

STATIQUE DES FLUIDES

- La statique des fluides concerne l'étude des fluides **au repos**, par exemple une étendue d'eau calme (mer, lac, piscine, etc.) ou encore l'atmosphère terrestre (par temps calme).
- On suppose dans toute la suite que l'étude est faite par rapport à un référentiel galiléen.

I. Définitions

Fluide

- Un fluide est un milieu matériel déformable et qui se répand dans l'espace qui lui est offert.
- L'état physique fluide est un état désordonné de la matière : les espèces chimiques (atomes, molécules, ...) se déplacent en permanence, du fait de l'agitation thermique.

Remarques :

- Dans toute la suite, le terme espèce chimique sera utilisé au sens d'atome, molécule, etc. ;
- Les liquides et les gaz sont des fluides ;
- Par opposition aux corps solides, les fluides n'ont pas de forme propre : ils peuvent s'écouler ou diffuser, épousant ainsi la forme du récipient qui les contient (= l'espace qui leur est offert).
- Malgré l'agitation thermique, le fluide peut être globalement au repos si la vitesse de son centre de masse est nulle en moyenne.

Particule fluide

On appelle particule fluide une partie du fluide dont le volume est :

- suffisamment petit à notre échelle pour être assimilé à un point,
- et suffisamment grand pour contenir un très grand nombre d'espèces chimiques.

Remarques :

- Un fluide peut ainsi être considéré à notre échelle comme un milieu continu composé de nombreuses particules fluides supposées ponctuelles.
- Le grand nombre d'espèces chimiques dans chaque particule fluide va permettre de définir des grandeurs physiques moyennes (comme la température) et ainsi caractériser le fluide en chacun de ses points.

Échelles physiques

Pour étudier la matière, les physiciens distinguent plusieurs échelles :

- l'échelle microscopique ou atomique est l'échelle de l'espèce chimique constituant la matière ($< 1 \text{ nm}$) ;
- l'échelle macroscopique est celle des objets courants ($> 0,1 \text{ mm}$) ;
- l'échelle mésoscopique est l'échelle des particules fluides (de l'ordre du μm), entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique.

Remarque : les valeurs $0,1 \text{ mm}$ et $1 \mu\text{m}$ ne sont données qu'à titre indicatif \Rightarrow ce sont des **ordres de grandeur**.

Rappels :

- micron : $1 \mu m = 10^{-6} m$.

II. Grandeurs microscopiques

- A l'échelle atomique, il est possible de définir des grandeurs comme la masse, la charge, la vitesse et l'énergie cinétique.
- Le nombre d'espèces chimiques constituant un fluide est toutefois beaucoup trop important pour qu'on puisse le décrire à cette échelle.
- En revanche, il est possible de définir des moyennes de ces grandeurs microscopiques sur un "petit" volume et d'obtenir ainsi des grandeurs macroscopiques caractérisant chaque point du fluide.

III. Grandeurs macroscopiques

1. Définitions et unités

Un fluide peut être caractérisé à notre échelle par :

- sa masse volumique ;
- sa température ;
- sa pression.

Chacune de ces grandeurs macroscopiques est liée à un aspect du comportement du fluide à l'échelle atomique :

- La **masse volumique** est liée au nombre d'atomes (ou de molécules) par unité de volume.
- La **température** est liée à l'agitation thermique des espèces chimiques.
- La **pression** est liée à la force que subit toute paroi en contact avec le fluide, à cause des innombrables chocs des espèces le constituant contre cette paroi.



La masse volumique

La masse volumique d'un fluide, souvent notée ρ ou μ (lettre grecque rhô ou mu), est la masse m de fluide par unité de volume V :

$$\rho \text{ ou } \mu = \frac{m}{V}$$

- Dans le **système international**, elle est exprimée en $kg.m^{-3}$.
- **Exemple** : la masse volumique de l'eau (liquide) est : $1000 kg.m^3$ dans les conditions normales de pression et de température.



La température

- Cette grandeur physique caractérise l'agitation thermique des espèces chimiques dans le fluide.
- Elle est directement liée à l'énergie cinétique moyenne de ces espèces (dans une particule fluide).
- Ainsi, plus l'agitation augmente plus la température est élevée.

- Dans le **système international**, l'unité de la température est le **kelvin**, notée K .
- Il est plus courant d'utiliser le degré Celsius noté $^{\circ}C$ qui est relié au kelvin par la formule :

$$Température(enK) = Température(en^{\circ}C) + 273,15$$

⚠ Force pressante / pression

- Pour rappel, les espèces chimiques d'un fluide ont un mouvement désordonné dû à l'agitation thermique.
- Si elles rencontrent une paroi, elles vont rebondir dessus et exercer une poussée sur la surface S de la paroi en contact avec le fluide.
- Le fluide va ainsi exercer une force moyenne sur la surface, appelée force pressante F .
- Dans le cas d'une surface plane, en contact avec un fluide au repos, la force pressante est :
 - ⇒ proportionnelle à la surface ;
 - ⇒ perpendiculaire à la surface ;
 - ⇒ dirigée du fluide vers la surface.
- Par définition, la pression P est la force pressante par unité de surface :

$$P = \frac{F}{S}$$

- Si la pression P est connue et uniforme sur une surface S on en déduit immédiatement la valeur de la force pressante F exercée par le fluide sur la surface :

$$F = P \times S$$

- Dans le **système international**, l'unité de pression est le pascal, notée Pa . Une pression de $1 Pa$ correspond à une force de $1 N$ répartie sur $1 m^2$, ce qui est très faible.

• Unités usuelles de pression :

- * le bar : $1 bar = 100\,000 Pa = 10^5 Pa$;
- * le millibar : $1 mbar = 100 Pa$;
- * l'hectopascal : $1 hPa = 100 Pa = 1 mbar$.

- La **pression atmosphérique normale** est de $101\,325 Pa \approx 1013 mbar \approx 1 bar$.

2. Application

a. Énoncé :

- Considérons l'atmosphère terrestre qui nous entoure. C'est un gaz composé d'un mélange de dioxygène (O_2) et de diazote (N_2) essentiellement.
- L'atmosphère est donc un fluide qu'il est possible de modéliser à notre échelle à l'aide des propriétés suivantes :
 - * masse volumique : $1,3 kg/m^3$;
 - * température : par ex. $15^\circ C$ ($288 K$) ;
 - * pression : $1 bar$ (en plaine).

Remarque :

- Ces valeurs peuvent évidemment dépendre du point considéré dans le fluide.
- Par exemple, dans le cas de l'atmosphère, la pression diminue avec l'altitude et la température varie d'une région à une autre.
- Toutefois si on considère un volume d'air réduit (air d'une salle par exemple) on pourra considérer que ces valeurs sont uniformes (c'est-à-dire les mêmes en chaque point du volume).

b. Action de la pression atmosphérique sur la eau :

- Calculons la force pressante exercée par l'atmosphère sur 1 cm^2 de peau (supposée plane) : la pression atmosphérique P_{atm} étant de l'ordre 1 bar sur toute la surface, on en déduit immédiatement que la surface S de la peau est soumise à une force pressante F dirigée vers l'intérieur du corps et de valeur :

$$F = p \times S = 100\,000 \times 0,01^2 = 10 \text{ N}$$

(attention aux **conversions** d'unité!)

- Cette force est donc de l'ordre de grandeur du poids d'un litre d'eau (masse de 1 kg), ce qui signifie que l'action de la pression atmosphérique sur notre peau revient à supporter 1 kg sur chaque cm^2 de celle-ci!

IV. Comportement des gaz : loi de Boyle-Mariotte)

1. Énoncé de la loi

- Les gaz sont des **fluides compressibles** ce qui signifie que leur volume diminue s'ils sont soumis à une pression extérieure.
- Pour des pressions n'excédant pas 10 bar , la plupart des gaz suivent une loi simple reliant volume et pression : la **loi de Boyle-Mariotte**.



Loi de Boyle-Mariotte

A température constante, le volume d'une masse gazeuse donnée est inversement proportionnel à la pression, ce qui s'écrit :

$$P \times V = \text{constante}$$

• **Interprétation :**

- * Cela signifie que si la pression double alors le volume diminue de moitié et inversement, si le volume double alors la pression baisse de moitié : on dit que la pression et le volume sont inversement proportionnels.
- * Plus généralement, si la pression est multipliée par n , le volume est divisé par n et inversement.

2. Application

a. Énoncé :

- Certains appareils respiratoires utilisés par les pompiers exploitent la loi de Boyle-Mariotte pour stocker une grande quantité d'air dans un petit volume, en augmentant la pression.
- Ainsi une bouteille de volume $V_1 = 9 \text{ L}$ d'air comprimé à une pression $P_1 = 200 \text{ bar}$ permet d'obtenir un volume V_2 d'air par détente à la pression atmosphérique $P_{atm} = 1 \text{ bar}$.

b. Détermination du volume V_2 :

- La loi de Boyle-Mariotte s'écrit alors, en supposant que la température de l'air reste constante :

$$P_1 \times V_1 = P_{atm} \times V_2$$

- On en déduit le volume :
$$V_2 = \frac{P_1 \times V_1}{P_{atm}} = \frac{200 \times 9}{1} = 1\,800 \text{ L}$$

200.

- Ainsi, le pompier qui porte la bouteille va pouvoir respirer 1 800 L d'air à 1 bar alors que la bouteille n'en contient que 9 L mais à une très grande pression : 200 bar !

V. Loi fondamentale de la statique des fluides

1. Énoncé de la loi

- Contrairement aux gaz, **les liquides sont incompressibles** : leur volume est indépendant de la pression.
- Ils suivent donc d'autres lois de comportement.



Loi de la statique des fluides

- Considérons un fluide immobile incompressible soumis à un champ de pesanteur uniforme g .
- La différence de pression entre deux points A et B du fluide s'écrit :

$$P_B - P_A = \rho \times g \times (z_A - z_B)$$

où

- * z_A est l'altitude de A ;
- * z_B est l'altitude de B ;
- * ρ est la masse volumique constante du fluide ;
- * g est l'accélération (ou intensité) de la pesanteur ;
- * l'axe (Oz) est orienté positivement vers le haut.

• Conséquences importantes :

* La pression est **identique** en tout point du liquide situé sur un **même plan horizontal** (c'est-à-dire à la même altitude) :

$$z_B = z_A \Rightarrow P_B = P_A$$

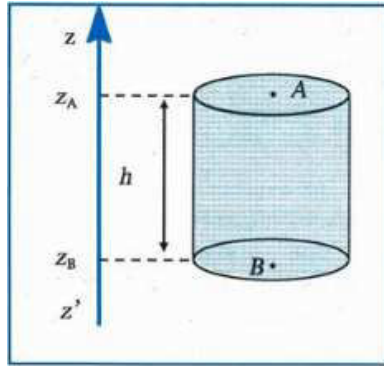
* D'autre part, dans un liquide immobile, la pression ne dépend que de la **profondeur (altitude)**, de la **masse volumique** et de **l'intensité de la pesanteur**. Elle ne dépend donc pas de la forme du récipient.

• **Remarque** : les conséquences de cette loi peuvent être parfois contre-intuitives (comme le montre notamment l'expérience du tonneau de Pascal).

2. Application

a. Énoncé :

- Dans un lac ou dans la mer / l'océan, la pression augmente avec la profondeur.
- Si on prend pour axe (z'/z) la verticale ascendante (= orientée vers le haut) et si l'altitude $z = 0$ correspond à la surface libre de l'étendue d'eau,
- On peut déterminer la pression à une profondeur de 10 m de la façon suivante :
 - * soit A un point de la surface : $z_A = 0$ met $P_A = P_{atm} = 1$ bar ;
 - * soit B un point à 10 m de profondeur : $z_B = -10$ m ;
 - * **Remarque importante** : l'altitude de B est **négative** car B est sous la surface et que le repère choisi



b. Appliquons la loi de la statique des fluides incompressibles à A et B :

$$P_B - P_A = \rho \times g \times (z_A - z_B)$$

$$\Leftrightarrow P_B - P_{atm} = \rho \times g \times (0 - (-10))$$

$$\Leftrightarrow P_B = P_{atm} + 10 \times \rho \times g$$

En prenant $\rho \approx 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ et $g \approx 10 \text{ m.s}^{-2}$, on trouve : $P_B = 200\,000 \text{ Pa} = 2 \text{ bar}$.

- Ainsi, à 10 m de profondeur dans l'eau, la pression est 2 fois plus forte qu'à la surface!