



La mécanique des fluides

MOUVEMENTS DES LIQUIDES ET DES GAZ



La mécanique des fluides est une discipline de la science physique qui étudie les fluides et leurs propriétés physiques. L'état fluide ainsi observé regroupe les liquides et les gaz : ce sont bien sûr l'eau, l'air et les différents gaz, mais également les substances boueuses, pâteuses, gélatineuses.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES FLUIDES

Les états liquide et gazeux sont regroupés sous le terme de phase fluide ; ces deux états ont pour caractéristique commune d'être déformables. C'est donc à ces fluides, et plus particulièrement à leur écoulement, que s'intéresse la mécanique des fluides.

TERMINOLOGIE ET DÉFINITIONS

Statique et dynamique des fluides

Dans l'étude des fluides, on distingue dans un premier temps la statique et la dynamique des fluides. L'hydrostatique a pour objet l'analyse des forces dans un fluide sans écoulement (on le dit alors en équilibre mécanique, ou statique). Plus précisément, l'analyse porte sur la pression que subit le fluide. La mesure de ce phénomène se fait sur deux plans : on peut apprécier d'une part la pression absolue (mesurée par rapport au vide absolu) et d'autre part la pression relative (mesurée par rapport à la pression atmosphérique).

La manifestation la plus évidente de cette pression hydrostatique est la poussée à l'origine du théorème d'Archimède, selon lequel « tout



corps plongé dans un fluide subit une force verticale, dirigée de bas en haut et égale au poids du volume de fluide déplacé ». La statique des fluides étudie également la pression exercée par l'air ; ainsi on observe des

phénomènes tels que la décroissance de la pression atmosphérique avec l'altitude. L'hydrodynamique et l'aérodynamique quant à elles s'occupent des fluides en mouvement. Les écoulements ainsi considérés présentent un certain nombre de particularités : on étudie leur vitesse et leur débit, leur viscosité (résistance).

Fluides parfaits et fluides réels

Il faut en outre différencier les fluides dits « parfaits » et les fluides réels (parmi lesquels on trouve les fluides newtoniens). Les premiers sont des fluides non visqueux et se distinguent des fluides réels (donc visqueux) par leur comportement ; ils subissent uniquement une contrainte de pression et l'on n'observe au cours des écoulements aucune **turbulence**. Les fluides réels



en revanche présentent une viscosité plus ou moins forte, c'est-à-dire que les frottements qui se produisent lors des écoulements créent une résistance, d'intensité variable.

Viscosité, frottements, résistance

On peut définir la viscosité d'un fluide comme étant la résistance générée par les frottements, lors d'un écoulement. Le frottement issu du déplacement de deux couches de fluides est proportionnel à leur surface et à leur vitesse relative. L'ensemble des forces issu de l'écoulement est à l'origine du phénomène des pertes de charge.

Les écoulements

La rhéologie (science des écoulements) répertorie différentes natures d'écoulements. On les envisage tout d'abord du point de vue de leur compressibilité. Un fluide est dit compressible lorsque sa masse volumique est variable et incompressible lorsqu'elle est stable. Par ailleurs on étudie le régime d'écoulement, qui est dit laminaire ou turbulent. Dans le premier, le fluide suit un mode de déplacement sans agitation, en couches parallèles. Dans les écoulements laminaires, les frottements sont réduits et ne s'observent qu'à l'échelle de la molécule. Les molécules suivent des trajectoires simples et ne subissent que peu de variations ; dans ce type de mouvement, on observe des lignes de courant disposées en couches parallèles. À l'inverse,

l'écoulement turbulent présente un mouvement d'agitation aléatoire ; l'écoulement est désordonné, les molécules suivent des trajectoires complexes, les couches de fluide ayant alors tendance à se mélanger.

PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Compressibilité d'un fluide, masse volumique et pression

Parmi les propriétés des fluides, liquides ou gazeux, on distingue en premier lieu ce que l'on nomme la compressibilité. Ce terme désigne, en physique, la capacité d'un corps à changer de volume en fonction de la pression qu'il subit. Un fluide dont le volume ne subit que peu de variations lorsqu'une pression lui est appliquée est qualifié d'incompressible. Toutefois, en pratique, la plupart des fluides sont compressibles : la compressibilité des liquides est faible, celle des gaz beaucoup plus forte. La masse volumique d'un fluide se note ρ , et la pression P . Pour mesurer la compressibilité d'un fluide, on tient compte également de la température (θ). Un fluide incompressible présente une masse volumique indépendante de la pression mais également de la température.

Débit et vitesse d'un fluide

Le débit d'un fluide correspond à la quantité de fluide écoulee dans une période donnée. On distingue le débit massique (kg/seconde) et le débit volumique (m³/seconde). Le débit peut être déterminé, dans certains cas (écoulements laminaires), à partir de sa vitesse et de la section de la canalisation dans laquelle le fluide s'écoule. Il faut enfin noter que le débit d'un liquide

en régime permanent est identique en tous les points d'un écoulement, quelque soit la section du contenant — en revanche la vitesse varie en fonction de ce paramètre.

MÉTHODES EN MÉCANIQUE DES FLUIDES

CALCULS ET MESURES

Mesure de la pression en statique

Rappelons tout d'abord que les fluides, contrairement aux solides, n'ont pas de forme propre, mais épousent la forme de leur contenant, ils sont déformables. En statique, on mesure donc la pression qui s'exerce sur les fluides. On peut mesurer d'une part la pression absolue (définie par rapport au vide absolu) et d'autre part la pression relative (par rapport à la pression atmosphérique). Il s'agit en réalité de deux échelles différentes, le phénomène physique reste le même. La plupart du temps, on réalise une mesure de la pression relative. Il existe plusieurs unités de pression : le pascal (Pa), unité du système international, le bar (bar), le Torr (millimètre de mercure), le millimètre de colonne d'eau. Il existe une correspondance entre ces différentes unités, qui se note de la manière suivante :
1 bar = 1 000 mbar = 105 Pa
≈ 750 mm de mercure ≈ 10,2 mètres de colonne d'eau.
En ce qui concerne les instruments de mesure, il en existe deux types : les manomètres à tube en U (sur lesquels la mesure se fait par lecture de la différence de niveau dans les deux branches du tube), et les manomètres métalliques (dont le

rayon de courbure varie en fonction de la pression du liquide).

Mesures du débit et de la vitesse

La mesure du débit (Q) d'un fluide se fait selon la formule suivante : $Q = V \times S$, où V est la vitesse et S la section. La vitesse sera exprimée en mètre par seconde (m/s) et la section en mètres carrés (m²). Le débit s'exprime en m³/s. Pour mesurer un débit on utilise un débitmètre ; il en existe plusieurs sortes, le plus simple est le débitmètre à tube de Pitot, qui permet d'effectuer la mesure des pressions statique et totale, à partir desquelles on déduit la vitesse du fluide d'après la formule : $V = \sqrt{2(\Delta P / \rho)}$

Mesure de la viscosité

Avant d'étudier les méthodes qui permettent de la mesurer, il faut préciser que lorsqu'on parle de viscosité, on distingue :
• la viscosité dynamique (η), dont l'unité de mesure est le Pascal-seconde (Pa.s) ou encore le poiseuille (PI),
• et la viscosité cinématique (ν), qui se mesure en m²/s, et qui résulte du quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique. Ce rapport se note : $\nu = \eta / \rho$.
La mesure de la viscosité des fluides permet d'opérer une distinction entre différentes natures de fluides : dans le cas d'un fluide newtonien, la viscosité reste constante, quelque soit le taux de cisaillement (parmi les fluides newtoniens on trouve l'eau). Au cours de l'écoulement d'un fluide rhéofluidifiant, on observe que la viscosité diminue lorsque le taux de cisaillement augmente (la plupart des peintures murales appartiennent

Relâchez la pression

Fluide parfait

Se dit d'un fluide dont la viscosité est rigoureusement nulle.

Fluide réel

Se dit d'un fluide dont la viscosité n'est pas nulle.

1 bar

Pression qui règne à environ 10 mètres sous le niveau de la mer.

1 013 hPa

Pression atmosphérique au niveau de la mer.

1 kg

Masse d'un litre d'eau douce.

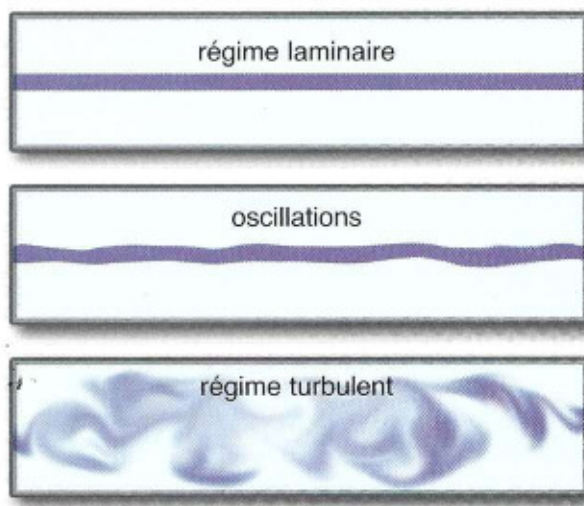
Environ 500 hPa

À 5 000 m d'altitude, la pression est deux fois moins élevée qu'au niveau de la mer (environ 1 013 hPa).

Plus de 1 015 hPa

La pression d'un anticyclone est supérieure à 1 015 hPa. Celle d'une dépression est inférieure à ce seuil.

Les écoulements



Archimède

ARCHIMÈDE DE SYRACUSE (III^e siècle av. J.-C.)



III^e siècle av. J.-C.

à cette catégorie). À l'inverse, si lorsque le taux de cisaillement augmente la viscosité suit le même mouvement, nous sommes en présence d'un fluide rhéopaisissant (en cuisine, une sauce à base de féculé est rhéopaisissante). L'appareil de mesure employé pour l'étude de la viscosité se nomme viscosimètre. Les deux modèles les plus courants sont les viscosimètres capillaires et les viscosimètres à cylindres rotatifs ou viscosimètres de Couette (du nom de celui qui les mit au point en 1890).

Conservation de l'énergie et pertes de charge

Comme nous l'avons vu précédemment, on observe lors d'un écoulement des frottements entre les différentes couches de liquide ; or ces frottements entraînent une production de chaleur, qui est une perte d'énergie pour le liquide : c'est ce que l'on appelle une perte de charge. Lorsque l'écoulement se fait dans une canalisation rectiligne et sans accident, on est en présence d'une perte de charge générale, due aux frottements. Si la canalisation présente des accidents (rétrécissement, élargissement, coude, vanne ou filtre), aux pertes



de charge générales viennent s'ajouter des pertes de charge singulières (ou locales) dues aux tourbillons générés par les accidents. Ces pertes de charge sont à prendre en compte dans l'étude expérimentale des

écoulements, et dans l'industrie on cherche à les réduire au maximum. Elles se calculent de la manière suivante : pour les pertes de charge générales, on observe la longueur de la canalisation, son diamètre et sa rugosité, ainsi que la viscosité du liquide et son débit. Les pertes de charge sont proportionnelles à ces éléments ; ainsi, plus la canalisation est longue, plus la perte de charge est importante. De la même manière, un liquide très visqueux entraîne des frottements importants donc une élévation de la perte de charge. En ce qui concerne les pertes de charge singulières, elles dépendent, de même que les pertes de charge générales, du diamètre de la canalisation (en l'occurrence de la variation de ce diamètre au niveau d'un coude ou d'une vanne) et du débit. Le calcul de la perte de charge se fait alors à partir de deux points encadrant l'accident.

HISTOIRE DE LA DISCIPLINE ET APPLICATIONS

UNE HISTOIRE DE LA MÉCANIQUE DES FLUIDES

Archimède et l'hydrostatique.

Poussée d'Archimède

On connaît peu les détails de la vie d'Archimède, mathématicien et physicien grec qui vécut à Syracuse entre 287 avant J.-C. et 212 avant J.-C., où il trouva la mort durant le siège de la ville par les Romains. Toutefois, on dispose de certains de ses traités de géométrie, et bon nombre d'historiens grecs et latins (Polybe, puis Tite-Live et Plutarque) témoignèrent de ses activités. Auteur de découvertes fondamentales en géométrie (calculs d'aires, introduction des exposants dans le système numérique grec), il est

également à l'origine de travaux en mécanique, plus particulièrement en hydrostatique. Il est le découvreur du principe qui porte son nom, selon lequel « tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé ». L'énoncé de cette loi, à la base de la statique des fluides, nous situe aux prémices de la mécanique des fluides. Elle concerne les solides plongés dans un liquide, son poids et les forces de pression qui s'exercent. La poussée d'Archimède est donc précisément la force, de sens opposé au poids, que le fluide exerce sur le solide. Lorsque l'on maintient un solide dans un liquide, on ne ressent que le poids apparent (la différence entre les deux forces) ; de ce phénomène on déduit la formule suivante : $P_a = P - A$, où P_a est le poids apparent, P le poids du solide et A la pression du fluide.

Les débuts de la mécanique des fluides

Un pas de géant dans la chronologie nous amène dans l'Europe du xiv^e siècle, où de nombreux scientifiques réalisent d'importantes découvertes en physique. Nous allons nous intéresser aux travaux d'**Isaac Newton**, bien



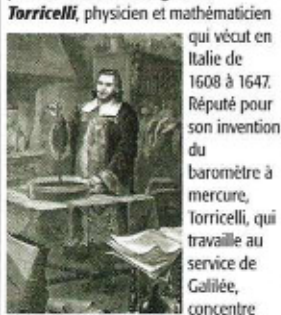
connu pour sa théorie sur la gravitation universelle. Il naquit en Angleterre en 1642, où il vécut et exerça en tant que physicien et mathématicien jusqu'en 1727, date de sa mort. Après des études au Trinity College de Cambridge, il poursuivit ses travaux, alors qu'une épidémie de peste sévit en Angleterre, en optique et en mathématiques ; il découvre notamment que la lumière blanche est composée d'une somme de lumières colorées. Il étudia par ailleurs les fonctions et les dérivées, ainsi que le calcul infinitésimal. Les résultats de ses travaux sont publiés en 1687 dans son traité *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. On y retrouve sa théorie de la gravitation universelle, selon laquelle les corps s'attirent avec une force inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Il y présente également ses réflexions sur les mouvements des fluides, posant ainsi les bases de la mécanique des fluides moderne.

L'un de ses contemporains français s'intéresse quant à lui à la pression et à l'hydrostatique : il s'agit de **Blaise Pascal**, homme de lettres et savant aux



multiples talents qui naquit à Clermont-Ferrand en 1623, et mourut prématurément à Paris en 1662. S'intéressant dès l'adolescence à la

géométrie, il met au point à l'âge de 19 ans une machine à calculer. Quelques années plus tard, il publie ses travaux sur la pression atmosphérique et les pressions dans les fluides dans son *Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs* (1648). Ses découvertes permettent notamment à la presse hydraulique de voir le jour. Préoccupé par le bien-être de ses concitoyens, il met son savoir au service du Duc de Roannez, gouverneur du Poitou, pour l'assèchement du marais poitevin. Les expériences menées par Pascal n'auraient peut-être pas eu un tel succès si elles n'avaient été inspirées par les travaux d'**Evangelista Torricelli**, physicien et mathématicien



qui vécut en Italie de 1608 à 1647. Réputé pour son invention du baromètre à mercure, Torricelli, qui travailla au service de Galilée, concentre en effet ses travaux sur les forces qui s'exercent en hydrostatique. Son invention correspond à une attente bien pragmatique des habitants de la Florence du xvi^e siècle : les besoins en eau de la ville sont importants, et il faut pouvoir la faire remonter du fleuve Arno. Confronté à ce problème d'ingénierie, Torricelli met au point un dispositif expérimental composé d'un tube de mercure renversé sur un bassin : le tube ne se vide pas complètement, il en déduit l'existence de deux forces qui se compensent, celle du fluide d'une part, et celle de l'air d'autre part, qu'il détermine comme étant la pression atmosphérique.

Maturité de la discipline

Le xvi^e siècle est décidément riche en découvertes dans le domaine de la mécanique des fluides. Cela est peut-être dû à la « pluridisciplinarité », si l'on peut dire, des scientifiques de l'époque, alors que les frontières entre les sciences sont peu marquées. Toujours est-il que **Daniel Bernoulli**, médecin



et mathématicien, marque à son tour l'histoire de la mécanique des fluides. Ce scientifique suisse est issu d'une famille de notables versés dans les mathématiques ; son oncle Jacques Bernoulli est ainsi à l'origine de la statistique moderne, et son père travaille à la résolution de problèmes de physique. Daniel Bernoulli publie quant à lui en 1738 un traité intitulé *Hydrodynamica*, dans lequel il exprime les résultats de ses travaux en cinétique des gaz. Un des théorèmes fondamentaux de la mécanique des fluides porte d'ailleurs son nom : le théorème de Bernoulli concerne la circulation d'un fluide dans un conduit, qui est supposé incompressible et parfait, il traduit le

phénomène de conservation de l'énergie dans un écoulement. La formule $\rho[(v^2)/2] + \rho g z + P = \text{constante}$ (où ρ est la masse volumique, v la vitesse du fluide, g la gravité terrestre, z la cote verticale du conduit et P la pression statique) signifie que la pression cinétique ajoutée à la pression de grandeur et à l'énergie de pression détermine la constante.

Cette formule illustre donc le théorème qui se résume ainsi : la somme des pressions et des énergies mécaniques par unité de volume est constante tout le long du tube de courant.

Bernoulli mène également des travaux avec **Leonhard Euler**, qui avait été



l'élève de son père Jean. Ayant suivi Daniel et Nicolas Bernoulli à la cour de Catherine I^{re} à Saint-Petersbourg, il obtient en 1730 une chaire de physique puis de mathématiques. Brillant mathématicien, il réalise également des recherches en physique, plus particulièrement en dynamique des fluides. Il énonce ainsi plusieurs lois, et met au point les équations générales de l'hydrodynamique (sur lesquelles se base le théorème de Bernoulli). En matière de rhéologie, le xix^e siècle est marqué par les travaux d'un autre scientifique, dont la contribution à la médecine est très importante : Jean-Louis Marie Poiseuille. Il naît à Paris en 1781, y fait ses études, d'abord à l'école Polytechnique puis en médecine. Sa première publication intervient en 1828, elle s'intitule *Recherches sur la force du cœur aortique*. Poiseuille est en effet un éminent physiologiste, il s'intéresse particulièrement à la tension (ou pression) artérielle et à la circulation sanguine. Il est ainsi à l'origine de l'élaboration de l'hémodynamomètre, qui permet d'envisager les changements de pression sanguine, et d'une loi qui porte son nom, qui permet de déterminer le débit d'un liquide : c'est la « loi de Poiseuille » ou loi d'écoulement laminaire des fluides visqueux. Son second ouvrage, dans lequel il exprime cette loi, s'intitule *Le mouvement des liquides dans les tubes de petit diamètre*. Notons que les travaux de Poiseuille sont à la base de l'hémodynamique (étude de la circulation sanguine), discipline de la médecine liée au diagnostic, entre autre, des affections cardio-vasculaires. Enfin, on ne saurait clore ce bref historique de la mécanique des fluides moderne sans évoquer les équations dites « de Navier-Stokes ». Henri Navier est un ingénieur français (1785-1835), Georges Stokes un physicien irlandais. À la suite de Bernoulli et Euler, Henri Navier travaille à la formulation des équations décrivant le mouvement des fluides. Bernoulli avait pris en compte dans ses calculs la pression et la vitesse, Navier y ajoute le paramètre viscosité. C'est ainsi que sont créées les équations de Navier-Stokes, qui permettent une description mathématique précise des écoulements de fluides.

Expérience de Torricelli

