



# Les fluides

### DES LIQUIDES ET DES GAZ

Il existe trois états de la matière : solide, liquide et gazeux. La matière solide est celle qui compose les objets ayant une forme propre : la pierre, le bois et le fer sont des solides. Certains systèmes doivent au contraire être enfermés dans un récipient pour avoir une forme, comme l'eau dans un verre ou



l'air dans un ballon : ce sont ce qu'on appelle des fluides. Les fluides rassemblent donc liquides et gaz. Les propriétés mécaniques et physiques des fluides qui nous entourent permettent d'expliquer des phénomènes aussi variés que la circulation sanguine, les éruptions volcaniques et certaines recettes de cuisine !

### PARAMÈTRES PHYSIQUES DES FLUIDES

Un corps n'est pas figé dans un état physique immuable. Par exemple, même si nous savons que la majeure partie de l'eau sur Terre est liquide, nous connaissons la vapeur et la glace et nous savons qu'en



modifiant la température nous pouvons transformer de l'eau liquide en eau solide ou gazeuse. La thermodynamique est la science qui étudie la réponse des corps aux changements des paramètres de leur environnement (température, pression).

### PRESSION ET TEMPÉRATURE

La pression exercée par un objet sur un autre est le quotient de la force par la surface de contact. Par exemple, si on pose un cube de rayon  $a$  et de masse  $M$  sur une plaque, la pression sur la plaque sera :  $P = mg/a^2$ . La notion de pression peut s'étendre aux fluides : la pression en un point  $A$  du fluide correspond à la pression qui s'exercerait sur un objet placé en ce point. La température d'un fluide est un

paramètre lié à l'agitation des molécules dont il est composé. Lorsqu'on fait varier la température d'un fluide ou sa pression (en général, les deux sont liées et il faut être dans des conditions bien particulières pour ne faire varier que l'un de ces deux paramètres), on peut aboutir à des changements d'état : transformer du liquide en gaz ou réciproquement, ou encore solidifier un fluide. La forme la plus dense de la matière est le solide, la moins dense est le gaz. Il est donc logique que si l'on comprime une certaine quantité de gaz (c'est-à-dire si on fait augmenter  $P$ ), on passe d'abord à l'état liquide puis solide.

La façon dont un corps répond à une variation de pression dépend de sa compressibilité. Considérons un petit volume de gaz : si la pression qui s'exerce sur lui augmente, son volume diminue d'autant plus que ce gaz est compressible. De même, il existe une grandeur appelée capacité calorifique qui quantifie la réponse d'un matériau à une variation de température. Un fluide à grande capacité calorifique peut absorber ou restituer une grande quantité d'énergie par échange thermique : ce sont de tels fluides qui circulent dans les climatiseurs.

De même, il existe une grandeur appelée capacité calorifique qui quantifie la réponse d'un matériau à une variation de température. Un fluide à grande capacité calorifique peut absorber ou restituer une grande quantité d'énergie par échange thermique : ce sont de tels fluides qui circulent dans les climatiseurs.

### STATIQUE DES FLUIDES

#### Loi de l'hydrostatique

Dans un champ de pesanteur, pour un fluide à l'équilibre, la pression est donnée par la loi de l'hydrostatique :  $P = P_0 + \rho g z$

où  $P$  est la pression au point considéré,  $P_0$  la pression à un endroit choisi comme référence (il s'agit souvent de la pression atmosphérique à la surface de la Terre),  $\rho$  la masse volumique du fluide,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $z$  la différence d'altitude entre le point où l'on calcule  $P$  et la référence. Cette relation découle du principe de Pascal : « Dans un fluide incompressible, en l'absence de forces extérieures, la pression  $P$  ne dépend que de la profondeur d'immersion. À la profondeur  $z$ , le fluide exerce sur le récipient une force surfacique de pression égale à  $P$  et dirigée vers l'extérieur du récipient, perpendiculairement à la paroi. »

On peut vérifier cette loi grâce à une expérience très simple : on remplit d'eau un tube vertical et on perce deux trous dans la paroi, à des hauteurs différentes. Des jets d'eau s'échappent par ces trous, et on observe que la vitesse est plus importante dans le jet du bas que dans celui du haut. En effet la vitesse du jet est proportionnelle à la

différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du tube. La pression extérieure est la pression atmosphérique  $P_0$ , tandis qu'à l'intérieur du tube, elle vaut  $P$  à la profondeur  $z$ . On peut vérifier en mesurant les débits que la différence de pression est proportionnelle à la profondeur.

### Poussée d'Archimède

ARCHIMÈDE est né à Syracuse (Sicile) vers 287 av. J.-C. et est mort vers 212 av. J.-C.



« Tout corps plongé dans un liquide subit de la part de celui-ci une force dirigée vers le haut et égale au poids du volume de liquide déplacé. » Cette loi bien connue est elle aussi une conséquence du principe de Pascal. Imaginons qu'on plonge à une profondeur  $z$  sous l'eau un cube de côté  $h$ . Le liquide exerce une pression sur toute la surface de ce cube. Comme celui-ci est symétrique, les forces de pression qui s'appliquent sur les parois latérales se compensent, mais la face supérieure subit une force vers le bas d'intensité  $h^2 P(z)$ , tandis que la face supérieure subit une force vers le haut d'intensité  $h^2 P(z+h)$ . Au total, cela se résume à une force dirigée vers le haut et d'intensité  $h^2 [P(z+h) - P(z)] = \rho g h^3$ , ce qui est égal au poids d'un cube d'eau de côté  $h$ .

De nombreux phénomènes s'expliquent grâce à la poussée d'Archimède : c'est grâce à elle par exemple qu'il est plus facile de nager dans l'eau de mer que dans l'eau douce. En effet, l'eau salée étant plus dense, elle exerce une poussée plus importante et l'effort musculaire à fournir pour se maintenir à la surface est diminué.

### DYNAMIQUE DES FLUIDES

Si les équations permettant de prédire l'écoulement d'un fluide sont complexes, elles ne dépendent souvent (dans le cas de fluides « simples », c'est-à-dire purs et composés de petites molécules) que de deux paramètres caractéristiques : la masse volumique et la viscosité.

### Masse volumique

La masse volumique, souvent notée  $\rho$ , quantifie la densité du corps considéré. Elle est plus faible pour les fluides que pour les solides car ces derniers sont plus denses. La masse volumique de l'eau est 1 kg/L, celle de l'air est 1 000 fois plus faible.

**La viscosité**  
La viscosité, symbolisée par la lettre  $\mu$ , caractérise l'importance des frottements dans le fluide. Dans un milieu visqueux (une huile par



exemple), les frottements sont plus importants que dans un milieu moins visqueux (de l'eau par exemple). Cela se traduit par une dissipation plus rapide de l'énergie : si on lâche une bille à la même vitesse dans un bain d'eau et dans un bain d'huile, le freinage sera plus important dans l'huile. Ce phénomène s'appelle dissipation visqueuse. La viscosité de l'eau vaut  $10^{-3}$  Pa.s, celle de l'air  $2.10^{-4}$  Pa.s et celle d'une huile végétale environ 0,1 Pa.s.

Une fois que l'on connaît  $\rho$  et  $\mu$ , il « suffit » de résoudre les équations de la mécanique des fluides pour connaître l'évolution future du fluide. Ces calculs sont cependant très compliqués et on ne sait résoudre de problème que dans des cas très simplifiés.

### APPLICATIONS À QUELQUES FLUIDES

#### L'ATMOSPHÈRE

La couche de gaz qui entoure une planète est appelée son

#### COMMENT VOLENT LES AVIONS ?

##### Forces aérodynamiques

Le fait que les avions peuvent se maintenir en altitude sans tomber est une conséquence des lois de la mécanique des fluides. C'est parce que l'avion avance qu'il tient en l'air ; il existe une force appelée portance, dirigée de bas en haut, qui s'exerce sur l'avion pendant son vol et qui croît avec la vitesse.  $P = 1/2 C_x \rho S V^2$  où  $C_x$  est un coefficient sans dimension qui dépend notamment du profil de l'aile,  $\rho$  est la densité de l'air,  $S$  la surface de l'aile, et  $V$  la vitesse de l'avion. Cette force est due au fait que la présence de l'avion perturbe l'écoulement de l'air et crée une dépression au-dessus de lui : il est donc poussé vers le haut.

##### Propulsion à réaction

La propulsion à réaction exploite elle aussi ces lois pour assurer la propulsion des appareils. L'air introduit dans le réacteur est mis sous pression par un compresseur, puis il arrive dans une chambre de

combustion où il est mis au contact du carburant. Celui-ci réagit avec l'oxygène de l'air comprimé (combustion). Il se forme alors des gaz très chauds sous pression, qui s'échappent à travers un conduit appelé tuyère d'éjection. Dans ce conduit leur pression diminue et en contrepartie ils gagnent de la vitesse. Ce jet est d'abord utilisé à l'intérieur du turbopropulseur, juste à la sortie de la chambre de combustion, pour entraîner une turbine qui entraîne à son tour le compresseur. Puis, et c'est le plus important, les gaz éjectés hors de la tuyère, exercent une poussée résultant du principe de l'action et de la réaction, qui a donné son nom à ce type d'avions. En effet, la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse, très élevée, des gaz éjectés) est transférée à l'aéronef, en quantité de mouvement égale, mais de sens opposé, selon le principe de l'action et de la réaction, d'où le nom de ce type de moteur.



atmosphère. Son équilibre, à basse altitude, est globalement hydrostatique : on en déduit que sa densité diminue avec l'altitude. En effet si l'on considère une couche suffisamment fine d'atmosphère, on peut supposer que la température y est constante. Alors la loi des gaz parfaits  $PV=nRT$  devient  $P=dRT$  où  $d$  est la densité de molécules dans l'atmosphère. Comme  $P$  diminue avec l'altitude, plus on s'élève, plus l'air se raréfie. C'est pourquoi on est plus vite essouffé à la montagne qu'au bord de la mer. La météorologie étudie le climat à court terme (une semaine environ). Cette science, qui s'appuie sur la mécanique des fluides, est complexe : pour avoir des prévisions exactes, il faudrait connaître les conditions de température et d'humidité en tout point du globe, la géométrie exacte des continents, tenir compte des courants d'air créés le moindre oiseau... Comme c'est évidemment impossible, les météorologues travaillent sur des modèles simplifiés, c'est pourquoi leurs prévisions ne sont valables que quelques jours.

La météorologie étudie le climat à court terme (une semaine environ). Cette science, qui s'appuie sur la mécanique des fluides, est complexe : pour avoir des prévisions exactes, il faudrait connaître les conditions de température et d'humidité en tout point du globe, la géométrie exacte des continents, tenir compte des courants d'air créés le moindre oiseau... Comme c'est évidemment impossible, les météorologues travaillent sur des modèles simplifiés, c'est pourquoi leurs prévisions ne sont valables que quelques jours.

#### L'HYDROSPHÈRE

• L'océan est un domaine d'études

### Viscosités

Bitume  
10<sup>8</sup>

Mélasse  
100

Miel  
1



Huile végétale  
0,1



Sang  
0,004 à 0,025

Jus de raisin  
0,002 à 0,005

Eau  
0,001



(Valeurs en Pa.s, à 20 °C et sous une pression atmosphérique)

L'eau



2/3  
de  
la masse  
corporelle

extrêmement riche. Bien sûr, décrire précisément le mouvement d'une telle **masse d'eau** est inimaginable, mais il



est important de connaître au moins les grandes lignes de la circulation marine car les courants océaniques ont une grande influence sur le climat. Ces courants sont en partie provoqués par la rotation de la Terre autour d'elle-même ; l'évolution des masses d'eau dépend également de leur salinité et de leurs températures, qui influent directement sur leur densité (plus l'eau océanique est salée et plus elle est dense). Des masses d'eau plus denses ont tendance à s'enfoncer sous les masses d'eau moins denses.

• L'eau liquide est aussi présente sur les continents sous la forme de cours d'eau. On distingue deux types d'écoulements dans les cours d'eau : le régime fluvial et le **régime torrentiel**.



Dans le régime fluvial, la vitesse est faible, l'eau transparente (si elle est propre) et la surface du cours d'eau lisse ; il n'y a pas de turbulence. Dans le régime torrentiel au contraire, l'écoulement est très agité, il y a de nombreux tourbillons, de l'écume (de la mousse qui rend l'eau opaque). Tous ces signes indiquent la présence de turbulence.

On peut observer la transition entre ces deux régimes à la maison, en ouvrant doucement un robinet : au début le jet est silencieux et transparent, puis, quand le débit augmente, il se trouble et un bruit caractéristique se fait entendre.

#### ROCHES ET LAVES

Il existe des écoulements de fluides naturels bien plus insolites que l'air ou l'eau : à grande échelle, les roches peuvent se comporter comme des fluides. C'est le cas dans le manteau, situé sous l'écorce terrestre. Les roches n'y sont pas immobiles les unes par rapport aux autres, ce qui serait le cas dans un solide, elles se déplacent. Ce mouvement, très lent (1 cm/an environ), est appelé convection mantellique.

Mais tous les écoulements géologiques



ne sont pas lents. Par exemple, lors de l'**éruption d'un volcan**, la lave peut

couler si vite qu'elle surprend et détruit des villes entières. Cela est possible car le réservoir du volcan est rempli de magma (mélange de roches fondues) sous pression. Lorsque cette pression devient trop importante, la lave jaillit du volcan comme l'eau gazeuse d'une bouteille qu'on a agitée.

#### FLUIDES BIOLOGIQUES

##### LE SANG

Les cellules de notre corps consomment certains produits (oxygène, sucres) et en rejettent d'autres. Le **sang** sert à transporter ces



différentes substances dans tout l'organisme.

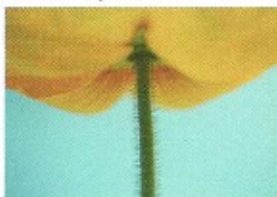
Il y a 3 types de vaisseaux : les artères, les veines et les capillaires.

Dans les artères, le sang circule des poumons vers les organes. Il s'agit d'un écoulement rapide dans des canaux de grande taille (1 mm), rythmé par les battements du cœur, dont le but est d'amener le plus rapidement possible l'oxygène vers les cellules. À mesure qu'elles arrivent dans les tissus, les artères se subdivisent en canaux de plus en plus petits. Les vaisseaux qui sont directement en contact avec les cellules sont les capillaires, ainsi nommés car leur diamètre est celui d'un cheveu (10 microns). Or le débit dans un tube cylindrique est donné par la loi de Poiseuille :

$Q = (\pi \Delta p d^4) / (128 \mu L)$  où  $d$  est le diamètre du tube,  $L$  la longueur,  $\Delta p$  la différence de pression entre les deux extrémités du tube et  $\mu$  la viscosité du fluide. Le débit d'un capillaire est très faible puisque  $d$  est très petit ; l'écoulement y est donc très lent, permettant la diffusion à travers la paroi : c'est au sein des capillaires qu'ont lieu les échanges vitaux.

##### LA SÈVE DES ARBRES

On a vu que d'après la loi de Poiseuille il fallait une différence de pression entre les deux extrémités d'un tube pour y faire circuler un fluide. Les plantes ont développé un mécanisme appelé évapotranspiration qui crée une différence de pression entre les feuilles



et les racines pour permettre à la sève de monter dans la **tige**.

Les canaux allant de la racine vers la feuille se terminent par un pore. Au soleil, l'eau s'évapore donc à cette extrémité du vaisseau. Cela crée une dépression au niveau de la feuille et la sève se trouve aspirée vers le haut. La

vitesse de montée de la sève peut atteindre 15 m/heure.

#### FLUIDES COMPLEXES

De nombreux fluides ne peuvent être décrits par les lois générales de la mécanique des fluides car leur masse volumique et leur viscosité ne sont pas constantes. Ces fluides « anormaux » (qui sont en fait très nombreux) se nomment fluides complexes. La science qui étudie leur comportement s'appelle la rhéologie. Elle a pour but de déterminer les variations de la viscosité en réponse à une force. Il s'agit d'une science essentiellement expérimentale : si on est capable de déterminer expérimentalement les variations de la viscosité, il n'existe pas encore de théorie générale qui permettrait d'obtenir directement ces lois.

##### CAOUTCHOUCS ET PLASTIQUES

Caoutchoucs et plastiques sont composés de polymères. Il s'agit de



l'association de petites molécules (monomères) formant de longues chaînes (les polymères). Par exemple, une chaîne de polyéthylène est composée de nombreuses molécules d'éthylène juxtaposées.

Les polymères obéissent à des lois physiques plus complexes que les corps purs, en particulier on ne les rencontre jamais à l'état de gaz, mais soit à l'état liquide, soit à l'état vitreux (chaînes bloquées). La plupart des polymères, ceux que nous appelons plastiques, sont rigides et cassants, sont à l'état vitreux à température ambiante. D'autres sont liquides même à température ambiante : les caoutchoucs et les adhésifs. Lorsqu'on étire un caoutchouc, les chaînes de polymères qui le composent glissent l'une par rapport à l'autre. Dans l'industrie on exploite la transition entre les deux régimes : on chauffe les polymères, on les met en forme à l'état

##### LES GRANUMAIRES

Le **sable** est formé de nombreux petits fragments de roche. Chaque grain est solide : on ne peut pas le déformer



facilement un appuyant dessus. Pourtant lorsqu'on remplit un seau de sable et qu'on le renverse, le sable coule comme le ferait un liquide. On dit que le sable est un milieu granulaire. On rencontre beaucoup de matières sous cette forme, notamment à la cuisine : le riz, le sucre, la semoule... que l'on mesure dans un verre lors qu'ils sont parfaitement secs.

fondu dans des moules, puis on les laisse durcir. Mais lorsqu'il n'est pas contrôlé, ce phénomène peut avoir des conséquences catastrophiques. Ainsi la **navette Challenger** a explosé lors de



son lancement en 1986 à cause d'une transition vitreuse non souhaitée. Le jour du décollage, il faisait très froid et les joints garantissant l'élasticité du réservoir se sont solidifiés, créant une fuite qui provoqua l'incendie de la navette.

##### GELS ET COUCHES-CULOTTES

Le but d'une couche-culotte est de piéger du liquide de façon étanche. Difficile, dans un récipient non fermé ! Il faut trouver un moyen d'empêcher le liquide de couler. Pour cela on le transforme en gel. Les gels que nous connaissons (la **gelée de fruits** ou le gel coiffant) sont des gels hydratés,



c'est-à-dire qu'ils sont composés presque exclusivement d'eau et d'un peu de gélifiant (qui n'est qu'un polymère soluble dans l'eau). Cela suffit pour qu'ils ne coulent pas. Au fond d'une couche il y a donc tout simplement un gélifiant déshydraté, qui absorbe le liquide. Il suffit d'une très petite quantité de produit pour absorber un grand volume, c'est ce qui explique l'efficacité des couches actuelles par rapport aux couches en tissu de nos grand-mères.

#### PROPRIÉTÉS DES SURFACES

##### MÉLANGES ET TENSION INTERFACIALE

On peut mélanger plusieurs fluides entre eux : certains se mélangent, comme l'eau et l'alcool, on dit alors qu'ils sont miscibles. D'autres se séparent en deux phases, comme l'eau et l'huile, ils sont immiscibles. Il existe une grandeur caractéristique de la miscibilité de deux fluides : c'est la tension interfaciale  $\gamma$ . Deux liquides immiscibles à l'équilibre choisissent une position qui minimise leur surface de contact. Si on les force à se mélanger en les agitant, on forme de petites gouttelettes d'un fluide dans l'autre, ce qui augmente la surface de contact. Pour cela il faut fournir une énergie mécanique  $E = \gamma \Delta A$ , où  $\Delta A$  correspond à l'augmentation de la surface de contact. Si l'on cesse d'agiter le mélange, les gouttelettes s'associent très vite pour reformer une nappe d'huile à la surface de l'eau. Si maintenant on agite le mélange eau-

#### PURQUOI METTRE DE LA MOUTARDE DANS LA VINAIGRETTE ?

Le vinaigre est une solution aqueuse d'acide acétique, c'est-à-dire de l'eau dans laquelle des molécules d'acide sont dissoutes. Mélanger de l'**huile et du vinaigre** revient donc à effectuer



un mélange eau-huile... ce qui est, comme on l'a vu, a priori impossible. Voilà pourquoi on met de la moutarde pour avoir une vinaigrette bien homogène : comme le savon, elle stabilise les gouttelettes en s'intercalant entre les deux fluides. Elle abaisse l'énergie de l'interface eau-huile. Comme l'eau et l'huile ne sont plus directement côte à côte, elles se repoussent moins violemment et l'émulsion peut durer plus longtemps. Cela ne veut pas dire que les deux fluides ne finiront pas par se séparer, mais cette séparation se fera sur un temps beaucoup plus long... plus long que le temps de manger la salade !

huile en y ajoutant du savon, on obtient un mélange stable d'aspect homogène : cela s'appelle une émulsion. Il s'agit toujours de gouttelettes réparties dans la solution, mais il n'y a plus de contact direct eau-huile : le savon s'est intercalé entre les deux. On dit que le savon abaisse la tension interfaciale entre l'eau et l'huile.

##### HYDROPHOBIE

Sur certaines surfaces, comme le fond d'une poêle en téflon, l'eau forme des gouttes presque rondes et s'étale très peu. On dit qu'une telle surface, généralement rugueuse, est hydrophobe (« qui n'aime pas l'eau » en grec). Il existe des surfaces naturellement hydrophobes, l'exemple le plus célèbre en est la **feuille de lotus**. Il peut être intéressant de rendre



une surface hydrophobe : le revêtement des tables des lycées et collées est étudié pour que l'encre n'y adhère pas, afin de limiter les tags. D'où vient l'hydrophobie ? Là encore il s'agit d'un phénomène de tension interfaciale : on appelle  $\gamma_{SL}$  la tension interfaciale entre le solide et le liquide. Pour créer une surface de contact d'aire  $A$  entre la goutte et son support il faut fournir une énergie  $\gamma_{SL} A$ . Si cette énergie est plus importante que l'énergie potentielle de pesanteur gagnée lorsque la goutte s'étale, c'est-à-dire si la goutte est très petite ou si  $\gamma_{SL}$  est très grand, alors la goutte minimise sa surface de contact avec le solide : elle reste sphérique.