étranglements ou renflements.

Pressions sur les parois d'un tuyau. —

Ces pressions se mesurent expérimentalement à l'aide de *piézomètres* ou tubes adaptés à la paroi d'une conduite au point où l'on veut explo-

rer la pression. Ces tubes doivent être ascendants si la pression à mesurer est positive, recourbés et descendants pour plonger dans un vase qui contient un liquide si la pression à rechercher est négative.

Supposons une conduite horizontale, cylindrique, adaptée à un réservoir, dont le niveau soit entretenu constant; soient disposés sur la conduite de distance en distance des piézomètres ou tubes qui communiquent par le bas avec la conduite et s'élèvent à la hauteur du réservoir.

Si l'extrémité libre de la conduite est bouchée, ce sera le cas des *vases communicants*, et le liquide s'élèvera dans les tubes à la même hauteur que dans le réservoir.

Si l'on débouche la conduite et qu'elle soit bien cylindrique et libre partout, supposons de plus que la paroi du tuyau ne détermine aucune résistance au mouvement du liquide comme dans le cas d'un tuyau très-court; supposons de plus qu'il n'y ait aucune contraction à l'entrée: dans cette hypothèse, le liquide se mouvra dans la conduite avec la vitesse théorique due à la charge totale; toute cette charge sera donc employée à mouvoir le liquide parallèlement à l'axe de la conduite, et il n'en résultera aucune pression perpendiculaire à cet axe, en sorte que les piézomètres indiqueraient zéro pression. Ce cas serait analogue à celui d'un liquide qui se meut dans un canal ouvert, cas où aucune pression ne tend à soulever la surface du liquide.

Si l'on bouche en partie l'ouverture extérieure de la conduite, de telle sorte que l'orifice de sortie soit moindre que la section du tuyau, l'eau sortira bien toujours par l'orifice extérieur avec la vitesse due à la charge, mais dans le corps du tuyau la vitesse sera moindre, d'après la loi évidente *que la vitesse d'un liquide en deux points d'un même tuyau est en raison inverse des aires des sections faites en ces deux points*. Si v représente la vitesse moindre dans le tuyau, la charge h qui la produirait serait $h = \frac{v^2}{2g}$ et comme $\frac{1}{2g} = 0,051$, cette hauteur $h = 0,051 v^2$; il reste donc de la charge totale de la conduite H une quantité $H - 0,051 v^2$, qui agissant sur les molécules et se transmettant en tous sens, pressera sur la conduite et fera monter le liquide

dans les *piézomètres* à une certaine hauteur $H = 0,051 v^2$. De là le principe de Bernouilly confirmé par l'expérience, que *la pression que l'eau en mouvement dans un tuyau exerce contre un point quelconque de la paroi, est égale à la charge (effective) sur ce point, moins la hauteur due à la vitesse dans le tuyau*: en appelant *charge effective* la charge entière diminuée d'une hauteur qui produirait la portion de vitesse détruite par la résistance du tuyau jusqu'au point considéré. La charge entière est la distance verticale de ce point au niveau du liquide.

La résistance du tuyau au mouvement du liquide n'altère aucunement le principe ci-dessus, seulement elle diminue successivement la charge entière H de quantités représentant pour chaque point la résistance du tuyau jusqu'à ce point.

On voit par cette formule de la pression $H = 0,051 v^2$, que si la vitesse v était telle que $0,051 v^2$ fût plus grand que H , la pression deviendrait négative; c'est, en effet, ce qu'on observe quand on adapte à un réservoir un ajutage ou tuyau court, tel qu'il détermine une vitesse de sortie plus grande que celle théorique, c'est-à-dire que celle due à H . Il est des formes d'ajutage qui opèrent cet effet.

C'est encore le cas d'un tube vertical descendant.

En réalité, dans les conduites, le tuyau résiste au mouvement du liquide, si r représente la hauteur de charge due à la portion de vitesse détruite par la résistance du tuyau jusqu'au point considéré, l'expression définitive de la pression, pour un point quelconque de la conduite, sera $H - r = 0,051 v^2$, r étant la résistance jusqu'à ce point.

À l'extrémité libre de la conduite, la charge effective est $H - R$, R représentant la résistance totale du tuyau; la pression y est donc $H - R = 0,051 v^2$, et comme $R = H - 0,051 v^2$, la pression $= 0$.

Enfin, il reste à considérer la petite perte de charge due au changement de direction qu'éprouve un liquide en passant d'un tuyau dans un embranchement qui en dépend.

Soit C la *charge effective* de la conduite pour un point immédiatement en amont de l'orifice d'entrée du tuyau embranché, cette hau-

teur C de la charge effective pourrait se composer implicitement de deux hauteurs partielles : l'une, celle de pression ci-dessus définie, l'autre, celle due à la vitesse réelle dans la conduite. Si le tuyau additionnel était dans la direction du mouvement, le liquide y entrerait aussi en vertu de la vitesse acquise, et alors la force ou hauteur $0,051 v^2$ aurait son entier effet ; mais si le tuyau embranché fait avec l'axe de la conduite un angle de plus en plus grand du côté de l'aval, la composante de la force $0,051 v^2$, qui reste efficace dans cette nouvelle direction, diminuera successivement ; elle sera $0,051 v^2 \cos. i$ en appelant i l'angle ci-dessus désigné, la force impulsive C sera donc moindre dans le sens du tuyau embranché que dans le sens direct de la quantité $0,051 v^2 (1 - \cos. i)$, elle sera donc $C - 0,051 v^2 (1 - \cos. i)$. Si le tuyau embranché est normal à la paroi, l'angle i est droit, $\cos. i = 0$, et l'on a pour force impulsive dans le sens du tuyau $C - 0,051 v^2$. C'est le cas d'un piézomètre et du théorème de Bernouilly.

On peut donc connaître ainsi la charge à l'entrée d'un branchement, mais la veine liquide qui s'y engage se contractera en vertu de la vitesse acquise par les molécules du liquide dans la direction de l'axe de la conduite ; et très-près de l'orifice, derrière lui, il se fera une grande perte de charge par ce fait seul, ou peut-être encore par d'autres causes. Quoiqu'il en soit, il résulte d'expériences faites par MM. Mallet et Genieys (1), que la perte est d'environ trois fois la hauteur due à la vitesse dans le branchement.

Il résulte encore d'expériences faites par M. d'Aubuisson (2) qu'une *érogation* ou prise d'eau faite sur une conduite ne diminue pas sensiblement la charge des points de cette conduite qui sont immédiatement en aval.

Telles sont les principales lois du mouvement des liquides dans les canaux, mais en hydraulique on considère les vases comme rigides et ne pouvant se déformer ; ils ne sont pas tels dans l'économie animale.

(1) *Essai sur les moyens de conduire les eaux*, par M. Genieys, p. 143.

(2) *Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse*, t. II, p. 378.

On peut, en se représentant bien quelle sera en chaque point la pression sur la paroi, d'après le théorème de Bernouilly, pressentir quelques-uns des effets qui résulteraient de la transformation des parois rigides en parois souples et élastiques. On voit que la section diminuerait dans les points de pression négative et grandirait dans ceux de pression positive; mais à quelle forme parviendra la conduite pour l'état d'équilibre? Si elle parvenait à une forme stable, l'écoulement s'y effectuerait comme dans un tuyau rigide; mais il pourra arriver que la forme soit incessamment variable, et cette circonstance influera sur la grandeur de la vitesse. Si les conditions hydro-dynamiques viennent à varier, comment variera la forme de la conduite? En réfléchissant, il semble qu'elle devra prendre la forme de moindre résistance, et l'avantage serait sous ce point de vue aux canaux souples sur les canaux rigides. On remarque dans le cas des coudes que les canaux souples prennent la forme des moindres pertes.

Passons aux canaux capillaires.

On donne le nom de capillarité à certains phénomènes d'équilibre et de mouvement des liquides dans des espaces de dimensions comparables au diamètre d'un cheveu.

Il est deux manières de se rendre compte de ces phénomènes qui semblent contraires aux lois connues de l'hydraulique. Toutes deux s'appuient sur des considérations des effets que doit produire l'attraction que des molécules liquides exercent entre elles et sur les solides à des distances insensibles.

Pour concevoir les causes du phénomène qui est une différence de niveau en vases communiquants, on suppose l'équilibre établi, et l'on considère quelles peuvent être les forces qui le maintiennent contre l'action de la pesanteur.

Dans la première manière d'interpréter le fait, on obtient pour équation d'équilibre une formule de la forme

$$h = \frac{2a - a^2}{g a} \cdot \frac{c}{b}$$

h est la différence de niveau ou le poids d'une certaine colonne du

liquide ; g représente l'intensité de la pesanteur ; d la densité du liquide ; c le périmètre de la surface libre du liquide dans l'intervalle capillaire ; b la section normale d'un cylindre dont la génératrice serait verticale, et c la courbe directrice, c'est la base de la colonne de liquide h ; a est l'attraction exercée sur le liquide par l'unité de longueur d'un périmètre mouillé de la substance qui termine l'espace capillaire ; a' a la même définition, mais la substance qui détermine ici l'espace capillaire serait une enveloppe du même liquide que celui intérieur. On suppose pour la démonstration l'espace enveloppé du liquide concret ; on s'autorise à cela par ce raisonnement, que l'équilibre existant dans un milieu, il ne serait pas troublé par la liaison invariable de quelques points entre eux. On voit que a' exprime l'attraction du liquide sur lui-même. La hauteur h sera positive, nulle ou négative, suivant que le sera l'expression $2a - a'$, c'est-à-dire si le double de l'attraction du liquide pour la substance en contact est plus grand que l'attraction du liquide sur lui-même, lui est égal ou est moindre.

Pour un même liquide et une même substance déterminant l'espace capillaire, le terme $\frac{2a-a'}{gd}$ sera constant, sauf ce que j'ai à dire plus loin, en le désignant par μ ; on a la formule plus simple.

$$h = \mu \frac{c}{b}$$

On peut tirer de là toutes les valeurs comparatives de l'exhaussement ou de la dépression du niveau pour un même liquide et une même substance, suivant les dimensions des espaces capillaires et la forme de leurs sections.

Pour le cas de tubes, en divisant par πr on a $h = \frac{2\mu}{r}$, c'est-à-dire que l'exhaussement est en raison inverse du diamètre intérieur.

Laplace fut conduit à une autre explication en remarquant qu'à une distance de la surface moindre que le rayon d'attraction moléculaire une molécule quelconque est sollicitée en vertu de cette attraction par une force de la nature de celles accélératrices, qui tend incessamment à porter cette molécule vers l'intérieur. On peut voir par des

considérations très-simples que la force qui sollicite ainsi chaque molécule est d'autant plus grande que la molécule considérée est plus près de la surface libre, et nulle à une profondeur égale au rayon de l'attraction. Au contraire, la pression sur le liquide, résultante de toutes les pressions moléculaires, croît avec la profondeur au-dessous de la surface libre dans la couche, et au-delà se transmet constante dans toutes les directions. Il désigne par A cette pression définitive, quand la surface libre du liquide est plane.

Il existe donc dans l'intérieur d'un liquide en contact avec l'atmosphère, trois pressions qu'il ne faut pas confondre : 1° celle atmosphérique qui se transmet dans toutes les directions ; 2° la pression due au poids du liquide variable avec la profondeur ; 3° la pression ci-dessus définie qui croît jusqu'à une profondeur égale au rayon d'attraction moléculaire, et au-delà se transmet dans toutes les directions, avec une intensité A si la surface est plane.

Mais si la surface libre du liquide est courbe, en considérant l'action M de la portion du liquide qu'il faudrait retrancher ou ajouter pour ramener les conditions de la surface plane et de la pression A, on trouve que la pression définitive doit être A — M pour le cas de la concavité, et A + M pour celui de la convexité.

Les géomètres ont trouvé que la force M, qui correspond à la différence du niveau, peut être représentée par une expression de la forme

$$B \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$$

R et R' étant les rayons de plus grande et de plus petite courbure de la surface du liquide en son point le plus bas ou le plus haut suivant le cas de concavité ou de convexité, et B étant un nombre positif, constant pour un même liquide et une même substance, mais qui varierait avec la température, d'après des expériences de M. Emmet, on a donc pour pression définitive, quand la surface est courbe,

$$A \mp B \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$$

La surface du liquide en un point voisin de la paroi doit être normale à la résultante des actions de la pesanteur sur les molécules liquides, de l'attraction moléculaire du liquide et de l'attraction de la paroi pour le liquide.

Or, comme ces deux dernières forces ne s'exercent qu'à des distances insensibles, la résultante ne dépend que de leur intensité, et l'inclinaison de la surface libre, normale à cette résultante, sera indépendante de la courbure de la paroi; les derniers plans tangents de la surface seront donc également inclinés à l'horizon.

De la formule ci-dessus et de ce que les derniers plans tangents sont également inclinés à l'horizon, on tire pour les divers cas qui peuvent se présenter l'expression de tous les phénomènes ou l'équation d'équilibre.

Pour le cas d'un tube $R = R'$; la pression définitive dans l'espace capillaire au point le plus bas de la surface est $A \mp \frac{2B}{R}$, c'est-à-dire que la différence de niveau y sera en raison inverse de R , et par suite du diamètre.

Si l'équation d'équilibre n'est pas satisfaite, il y aura mouvement du liquide.

On déduit de la formule de Laplace l'explication des attractions et répulsions des corps flottants.

Elle fait connaître la pression dans un intervalle capillaire au-dessous de la surface libre, relativement à celle exercée sur cette surface.

On trouve ainsi que la pression au-dessous de la surface est négative dans un tube où le liquide se termine par une surface concave.

M. Gay-Lussac a reconnu que l'expérience confirme sensiblement tous ces résultats théoriques, quand on tient compte de tout.

Telles sont les conditions d'équilibre des liquides dans les espaces capillaires; si elles ne sont pas remplies, le liquide se mouvra.

D'un autre côté, si l'on dispose des tubes capillaires dans les conditions d'une conduite, les lois du mouvement des liquides, telles que nous les avons exposées pour les conduites larges, ne se vérifient plus

pour celles capillaires. Les effets de la paroi et de la viscosité deviennent plus marqués.

J'ai dit au commencement de cette thèse que l'attraction des solides sur les liquides et des molécules liquides entre elles variait avec la température et introduisait des perturbations dans les vitesses d'écoulement.

Il résulte en effet d'expériences faites en premier lieu par Dubuat, puis par Coulomb, et plus tard par Gerstner à Prague, Girard et enfin M. Lehot, que les liquides, sous une même charge, s'écoulent plus lentement par un tube capillaire que par une ouverture de même diamètre pratiquée en mince paroi.

Qu'il y a une certaine charge qui, pour un tube vertical donné, produit une vitesse qui reste constante quoiqu'on augmente la longueur du tube, mais qui s'accélère si on la diminue.

Que sous une même hauteur de liquide, à la même température et par un même tube, un volume d'eau pure s'écoule plus promptement qu'un volume égal d'alcool ou d'eau salée, mais moins vite qu'un même volume de mercure.

Enfin, on doit à Dubuat cette observation fort curieuse, que le temps nécessaire pour l'écoulement d'un volume donné d'eau, par le même tube capillaire et sous la même charge, est d'autant moindre que la température du liquide est plus élevée.

Girard a voulu expliquer le fait par l'adhésion d'une couche du liquide à l'intérieur du tube, couche variable avec le liquide et pour un même liquide avec la température.

Cette interprétation rencontre des difficultés pour le cas de l'eau à son maximum de densité.

Plus tard, M. Lehot présenta des expériences contradictoires à l'explication de Girard.

Quoi qu'il en soit, le fait pour tous paraît se rattacher à la viscosité ou attraction moléculaire, et nous n'avons jusqu'ici aucun moyen précis de la mesurer.

Je me contenterai donc de rapporter quelques résultats d'expériences.

ces, où l'on verra que des liquides, regardés communément comme plus visqueux que d'autres, se meuvent cependant plus facilement dans les intervalles capillaires.

Temps employés pour l'écoulement d'un même volume de liquides différents, l'appareil et la charge étant les mêmes pour tous.

température.	Substance.	temps.
12°	eau.	349"
Id.	alcool à 40°.	856
Id.	éther à 60°.	101
14°	lait.	642

Pour un autre volume et une autre charge.

30°	eau.	486"
27°,5	alcool à 30°.	1170
Id.	huile de téréb.	1143
30°	eau sucrée $\frac{1}{2}$ sucre.	699
Id.	id. $\frac{1}{2}$ s.	1009
Id.	eau salée $\frac{1}{2}$ sel.	727
Id.	sulf. s. $\frac{1}{2}$ sel.	673
Id.	nitr. pot. $\frac{1}{2}$ sel.	456

Pour tous ces liquides, la vitesse d'écoulement augmente avec la température; mais cette augmentation ne suit pas la même loi pour tous. Entre 10° et 65°, la vitesse d'écoulement du mercure ne varie pas.

ENDOSMOSE.

Quand deux liquides hétérogènes, ayant l'un pour l'autre assez d'affinité pour une mixtion intime, sont séparés par une cloison poreuse, susceptible d'être mouillée par ces deux liquides, ou au moins par l'un d'eux, il y a généralement passage réciproque, mais inégal,

d'un liquide vers l'autre au travers de la cloison, et le phénomène est indépendant des pressions hydrostatiques entre de certaines limites.

Il est probable que le mouvement cesserait lorsque l'homogénéité de composition serait établie de part et d'autre de la cloison.

M. Dutrochet, qui a le premier fixé l'attention des physiciens et des physiologistes sur ces phénomènes, leur a donné le nom d'*endosmose* et d'*exosmose*.

Considérant le liquide dont le volume augmente, par l'échange inégale qui se fait à travers la cloison, il dit qu'il y a endosmose vers celui qui reçoit plus qu'il ne perd, et exosmose de celui qui perd plus qu'il ne reçoit; ou endosmose pour tous deux, mais *implétive* pour le premier, *déplétive* pour le second.

L'idée générale qu'on peut se faire de l'appareil à l'aide duquel M. Dutrochet a étudié diverses circonstances de ces phénomènes, est celle d'un entonnoir renversé, dont le pavillon serait fermé par la cloison membraneuse à essayer, et le bec, surmonté d'un tube muni d'une échelle, indiquerait, par les hauteurs d'une colonne du liquide, en expérience, la pression qui a lieu à chaque instant sur la face supérieure de la membrane, et les variations de volume du liquide primitivement disposé dans la capacité de l'entonnoir ou *réservoir* de l'*endosmomètre*. Un autre vase contenant le second liquide est apposé sous la membrane qui se trouve ainsi disposée en cloison.

Des dispositions particulières ont permis de rendre la pression, sur cette face inférieure de la membrane, plus grande que la pression atmosphérique actuelle, égale à cette même pression, ou moindre qu'elle de quelques centimètres de liquide aqueux.

Influence des liquides. — M. Dutrochet a d'abord essayé des solutions aqueuses de diverses substances organiques, telles que le sucre, la gomme, l'albumine; de substances salines, alcalines, la cloison étant une membrane animale, telle qu'une vessie, un intestin. Généralement il y eut endosmose implétive, ou simplement endosmose vers la solution la plus dense, que ce fût ou non le sens de la plus

grande pression aux deux faces de la membrane, et cela en des limites fort éloignées de pressions différentes.

L'alcool, l'éther, ont offert l'endosmose en sens inverse, c'est-à-dire vers le liquide le moins dense. Nous verrons plus loin d'autres exceptions encore..... On a constaté que deux courants avaient réellement lieu en colorant un liquide vers lequel il se faisait endosmose; l'autre liquide se colorait, quoique son volume diminuât. Donc, il y venait un courant, mais il en partait un autre courant plus fort.

On a également constaté, par des réactifs, que des sels avaient traversé la membrane par un courant plus faible, dans le sens opposé à celui selon lequel l'endosmose avait lieu.

Il y a donc deux courants simultanés, mais inégaux.

Nous avons dit qu'une condition de l'endosmose, c'était que les deux liquides fussent miscibles. L'huile et l'eau ne donnent lieu à aucun échange à travers une vessie, etc.

Une huile volatile et une huile fixe étant mises en opposition, il se fait endosmose lente vers l'huile fixe.

L'alcool et une huile volatile donnent lieu à endosmose vers l'huile volatile.

Influence de la membrane. — Jusqu'ici, nous avons supposé les expériences faites avec des membranes animales. La membrane d'une gousse vésiculaire de *colutea arborescens* (baguenaudier) donna lieu à une endosmose de même sens qu'une membrane animale pour de l'eau pure et de l'eau de gomme; il en fut de même d'une autre membrane végétale, prise au pétiole engainant d'une feuille d'*allium porum*.

M. Dutrochet essaya ensuite des membranes artificielles d'origine organique. Ainsi, il prit une lame de taffetas gommé, dans la composition duquel entre le caoutchouc imperméable à l'eau. De l'eau pure d'un côté, et une solution de sucre ou de gomme de l'autre, ne donnèrent lieu à aucun phénomène d'endosmose.

Mais de l'eau et de l'alcool ayant été opposés l'un à l'autre, il se fit à la longue endosmose vers l'eau.

Nous avons vu ci-dessus qu'à travers une membrane animale ou végétale, il se faisait endosmose inversement pour les mêmes liquides vers l'alcool.

M. Dutrochet ayant mis le feu à l'alcool resté du côté de la membrane, où il avait été mis au début de l'expérience, le feu s'éteignit avant la vaporisation complète de l'eau qu'il contenait. Ayant brûlé de même une portion d'alcool, provenant du flacon qui avait fourni à l'expérience, il ne resta aucun résidu aqueux. Il conclut de là, que le premier alcool brûlé était plus aqueux que l'autre. Il est fondé à tirer cette conclusion si les circonstances de la combustion ont été identiques; mais il ne me semble pas qu'il puisse aussi légitimement conclure cette autre proposition, que l'eau en excès dans l'alcool de l'expérience provenait d'un courant d'exosmose de l'eau vers l'alcool à travers la membrane de caoutchouc.

Car cet alcool étant resté bien plus de 36 heures en communication avec l'atmosphère a dû s'affaiblir par vaporisation plus rapide d'alcool anhydre que d'eau; et puis, si l'on remarque que l'eau seule ne traverse pas le caoutchouc, on est porté à admettre, et il est certainement possible que l'alcool anhydre ait seul traversé cette membrane, d'où abaissement du degré alcoolique de l'alcool aqueux resté: en tout, on n'est pas fondé à conclure de l'expérience, telle qu'elle a été faite, qu'il y a eu double courant, ni quel est le mécanisme de ce double courant.

Des lames de grès siliceux pur de 4^{mm} d'épaisseur ne donnent point lieu à endosmose; une lame de grès ferrugineux de 3^{mm} d'épaisseur présente des phénomènes de perméation, mais peu sensibles.

La porcelaine, qui est un silicate d'alumine avec excès de silice, n'est pas poreuse à l'état vitreux de cuisson parfaite; mais, à l'état de cuisson imparfaite ou de porcelaine *dégourdie*, elle est poreuse et ne donne néanmoins pas lieu à endosmose. M. Dutrochet en conclut que la silice s'oppose au phénomène.

L'argile grossière dont on fait les tuiles, l'argile fine ou terre de pipe sont perméables par endosmose.

Une lame de marbre amenée à 1^{mm} au plus d'épaisseur donne lieu à une endosmose, mais bien peu notable.

Influence de la température. — La température pour une même expérience étant élevée successivement jusqu'à 28° Réaumur, a favorisé de plus en plus les phénomènes d'endosmose.

Ainsi, tout étant égal d'ailleurs, la nature des liquides, celle des membranes, la température influent sur l'endosmose.

L'étendue des surfaces de la membrane influera aussi évidemment, M. Dutrochet a vérifié directement que les effets étaient proportionnels aux surfaces.

Vitesse. — M. Dutrochet appelle vitesse d'endosmose le rapport des hauteurs dont s'élève une colonne de liquide dans un même appareil pendant l'unité de temps; la température restant constante et les expériences étant rapprochées le plus possible, pour que la membrane soit, pour deux expériences, dans un état physique sensiblement identique.

La vitesse d'endosmose étant ainsi définie, si la densité d'un liquide sucré mis dans le réservoir de l'endosmomètre varie, la vitesse d'endosmose varie sensiblement comme les excès de la densité du liquide sucré sur celle de l'eau pure extérieure.

Deux séries d'expériences ont été faites avec une vessie; une autre avec une plaque d'argile de 2 $\frac{1}{2}$ l. d'épaisseur.

Ces mesures des vitesses ont été prises entre des limites de différence de pression sur les deux faces de la membrane s'étendant de 7^{mm} à 65^{mm} de hauteur d'eau sucrée. Nous allons voir par ce qui suit immédiatement que ces variations de pression devaient influencer sur la vitesse, mais non assez pour faire rejeter les conclusions des expériences.

Forces. — La température étant constante et de 16° $\frac{1}{2}$ R., le rapport des forces d'endosmose est celui des plus grandes pressions que l'eau d'un vase intérieur puisse surmonter pour pénétrer dans le réservoir d'un endosmomètre fermé par une vessie et contenant une solution sucrée de densité variable; ce rapport est égal à celui des

excès de la densité du liquide sucré intérieur sur celle de l'eau du vase extérieur : cette proportionnalité a été vérifiée jusqu'à 238^{mm} de mercure, pression maxima qui arrête la pénétration de l'eau pure dans une solution aqueuse sucrée de densité 1,110, rapportée à celle de l'eau pure, prise pour unité.

Si cette proportionnalité se vérifie jusqu'à la densité 1,300 qui est celle du sirop de sucre, de l'eau pure y pénétrerait à travers une vessie malgré une charge sur le sirop de $4\frac{1}{2}$ atmosphères environ.

Pouvoirs d'endosmose de diverses substances. — Les pouvoirs d'endosmose ont été mesurés par les vitesses ci-dessus définies, pour des solutions aqueuses de substances différentes, ces solutions étant de même densité et peu supérieures à celle de l'eau; ces pouvoirs sont représentés par les nombres suivants pour un premier groupe de substances: eau gélatineuse 3, eau gommée 5,17, eau sucrée 11, eau albumineuse 12; pour deux autres substances entre elles seulement, hydro-chlorate de soude 1, sulfate de soude 2. Les expériences ont été faites avec une vessie.

Sens dans lequel se fait l'endosmose selon les substances. — Nous avons vu que l'endosmose avait généralement lieu du liquide le moins dense à celui le plus dense pour les solutions de substances organiques, telles que le sucre, la gomme, l'albumine, la gélatine... Pour les solutions salines, pour celles alcalines, pour l'alcool, l'éther, moins denses que l'eau, l'endosmose se fait vers eux (excepté toutefois pour l'alcool dans le cas où la cloison est de caoutchouc). Ce que nous venons de dire des sens de l'endosmose, pour des solutions de diverses substances comparées à l'eau pure, se vérifie, que la cloison soit une membrane animale ou végétale.

Ce que nous allons dire pour les acides s'appliquera d'abord seulement au cas où la cloison est une membrane animale. Pour l'acide oxalique l'endosmose se fait, à travers une vessie, de lui vers l'eau pure moins dense.

Pour les acides citrique, tartrique et autres, il y a, pour une température donnée, une densité propre à chacun de ces acides, une sorte

de terme moyen où l'endosmose est nulle; s'il y a des courants dans ces cas, leur différence est nulle. Si, toujours à la même température, la densité d'un de ces acides est abaissée, il se fait endosmose vers l'eau; si elle est augmentée, il se fait endosmose vers l'acide.

L'équilibre existant pour une certaine densité d'un acide à une certaine température, si on élève cette température il se fera endosmose vers l'eau; si on l'abaisse, il y aura endosmose vers l'acide.

Ainsi, l'abaissement de la température et la diminution de densité de l'acide favorisent l'endosmose vers l'eau; réciproquement l'accroissement de la température et celui de la densité de l'acide favorisent l'endosmose vers l'acide.

Jusqu'ici (excepté le cas de l'alcool et d'une membrane de taffetas gommé) les acides seuls séparés de l'eau par une membrane animale ont donné lieu à l'endosmose vers l'eau.

Tous peuvent être amenés à ce résultat par des modifications convenables de la température et de la densité.

Quelques-uns n'offrent que ce sens de l'endosmose: ainsi l'acide oxalique à sa plus grande densité; celui sulfureux à la densité 1,02 et à la température 25° C.; celui hydro-sulfurique à la même température et à la densité 1,00628.

A 10° C. le terme moyen d'incertitude du sens de l'endosmose est pour l'acide hydro-chlorique la densité 1,017, pour celui sulfurique celle 1,07.

A 25° C. le même terme moyen est pour l'acide tartrique la densité 1,05, et la même à peu près pour l'acide citrique.

Si, au lieu d'une membrane animale, on emploie une membrane végétale de *colutea arborescens*, d'*allium porum*, le sens de l'endosmose est interverti: ainsi, l'acide oxalique donne lieu à l'endosmose vers l'acide; ceux citrique, tartrique, sulfurique, hydro-sulfurique, en des circonstances de température et de densité telles qu'ils eussent offert l'endosmose vers l'eau, au travers d'une membrane animale, donnent lieu au contraire à l'endosmose vers l'acide, si l'on emploie les membranes végétales ci-dessus.

ab Une cloison argileuse fait naître d'autres variations de sens. si 3797

Si l'on prend deux solutions de substances différentes qui soient sans action chimique l'une sur l'autre, et qui mises chacune isolément en rapport médiateur avec l'eau pure détermineraient des endosmose différentes de sens relativement à l'eau ; si, dis-je, on prend ces solutions et qu'on les mélange en les disposant ensemble dans le réservoir de l'endosmomètre, ce mélange, séparé de l'eau pure par une membrane animale, donnera lieu à endosmose dans le sens qu'eût déterminé seule la solution qui a le plus grand pouvoir d'endosmose. L'effet sera faible si les pouvoirs opposés approchent de l'égalité ; il pourra y avoir sensiblement équilibre.

De l'acide hydro-sulfurique et de l'eau gommée peu chargée de gomme étant mélangés dans le réservoir de l'endosmomètre, il se fait endosmose vers l'eau par l'action prépondérante de l'acide.

Ceci explique pourquoi les phénomènes d'endosmose peuvent être arrêtés ou changer de sens par la putréfaction des membranes qui ont long-temps macéré dans les liquides et dégagent de l'hydrogène sulfuré.

Deux solutions A et B, dont l'une A donnerait lieu avec l'eau pure à l'endosmose vers A, et l'autre B ferait naître aussi avec l'eau pure l'endosmose vers l'eau, étant mises, A dans le réservoir de l'endosmomètre et B en dehors, l'endosmose de B vers A est plus rapide que ne l'était celle de l'eau pure vers A. Exemple, l'eau sucrée (A) et l'acide oxalique (B).

Si les deux solutions comparées peuvent donner lieu à une réaction chimique, le sens de l'endosmose variera avec la densité relative de chacun.

La température étant de 22 ° C., on met dans le réservoir de l'endosmomètre une solution de soude de densité 1,069. La membrane est une vessie ; on verse dans le vase extérieur de l'acide hydro-chlorique de densité 1,193. Il y a endosmose vers l'acide ; on étend d'eau l'acide. L'endosmose est de moins en moins rapide ; pour la densité 1,086 de l'acide, il y a incertitude. On continue d'ajouter de l'eau à l'acide : l'endosmose reparaît, mais de sens contraire ; elle se fait

vers la base. On abaisse la densité de l'acide jusqu'à 1,069, celle de la base, l'endosmose continue de se faire dans le même sens. Alors, laissant l'acide à ce degré, on étend d'eau la solution de soude jusqu'à la densité minime 1,00001, et l'endosmose se fait encore dans le sens vers la base. L'acide sulfurique et la soude donnent des résultats analogues.

Ainsi les acides et les bases mis en opposition donnent lieu à des phénomènes d'endosmose qui, comme pour les acides à l'égard de l'eau, changent de sens au-dessus ou au-dessous d'un certain terme moyen de densité pour lequel il y a égalité entre les courants opposés qui peuvent s'établir.

Telles sont, à défaut de lois générales, quelques données de l'expérience groupées en règles partielles (1).

(1) On a recherché les auteurs qui pouvaient avoir eu, antérieurement aux travaux de M. Dutrochet, quelque idée des phénomènes de l'endosmose. Je citerai à ce sujet une note curieuse de Jean Bernouilly. Cette note a été réunie au Traité de Borelli, édit. de La Haie. On y verra la figure de l'appareil qu'on pourrait, pour l'intelligence du texte ci-dessous, tracer de la manière suivante : un vase cylindrique plein de liquide, un tube plus haut que le vase y est plongé debout. Voici les lettres : aux deux extrémités du tube, en haut E, en bas F; là est ajustée une membrane d'endosmose. Pour le niveau dans le grand vase A et B, pour le fond D et C (celui-ci au-dessous de A). Comme Jean Bernouilly appelle le phénomène mouvement perpétuel, il engage les incrédules à expérimenter eux-mêmes le fait et s'arme de tous les moyens de la logique :

« His præpositis Mobile perpetuum sic construo. Sumantur in quacunque quantitate, si
» vis, in æquali duo diversæ gravitatis liquores invicem miscibiles (qui per hyp. 4 possunt
» haberi) illorumque ratio gravitatis prius exploretur, quæ sit ut G ad L, gravioris ad levio-
» rem; deinde illis permistis impleatur vasculum AD usque ad A. Hoc facto sumatur tu-
» bus utrinque apertus EF ejus longitudinis, ut sit $AC : FE > 2L : G + L$, hujus vero
» tubi orificium inferius F obstruatur, vel potius obducatur filtro, vel alia materia qua-
» dam secernente liquorem leviorum a graviori (quæ per hyp. etiam potest haberi) tan-
» dem tubus hoc modo paratus liquori immergatur usque ad fundum vasculi CD; dico
» liquorem continuo per tubi orificium F ascensurum, et per orificium F in subjectum li-
» quorem prolapsurum.

» Quia tubi orificium F obductum est filtro (per constr.) quod liquorem leviorum a
» graviori secernit, sequitur, ut, si tubus immergatur ad fundum vasculi, liquor solum-
» modo levior, qui graviori est immistus per filtrum in tubum ascendere debeat, et qui-
» dem eousque ultra superficiem ambientis liquoris (per hyp. 2) ascenderet, ut esset AC;

SECONDE PARTIE.

Je viens à la seconde partie de ma question.

En général, la circulation dans les êtres organisés est le mouvement du fluide nourricier dans ces êtres.

On a souvent agité la question de savoir si les lois de l'hydraulique et en général si les lois physiques sont applicables aux mouvements qui ont lieu dans les êtres. On a quelquefois conclu pour la négative, en étalant les erreurs dans lesquelles étaient tombés ceux qui avaient tenté la chose.

Il faut bien s'entendre et distinguer trois points dans une telle question. Les lois à appliquer existent-elles suffisantes pour tout résoudre? Si ces lois étaient données, devrait-on essayer de les appliquer? L'insuccès de ceux qui l'ont tenté prouve-t-il qu'on doit chercher une autre voie pour arriver à la connaissance du phénomène?

» EF :: 2 L. G + L, quia vero (per constr.) AC : EF > 2 L : G + L, necesse est (per
» hyp. 3.) ut liquor levior per orificium E sese exoneret in vasculum subjectum, ibique
» denuo graviore conjungatur, et (per hyp. 4.) misceatur de novo, qui dein penetrando
» filtrum in tubum rursus ascendat, iterumque per superius orificium expellatur : sic ita
» que fluxus continuabitur in perpetuum. Q. E. D.

» Hinc commodè reddi potest ratio, cur aqua ex mari profundo ad summa usque cacu-
» mina montium jugiter ascendendo ex iis saltuatim prorumpat, et refluendo sub forma
» fluminum, se refundat in Oceanum, sicque natura nobis Perpetuum sistat Mobile. Hoc,
» inquam, non bene explicant illi, qui dicunt: eandem ob causam aquam ex mari in subli-
» mius ferri per terræ poros, ob quam liquor in tubulis perangustis ascendat ultra super-
» ficiem liquoris tubulos ambientis; nam si ita res explicanda foret, numquam demons-
» trare possent, cur eadem aqua in altum elevata e terræ gremio prolabatur, videmus
» enim in angustis istis tubulis, licet tantillum supra liquorem ambientem inclusus li-
» quor emineat, nunquam tamen extra eorum ora sese evolvere et in liquorem substra-
» tum decidere. »

Ce qu'il y a de remarquable, c'est que l'auteur insiste sur le caractère distinctif entre le phénomène qu'il expose et ceux capillaires proprement dits.

Pour le premier point, il est bien évident qu'il faudrait savoir toutes les lois dont peut dépendre le phénomène pour avoir en sa faveur des moyens d'exploration suffisants; par contre, si les lois à appliquer ne comprennent qu'un petit nombre des phénomènes, on peut rencontrer des obstacles insurmontables.

Cependant, si l'on ne s'appuie pas sur le peu de lois physiques connues, je pense qu'il vaut mieux s'abstenir de chercher : il n'est probablement que cette voie, et je ne conçois pas que l'on cherche à comprendre un phénomène, un mouvement quelconque dans les êtres, autrement qu'en le comparant à ceux analogues que nous observons dans les corps inertes, et dont nous connaissons imparfaitement, il est vrai, les liens d'enchaînement réciproques.

Pour le troisième point de la question, il est bien certain qu'un insuccès ne prouve rien, et même on peut, sans présomption inconvenante, espérer trouver des choses qui ont échappé aux anciens; car tous les jours les lois physiques se font et nous viennent en aide; nous sommes donc mieux placés qu'eux, et il faut toujours toucher à la science, comme a dit Pascal. C'est nous, selon lui, qui sommes les anciens; nous pouvons savoir ce qu'ils savaient, et on nous a appris des choses qu'ils ignoraient.

Il faudrait donc tenter la solution de la circulation, dans les êtres organisés, par les lois de l'hydraulique; mais pour avoir toute chance de succès indépendante de soi, il faudrait que ces lois fussent du moins en très-grande partie trouvées. Or, nous avons vu tout ce que l'explication des résistances laisse à désirer, surtout pour les petits vaisseaux, et les petits vaisseaux sont la grande difficulté dans notre question.

Les lois du mouvement des liquides dans les canaux sont donc jusqu'ici incomplètement connues, et de plus les modifications que devrait introduire dans ces lois la qualité des canaux dans lesquels nous avons à étudier le mouvement sont encore à désirer. Il nous manque donc en grande partie un des éléments de la question. Un autre élément de cette question, c'est la disposition de l'appareil circulatoire dans les êtres organisés. Sur ce point, les anatomistes ont

probablement, pour les grands vases au moins, fourni toutes les données nécessaires; je dis probablement, car peut-être que, quelques lois nouvelles d'hydro-dynamique venant à paraître, il serait besoin de nouvelles données, telles, par exemple, que certains coefficients d'élasticité des parois.

Je n'entreprendrai pas de décrire la disposition de l'appareil circulatoire dans les divers êtres, je dois la supposer connue, et me borner; je me contente de noter que généralement les vases sont souples, à parois élastiques et le plus souvent mobiles.

Enfin un autre élément à connaître, c'est la constitution physique du fluide nourricier à mouvoir: sa densité importe peu puisque la vitesse ne dépend que de la charge; mais une qualité importante, c'est la viscosité, qualité que l'on n'a en physique aucun moyen exact d'apprécier. La viscosité du fluide nourricier varie-t-elle dans les êtres, et dans un même être? La pression que ce fluide supporte dans le système des vaisseaux, et les frottements des globules, développent-ils de l'électricité qui influe sur son aptitude à traverser les capillaires, comme cela a lieu pour l'eau électrisée?

Tous ces éléments de la question étant donnés, qu'aurait-on à trouver? Que faudrait-il en un mot déterminer pour résoudre en général le problème de la circulation dans les êtres.

La circulation est le mouvement d'un liquide; quand on cherche à découvrir le problème d'un mouvement quelconque on a à déterminer 1° le sens du mouvement, 2° la vitesse en chaque point, ou l'espace parcouru pour chaque instant par une molécule du mobile située en un lieu déterminé; puis 3° il s'agit de remonter à la cause du mouvement et de mesurer cette force en la rapportant à quelque autre qui lui soit comparable.

Je vais examiner les principaux travaux qui ont été faits pour déterminer plusieurs de ces problèmes partiels.

Je commencerai par les végétaux, et j'aurai peu de chose à dire qui se lie directement aux lois du mouvement des liquides dans des canaux. Je remarquerai d'abord que l'aliment arrive aux végétaux spé-

cialement à l'état gazeux, et que partant le mouvement du fluide nourricier se trouve pour la plus importante partie hors de ma question qui ne comprend que les liquides.

En second lieu je remarquerai que les canaux, dans les végétaux, étant capillaires, si l'on en excepte quelques points des vaisseaux propres, le mouvement des liquides ne dépendra que des expressions incertaines du phénomène de l'endosmose, qui sous le point de vue de ma question se réduit à dire que les spongioles du chevelu font office de membrane poreuse, et que l'eau ambiante pénètre parce qu'un liquide dense ou hétérogène existe dans les vaisseaux du végétal qui parviennent aux spongioles.

Il me semble bien difficile que l'on parvienne jamais à déterminer le sens du mouvement et sa vitesse en tel ou tel point, d'après les propriétés physiques ou chimiques de la sève lymphatique et du latex, en général, de deux portions de fluides non identiques et séparées par des cloisons de vaisseaux, ou se trouvant, l'une dans un vaisseau, l'autre dans un méat intercellulaire ou dans une cellule. On sait par l'expérience célèbre de Halles quelle est l'intensité de la force qui opère la sortie de la sève par une plaie faite à un végétal, ou l'ascension d'un liquide dans les vaisseaux ouverts d'une branche d'arbre tronquée qu'on y plonge, soit que la branche tienne encore à l'arbre ou non, etc.... Tous ces problèmes d'hydro-dynamique sont jusqu'ici sans loi.

J'observe que dans les végétaux il existe divers espaces pleins de liquides, dont la surface est en quelques points libre dans des gaz; dès-lors, les lois de l'équilibre des liquides dans les espaces capillaires existent, et, en vertu de ces lois, on peut très-bien se rendre compte que certains tubes restent constamment pleins malgré une évaporation à la surface libre du liquide.

Enfin, on doit se rappeler ici les expériences de Dubuat et autres physiciens que j'ai cités, c'est-à-dire que la fluidité des liquides augmente avec leur température. Gerstner pense que c'est là une des causes pour lesquelles la circulation dans les végétaux est plus active dans la saison chaude. On a vu que la chaleur favorise aussi l'endosmose.

Je viens aux êtres organisés animaux. Les premières expériences positives sur la circulation dans les animaux sont, comme on sait, de Harvey. Il y fut probablement conduit par la considération des valvules qu'il avait observées aux démonstrations de Fabrice d'Aquapendente. Son expérience sur le cœur d'un serpent, qui se vidait ou restait distendu suivant qu'on pressait du doigt la veine ou l'artère, est une première preuve du sens dans lequel le sang est mu. Les considérations d'Harvey sur le phénomène des valvules des veines superficielles qui arrête le sang dans un sens et non dans l'autre ; la discussion des effets d'une ligature, soit qu'on la serre médiocrement, soit qu'on la serre fortement, sont encore des preuves. Enfin, l'espèce de vaisseaux qui fournissent le plus de sang dans une plaie et qui, seuls, persistent à en donner ; la différence d'intensité du jet de sang d'un grand vaisseau piqué, suivant que l'on comprime ce vaisseau du côté du cœur ou du côté opposé ; l'accord parfait entre tous ces résultats et la disposition des valvules, etc..., ne peuvent laisser aucun doute sur le sens du mouvement du sang dans les gros troncs, quoique le phénomène, à cause des anastomoses, ne soit pas aussi simple qu'il paraît. La difficulté augmente pour les petites branches, et dans les capillaires le sens paraît pouvoir varier accidentellement en des points. Le sens du fluide nourricier est donc ici déterminé.

Étant donné, en outre, ce qu'on admet généralement, que le cœur force à pénétrer dans l'aorte une certaine quantité de sang, lequel distend les vaisseaux qui réagissent et forcent une quantité de sang égale à passer outre pendant le temps d'une période du cœur, cherchons, avant d'aller plus loin, à nous représenter hydrauliquement ce qui se passe. Ceci éclairera beaucoup toutes les discussions ultérieures.

Pour plus de simplicité, supposons que l'aorte et le cœur soient à l'air libre sous la pression atmosphérique, et que la crosse de l'aorte soit le point culminant du système, c'est-à-dire, supprimons par la pensée tous les vaisseaux ascendants. Si maintenant quelqu'un de ceux qui dérivent de l'aorte descendante, la crurale, par exemple, est ou-

verte, et qu'un tube piézométrique lui soit adapté bout à bout, ce tube indiquera une certaine hauteur de colonne. D'après ce que nous avons dit dans la première partie, cette hauteur mesure la charge effective $H - r$ sur l'orifice d'embranchement du canal dérivé. Si le tube était embranché normalement à la paroi, et que le courant continuât dans la crurale, ce serait la disposition ordinaire des piézomètres, et cet instrument indiquerait seulement la pression, c'est-à-dire $H - r - 0,051 v^2$, suivant le théorème de Bernouilly.

Nous considérons la crosse de l'aorte comme un réservoir fermé et comprimant le liquide qui s'y trouve.

Nous avons vu que dans ce cas il fallait transformer en colonne liquide cette pression qui a lieu sur lui dans le réservoir, et l'ajouter pour avoir la hauteur réelle H au-dessus de l'orifice extérieur où est le tube. Cette hauteur H , diminuée de la résistance r de la conduite depuis le réservoir jusqu'à l'orifice, donnera la charge effective $H - r$, à laquelle serait due la vitesse d'entrée dans le canal dérivé.

Si on suppose maintenant l'aorte remise en place dans la poitrine, la pression ambiante à elle ne sera plus la même, elle variera sans cesse avec la respiration, et de là des variations semblables pour $H - r$, car le même principe qui a conduit à transformer en colonne la pression exercée par l'aorte, veut que l'on transforme de la même manière la différence entre la pression ambiante à ce réservoir qui est souple, et celle ambiante au lieu de l'embranchement, pour l'ajouter où il convient. La charge sur l'orifice variera donc par ce fait.

Pour la seconde hypothèse, que nul vaisseau n'était ascendant par rapport à la crosse de l'aorte, si l'on y réfléchit, on comprend que la réalité d'un tube ascendant ne doit pas changer sensiblement les conditions. On peut se représenter une tranche du liquide dans le plan de l'orifice du tuyau ascendant, comme supportant la masse liquide du système qui dépend du tuyau et la résistance totale de ce tuyau, cette force représentée par le poids du liquide supérieur à la tranche considérée, et la résistance totale du tuyau ascendant remplacerait à chaque instant, pour le réservoir, la pression exercée par la paroi élastique

dans notre hypothèse. Il en serait de même pour tout autre tuyau ascendant.

Et comme on peut en dire autant pour tout autre tuyau embranché en quelque sens qu'il le soit, on pourra rapprocher le cas vrai de celui d'une conduite simple, telle que nous l'avions supposée d'abord, n'offrant qu'un embranchement. Il faut alors se faire une idée particulière de ce qui se passe dans l'aorte. On peut se le représenter par une nouvelle hypothèse.

Prenons un vaisseau quelconque embranché sur elle, et supposons que tous les filets partis de la crosse de l'aorte et qui passeront par le vaisseau désigné, soient enveloppés d'une membrane infiniment mince, formant un tube qui en chaque point offrirait une section telle qu'avec la vitesse propre dans l'aorte il fût satisfait à la dépense du vaisseau embranché. Si la résistance de ce tube idéal est nulle, si sa rigidité est nulle, rien ne sera changé aux conditions du mouvement, ni pour le petit tuyau embranché, ni pour l'aorte dont la section, dans notre hypothèse, serait l'aire différente de deux cercles. Or, on voit que dans la réalité les conditions de l'hypothèse existent.

On peut donc considérer le phénomène comme se passant dans des tuyaux isolés. Seulement, en chaque point du système, la somme des sections devra satisfaire avec la vitesse moyenne en chacune d'elles à la somme des pertes de vitesse pour la longueur correspondante du système de conduite : et on sait bien que la somme des sections grandit à mesure qu'on s'éloigne du cœur.

Voici quelques-unes des pertes qui doivent avoir lieu :

1° Perte de vitesse par la résistance de la conduite dépendant de l'action des parois et de la viscosité ; cette perte serait proportionnelle à la longueur de la conduite parcourue ; mais vers les espaces capillaires elle deviendrait rapidement très-grande, comme il résulte du travail de Coulomb, des expériences de Dubuat et autres auteurs cités... Nous n'avons aucun moyen de mesurer cette perte.

2° Perte par les coudes. Celle-ci paraît être infiniment petite, parce

que généralement les coudes sont courbes et de la forme de moindre résistance.

3° Perte par *érogation* ou embranchement. Cette perte paraît devoir être très-notable pour le tuyau embranché, puisqu'il résulte des expériences de MM. Mallet et Genieys, qu'elle peut s'élever dans les branchements à parois rigides jusqu'à $\frac{2}{3}$ de la charge sur l'orifice d'entrée du tuyau. Les tuyaux souples sont-ils plus avantageux sous ce rapport? Je penche pour l'affirmative.

La perte par érogation, pour la conduite principale au-delà du branchement, paraît être insensible d'après les expériences de M. d'Aubuisson. Rien ne porte à penser qu'elle doive devenir plus grande dans un tuyau souple.

4° Il n'existe pas naturellement, dans le système des vaisseaux que parcourt le sang, d'étranglements tels que nous les avons définis. S'il s'en présente accidentellement, comme quand on comprime un vaisseau en un point circonscrit de son trajet, nous avons vu que la diminution de section pouvait aller jusqu'à 0,94 de la section primitive sans diminuer la vitesse de plus de 0,01.

On peut se rendre compte du bruit produit alors, et qu'on perçoit en auscultant le vaisseau, par ce résultat des expériences de M. Savart, que le passage rapide d'un fluide à travers un orifice rétréci est périodiquement variable.

Venons aux travaux faits sur la circulation en général. Je soumettrai les principales remarques que m'a suggérées leur examen fait après ces études préliminaires.

Mais, auparavant, je vais citer quelques résultats obtenus d'une manière, en quelque sorte, empirique sur la vitesse réelle du sang. Les expériences sont dues à M. Hering. En voici les résultats tels que les donne M. Muller : « Une solution d'hydro-cyanate de fer et de potasse, en mélange immédiat avec le sang, pour arriver de l'une des veines jugulaires d'un cheval, à travers le cœur droit, la petite circulation, le cœur gauche, la grande circulation jusqu'à la veine jugulaire opposée, a mis de 20" de temps à 25" et de 25" à 30" ; — de la jugulaire

à la grande saphène, seulement 20" ; — de la veine jugulaire à l'artère massétérine entre 15" et 30" ; — à l'artère maxillaire externe une fois entre 10" et 15", une autre fois entre 20" et 25" ; — de la veine jugulaire jusqu'à l'artère métatarsienne entre 20" et 25", 25" et 30", et une fois plus de 40". Le résultat restait appréciablement le même quel que fût le nombre des battements du cœur. On peut conclure que la circulation est accomplie chez l'homme en un nombre de pulsations du cœur variant de 80 à 214, et qu'elle dure de 1 à 2 minutes (1). »

Une première difficulté qu'on rencontre en étudiant les auteurs originaux qui ont expérimenté sur la circulation, c'est de comprendre la valeur des termes par eux employés, souvent sans définition préalable. On se sert du mot vague *force*. Cette difficulté à comprendre la portée des mots est immense. C'est là une des causes de la dissidence des conclusions que, dans ses notes sur Halles, Sauvages a tenté avec grande peine de concilier, et sur lesquelles M. Poiseuille a dû revenir plus tard dans la première partie de sa thèse.

Dans tout ce que je vais dire, je conserverai à mes expressions la valeur que j'ai définie ci-devant, d'après les auteurs d'hydraulique, et si, par mégarde, je viens à employer quelque terme non défini, on en trouvera la signification dans leurs traités.

Les premières données importantes prises par expérience sur la circulation du sang sont dues à Halles (2). En général, la plupart des expériences faites par les auteurs sont des mesures piézométriques prises. Halles le premier en eut l'idée et essaya des pressions positives ; plus tard, M. Barry essaya des pressions négatives, et dernièrement M. Poiseuille, à l'aide d'un instrument plus précis et à double emploi, put mesurer à la fois les pressions positives ou négatives et leurs variations.

Voici d'une manière sommaire les résultats de Halles :

PREMIÈRE EXPÉRIENCE (*jument de quatorze ans*). — Il adapte à

(1) J. Müller, *Physiol.*, t. I^{er}, p. 186.

(2) Statique des animaux.

l'artère crurale du côté du cœur, et bout à bout, un tube qui se relève verticalement, observe la hauteur maxima du sang qui y est poussé (8 pieds 3 pouces environ); voit des oscillations petites, concordantes avec le pouls, et des variations plus grandes (12 à 14 pouces), non isochrones au pouls. Il observe comment varient toutes ces hauteurs après des pertes successives de sang, pertes qu'il mesure; il fait un tableau de tout.

Il se rend compte des grandes oscillations par les efforts que l'animal faisait à leur époque, efforts qu'il juge devoir chasser le sang de la veine cave et du poumon vers le cœur.

DEUXIÈME EXPÉRIENCE, analogue à la première.

TROISIÈME EXPÉRIENCE (*jument de dix à douze ans*). — Tube à la veine jugulaire gauche du côté des capillaires. Il observe de grandes variations entre 4 et 6 pouces et plus de 4 pieds 2 pouces.

Sur la même jument, tube à la carotide gauche du côté du cœur: hauteur maxima, 9 pieds 6 pouces.

Après ces expériences, il recherche ce qu'il appelle *la force que le cœur de cette jument employait à pousser le sang*.

Pour cela, il injecte le cœur avec de la cire, sous une pression de 4 pieds de cire liquide. Il prend le noyau représentant la capacité du ventricule gauche, mesure l'étendue de la surface totale, toutes les anfractuosités comprises, développe cette surface et obtient une certaine grandeur, 26 pouces carrés. Il calcule ce que pèserait une colonne de sang ayant une telle base, et pour hauteur celle du niveau dans l'expérience; il obtient ainsi un poids de 113 livres pour la mesure de la force qu'il cherche.

Halles suppose implicitement que la hauteur de colonne traduit à l'extérieur la pression supportée par l'unité de surface du cœur; nous verrons plus tard ce qu'il en est: c'est un point grave.

Mais en admettant même le principe, Halles aurait trouvé pour mesure de ce qu'il cherche un nombre trop grand, si on admet (ce que je crois avoir été son intention) qu'il recherche la pression à laquelle doivent résister les parois ou couches d'enveloppe du cœur. Il suit d'un

corollaire émis au commencement de cette thèse, que les surfaces rentrantes nécessitaient une correction, comme l'a indiqué M. Pelletan (1).

Les quatrième, cinquième et sixième expériences sont faites comparativement sur divers animaux.

LA SEPTIÈME est *sur des chiens*.—Ici il introduit une modification qui devait changer les résultats. Il dispose son tube normalement sur la paroi d'un vaisseau dans lequel le sang continue de couler. C'est la disposition des piézomètres en hydraulique, et le résultat de l'expérience eût donné ce qu'on appelle dans cette science la pression sur la paroi. Nous y reviendrons.

L'expérience de Halles ne réussit qu'imparfaitement, l'appareil se déranga ; il observa néanmoins sur la veine jugulaire d'un chien 9 pouces 12 pendant un effort et plus de 4 pieds 11 pouces sur l'artère carotide.

HUITIÈME EXPÉRIENCE. — Il calcule la vitesse de cette manière : il sort du cœur un certain volume de sang à chaque sistole ; ce volume, divisé par la section de l'aorte, donne la vitesse dans l'aorte ou la longueur du cylindre qui sort pendant la sistole. Dans une minute il se fait tant de sistoles, donc il passe un égal nombre de cylindres dans l'aorte pendant une minute ; or la sistole n'a lieu que pendant $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{2}$ du temps, donc s'il passait constamment du sang dans l'aorte avec la même vitesse que pendant la sistole, il en passerait pendant une minute trois fois ou deux fois autant que ce que nous avons dit ; donc tant. Donc la vitesse dans l'aorte est telle pendant la sistole.

La donnée fondamentale de ce problème n'existe pas ; on n'a aucun moyen de savoir de combien le cœur se vide pendant une sistole.

Et en admettant qu'on connût la quantité de sang passée durant la sistole dans l'aorte, le raisonnement précédent ne donnerait pas la vitesse ultérieure du sang dans les vaisseaux. En comparant, comme l'a fait Keill, le rapport des sections, il serait admissible pour une conduite à parois rigides ; mais alors il faudrait supposer des temps d'arrêt général égaux à $\frac{2}{3}$ ou $\frac{1}{2}$ du temps pris pour unité.

(1) Physique médicale, t. I^{er}, p. 423, 1851.

Ou bien, si l'on admet des vaisseaux élastiques, comme cela est en réalité, il faut considérer au point de départ la quantité de sang passée dans l'aorte pendant une sistole, comme y passant pendant une période entière du cœur d'un mouvement uniforme, et la donnée conviendrait alors pour rechercher quelle est la vitesse constante en tel ou tel point du système des vaisseaux.

Je n'irai pas plus loin; Halles entre ici dans des recherches où il serait bien plus difficile de le suivre, et qui demanderaient bien du travail pour être jugées.

M. Barry fut porté par des idées préconçues à rechercher des pressions négatives. Il employa à cet effet un tube coudé, dont une branche horizontale s'adaptait au point à explorer, et l'autre verticale descendait plonger dans un liquide coloré; cette branche verticale présentait une partie où le tube était contourné en spirale.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE (cheval). — Il ajusta bout à bout la branche horizontale à la veine jugulaire d'un cheval, du côté de la poitrine. Il observa que le liquide du vase inférieur montait pendant l'inspiration, et qu'il y avait généralement arrêt ou abaissement de niveau pendant les expirations.

DEUXIÈME EXPÉRIENCE (chien). — Il disposa le même tube dans la plèvre, entre le péricarde et le poumon, et il observa encore des ascensions isochrones aux inspirations; il ferma la trachée et observa des ascensions plus fortes.

TROISIÈME EXPÉRIENCE (cheval). — Il fit pénétrer le tube explorateur dans le péricarde, et observa de même ascension du liquide pendant l'inspiration, et ordinairement arrêt ou dépression pendant l'expiration.

QUATRIÈME EXPÉRIENCE (cheval). — Il disposa un tube renflé de verre entre les deux bouts d'une jugulaire divisée; et, autant qu'il en put juger par la vue, le sang ne traversait ce canal que pendant les inspirations. L'animal était abattu en position horizontale.

CINQUIÈME EXPÉRIENCE. — L'animal étant debout, les mouvements du sang visibles dans le même appareil ne sont plus synchrones à ceux de la respiration; mais les variations de vitesse lui ont paru plus fré-

quentes que le pouls. L'animal étant abattu, le synchronisme avec la respiration se rétablit.

M. Barry cite dans sa thèse de nouvelles observations à l'appui de celles-ci ; de plus, dans une expérience directe sur un cheval vivant, il parvint à porter la main sur la crosse de l'aorte et la trouva dans un état de tension constant, sinon qu'en la comprimant avec force on percevait de petites alternatives de plus grande et moindre tension.

Les données que fournissent ces expériences pour des considérations du genre de celles qui nous sont demandées sont évidentes, c'est que la pression que supportent à l'extérieur les canaux placés dans le thorax est variable ; mais pour avoir des mesures de ces variations, etc., il faut venir à M. Poiseuille.

M. Poiseuille se sert d'un appareil précis qu'on peut considérer comme un piézomètre propre à indiquer les pressions négatives ou positives, relativement à l'atmosphère.

A l'aide de cet appareil, M. Poiseuille a pu mesurer les phénomènes qui se passent dans les expériences que nous venons de rapporter, en faire de nouvelles et fournir au problème des données plus positives.

Il compare *la force avec laquelle le sang se meut dans les vaisseaux* en comparant les hauteurs de colonne liquide dans un tube disposé bout à bout, à l'encontre du sang dans les vaisseaux, et l'expérience faite en divers points du système artériel ayant donné des résultats sensiblement identiques pour un même animal, il conclut, *qu'une molécule de sang se meut avec la même force dans tout le trajet du système artériel.*

Les hauteurs obtenues diffèrent peu pour des animaux divers soumis à l'expérience ; ainsi, elles ont varié entre 141 et 182 millimètres de mercure, pour des chiens et des chevaux de taille différente.

Nous chercherons plus tard à comprendre ce qu'en hydraulique expriment les indications de l'instrument relativement au mouvement du sang. M. Pelletan (1) a déjà fait savoir, dans son Traité de physique, que cette donnée était insuffisante pour une conclusion quelconque, relativement à la vitesse qu'avait le sang, antérieurement à l'expérience,

(1) Ibid.

dans le point exploré, ou à celle qui l'anime actuellement en quel-
qu'autre point.

Je dois signaler ici une cause d'erreurs qui ont pu se glisser dans
les résultats des expériences de M. Poiseuille.

Si, dans un tube doublement coudé comme un niveau d'eau, on in-
troduit une colonne de liquide qui n'en occupe qu'une certaine partie,
on pourra en inclinant convenablement l'appareil, faire passer dans
une des branches une portion du liquide telle qu'en la fermant du doigt
et rétablissant la verticalité des branches, le niveau n'ait pas lieu ; la
différence indiquera celle des pressions. Si alors on débouche le tube,
le niveau ne se rétablira pas immédiatement, il se fera des oscillations
isochrones dont Newton a déterminé la longueur d'oscillation (1). Le
liquide, en vertu de la vitesse acquise, a dépassé la position d'équilibre
d'une quantité presque égale à la différence primitive de niveau, du
moins pour la première oscillation simple, car l'amplitude décroît ra-
pidement.

Si donc après une oscillation simple, on avait pris la différence de
niveau pour indice de la pression d'un côté ou de l'autre, on aurait été
induit en erreur. Si le tube est cylindrique, on pouvait prendre sans er-
reur sensible la moyenne entre le point le plus haut et celui le plus
bas : si le tube n'a pas le même diamètre dans toute son étendue, cette
moyenne ne donnerait pas la différence réelle des pressions, telle qu'elle
serait dans l'état d'équilibre. L'incertitude serait encore plus grande
dans l'un et l'autre cas, si la pression variait brusquement pendant la
durée d'une oscillation.

Je ne pense pas que l'erreur puisse aller aussi loin dans les indica-
tions de l'hémodynamomètre. Mais certainement il est à craindre que
la vitesse acquise par le liquide de l'appareil dans un sens ou dans l'aut-
re n'introduise des perturbations, surtout lors des grands déplace-
ments brusques. Peut-être même que pour un cas moins complexe

(1) M. Lehot s'est servi de ce moyen pour comparer la viscosité de divers liquides, et
discuter le problème de leur écoulement par des tubes capillaires.

que la circulation, par exemple, si on adaptait l'instrument à une vessie distendue par un liquide, sous une pression brusquement variable, il n'indiquerait pas à chaque instant, par son niveau, la pression intérieure.

Dans une autre série d'expériences (1) faites sur les veines, M. Poiseuille a obtenu des indications tantôt positives, tantôt négatives, pour la pression dans ce système relativement à celle de l'atmosphère. Les variations par l'influence de la respiration ont été comprises dans une première expérience faite près de la poitrine et du côté du cœur, entre ± 80 à 90 millimètres, d'une solution de sous-carbonate de soude, dont la densité était $\frac{1}{10}$ de celle du mercure. Les signes négatifs correspondent aux inspirations, les positifs aux expirations. Ici l'auteur avait choisi ce liquide pour plus de sensibilité dans l'appareil, et lors même qu'il emploie le mercure, il dispose une petite colonne de la solution alcaline du côté du vaisseau, pour éviter les effets de la coagulation, lesquels ont dû, selon sa remarque, affecter d'erreur les résultats de Halles.

M. Poiseuille fit ainsi un grand nombre d'expériences qui donnent une première mesure des phénomènes observés par M. Barry ; poursuivant ensuite cette étude avec beaucoup de sagacité, il s'occupa de déterminer comment varient les indications de l'instrument, pour des distances différentes de la poitrine, et dans nombre de circonstances diverses.

On lit, page 8, le passage suivant :

« Voici maintenant la conséquence que nous tirons des expériences » précédentes : quand, après l'inspiration, la poitrine se resserre, la » pression dans l'intérieur de cette cavité devient plus grande ; par » suite, les veines qui y sont contenues sont comprimées et tendent à » se débarrasser du sang qu'elles renferment, ainsi que nous l'indiquent dans cette circonstance les plus grandes hauteurs du liquide » dans le tube ; mais les valvules que le reflux du sang viennent d'appliquer les unes contre les autres, s'opposent à la sortie d'une nou-

(1) Recherches sur les causes du mouvement du sang dans les veines.

» velle quantité de sang ; ce liquide ainsi arrêté par les valvules (et
» ce que nous disons des valvules de la jugulaire s'applique évidem-
» ment aux valvules de la sous-clavière), et comprimé dans les veines
» en même temps par la poitrine qui se resserre, se présente de nou-
» veau à l'action de l'oreillette droite, dont le jeu est plus fréquent
» dans un temps donné, que les mouvements respiratoires dans le
» même temps. Ainsi, nous croyons devoir conclure que si l'inspira-
» tion appelle vers la poitrine une certaine quantité de sang veineux,
» l'expiration aussi concourt puissamment à mouvoir le sang vers le
» cœur. »

Je fais une remarque : si la pression dans l'intérieur de la poitrine devient plus grande, si les veines qui y sont contenues sont comprimées et tendent à se débarrasser du sang qu'elles renferment, le cœur, qui est aussi contenu dans cette même cavité de la poitrine, ne peut manquer d'être également comprimé, et il me semble qu'il doit naître de là une résistance compensatrice.

M. Poiseuille cherche plus loin quelles indications donne l'instrument disposé à l'encontre du sang en divers points du système veineux ; il trouve des hauteurs positives de 10, 16, 22, 24 millimètres de mercure dans la veine humérale d'un chien de moyenne taille. La hauteur maxima, correspondant aux époques d'inspiration et de contraction du cœur simultanées ; celle minima, aux époques des expirations et dilatations du cœur. Il explore d'autres points, varie ses expériences, et poursuit l'étude de l'influence de ces deux actes sur la circulation veineuse. Il étudie ensuite la circulation abdominale qui reste enveloppée de tant de ténèbres, etc..... Il me serait impossible d'analyser ce travail. Je m'arrête donc.

Je regrette aussi que le peu de jours qui nous sont accordés ne m'ait pas permis d'étudier sous le point de vue de la question les travaux de plusieurs autres expérimentateurs, et en particulier ceux de M. Magendie sur l'influence de la respiration, relativement aux mouvements du sang dans les artères.

On voit combien il se présente de difficultés quand on cherche à

juger les faits sous le rapport hydraulique. Mais, je le répète, une autre difficulté presque aussi grande est de saisir la portée des mots que les auteurs adoptent.

En résumé, nous voyons que les principales données qu'ont fournies de diverses manières les expérimentateurs sur la circulation, sont des hauteurs de colonnes liquides dans des tubes adaptés au système des vaisseaux. Avant de chercher ce qu'expriment ces hauteurs, il faut, pour les pouvoir comparer, les traduire en hauteurs de colonnes du liquide circulant, c'est-à-dire qu'une hauteur d'un liquide autre étant donnée, il faut supposer en son lieu une colonne du fluide nourricier de même section, de même poids, et calculer quelle en serait la hauteur; car les hauteurs sont tout en hydraulique, puisqu'on en conclut la grandeur de la charge, et que l'écoulement ne dépend que de la charge.

Les indications des instruments étant ainsi rendues comparables, il s'agit de trouver ce qu'elles expriment.

Si le tube explorateur est disposé normalement à la paroi en un point d'un vaisseau, le reste du système étant intact et la circulation se faisant régulièrement, la hauteur de colonne exprimera *la pression sur la paroi du vaisseau*, telle qu'on l'entend en hydraulique, ou ce que les auteurs dans cette science appellent simplement la *pression*; c'est ce qu'ils recherchent en employant leurs piézomètres. Cette hauteur de colonne h est liée par la formule de Bernouilly

$$h = H - r - 0,051 v^2$$

à la vitesse v du liquide dans le vaisseau au point exploré, à la résistance r de la conduite depuis l'origine du mouvement où le réservoir, r pouvant se comparer à une hauteur de colonne dont il faudrait diminuer la *charge entière* H pour avoir *la charge effective* $H - r$ à laquelle *serait due la vitesse* du liquide dans le vaisseau au point exploré; ou, en d'autres termes, qui est liée à cette vitesse par la formule de Toricelli

$$v = \sqrt{2g (H - r)}$$

Halles seul a recherché cette hauteur h dans une expérience que j'ai citée, et dans laquelle il ne réussit qu'imparfaitement.

On pourrait la chercher par la vitesse de sortie du sang à travers un orifice qu'on parviendrait à ménager convenablement en mince paroi. C'est pour cela que j'ai rappelé les formules de ce calcul.

Mais si le tube explorateur n'est plus disposé, comme on fait des piézomètres, sur la paroi d'un vaisseau où le liquide continue de couler, s'il est ajusté bout à bout à un embranchement tronqué dans lequel le courant cesse, la hauteur de colonne h n'est plus liée par la même formule à la *charge effective* et la *vitesse* au point exploré.

Distinguons deux cas :

1^o Si l'embranchement se fait normalement, on peut considérer le vaisseau embranché et le tube explorateur comme ne formant qu'un tube unique piézométrique. On a donc la formule ci-dessus pour lien entre la hauteur h dans le tube, la vitesse v dans le vaisseau d'où part l'embranchement, et la *charge effective* $H - r$ sur l'orifice du tuyau embranché. Si ce tuyau n'existait pas, la vitesse de sortie par cet orifice serait due à la hauteur $H - r$; mais si le liquide, pour s'échapper, est obligé de parcourir l'embranchement depuis l'orifice d'entrée jusqu'à la troncation, il naîtra la résistance d'*érogation*, et la perte de vitesse qui en résultera pourra être double de la vitesse persistante ou de sortie à l'orifice libre. C'est du moins ce qui est démontré pour les tuyaux rigides, par les expériences de MM. Mallet et Genieys, que j'ai rappelées dans la première partie de cette thèse. Peut-être la *perte par érogation* est-elle moindre dans les tuyaux souples?

Si donc le but des explorations était de trouver la vitesse avec laquelle le sang sortirait par un vaisseau tronqué, on voit par combien de détours il faudrait passer.

Mais si le but est de trouver la vitesse réelle qu'avait le sang dans le point exploré avant l'expérience, tout manque. En effet, la vitesse de sortie au point tronqué étant obtenue, à grand peine et chance d'erreur, de la manière ci-dessus, la *charge effective* pour le point à laquelle la vitesse de sortie serait due ne pourrait conduire à la connaissance de la

vitesse, dans le cas où le tuyau serait intact, qu'autant qu'on connaîtrait la résistance ultérieure de ce tuyau, et celle du milieu où il débouche; or, on ignore tout cela, et une réflexion simple met la chose en évidence: il est clair, en effet, que le tuyau pourrait se terminer par un cul-de-sac; que dans le cas d'un liquide non coagulable, les choses se seraient passées comme dans le cas contraire. Enfin, si par l'exploration on a pour but de découvrir la vitesse dans le vaisseau majeur, la formule est plus simple, comme on a vu.

2° Les difficultés sont encore plus grandes, si le tuyau embranché ne l'est pas normalement, et si en outre il faut tenir compte de la forme des surfaces au point d'embranchement.

Dans la circulation chez l'homme et les mammifères, la *charge entière* H se compose de *trois termes* qui s'ajoutent.

Le *premier terme* de H est la différence de niveau entre le point exploré et le cœur ou la crosse de l'aorte.

Le *deuxième terme* de H peut (en conservant au mot pression son acception commune) être défini de la manière suivante: c'est la hauteur de colonne de sang, qui, en vertu de la pesanteur, exercerait sur l'unité de surface une pression égale à celle qu'exerce, en vertu de son élasticité, la paroi de l'aorte sur l'unité de surface du sang contenu dans ce vaisseau.

Enfin, le *troisième terme* de H est la différence de niveau qui existerait, pour un état statique, entre les surfaces libres d'une colonne de sang renfermée dans un siphon dont les deux branches s'ouvriraient, l'une dans le thorax, où est l'aorte, l'autre dans l'atmosphère.

Les auteurs, quand ils ont comparé leurs expériences, ont en général, pour chacune, compensé le premier terme de la valeur de H .

Le troisième est peu grand pendant la respiration naturelle, comme on a pu en juger par son influence petite alors dans les expériences.

Le second terme de la valeur de H est donc le plus grand, et sans aucun doute. Il varie rapidement, mais d'une petite quantité, et périodiquement pour chaque période des mouvements du cœur. C'est lui seul qui exprime la pression supportée par l'unité de surface du cœur pendant sa contraction. Un problème serait de le trouver.

Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus par M. Poiseuille conservent toute leur importance ; en effet, ils conduisent à cette conséquence que partout sensiblement, dans le système artériel, la valeur $H - r = 0,051 v^2$ est identique. Or, H ou la charge totale ne variant sensiblement que par son terme minime qui dépend des mouvements respiratoires, on peut, sans grande erreur, la regarder comme constante, et dès lors on voit que si r ou la résistance de la conduite vient à varier dans un sens, il faudra que $0,051 v^2$ varie assez dans un sens opposé, pour qu'il y ait compensation et que l'expression ci-dessus ne change pas sensiblement de valeur.

Or, bien que v ou la vitesse réelle nous soit inconnue, le rapport de ses deux grandeurs moyennes pour deux sections communes du système à deux distances différentes du cœur est nécessairement égal au rapport inverse de ces sections ; de telle sorte que là où la section commune grandit le plus rapidement, c'est-à-dire au point des capillaires, là aussi la résistance de la conduite grandit le plus rapidement.

En d'autres termes, l'accroissement de la résistance pour l'unité de longueur du système de conduites est d'autant plus grand que l'on considère une longueur commune de ce système plus près des capillaires.

Du reste, ces conséquences des expériences de M. Poiseuille s'accordent parfaitement avec tout ce que nous connaissons touchant la résistance plus grande des tubes inertes capillaires au mouvement des liquides.

Dans le cas où l'on aurait à considérer le ventricule gauche du cœur ou l'aorte comme réservoir comprimant, et l'oreillette droite comme récipient à parois molles disposé à l'orifice de sortie du système, $H - R$ exprimerait la charge effective à laquelle serait *due* la vitesse de sortie par l'orifice des veines ; R serait la résistance totale du système de conduite ; et, pour ce cas, des trois termes de H , deux seraient nuls ; le deuxième seul, ou celui qui indique la pression exercée par l'unité de surface du cœur, subsisterait. Ce devait être.