



Université Internationale
de Casablanca

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

Nous innovons pour votre réussite !

COURS

THERMODYNAMIQUE

APPLIQUEE

Filière **TC**

Session **S5**



RAPPELS: PARTIE 2

STATIQUE DES FLUIDES

Etats de la matière

Quand la matière passe d'un état à un autre on dit qu'il y a un **changement d'état**. Exemple : L'eau peut être un solide (glace), un liquide (mer), un gaz (vapeur)

Aspect macroscopique

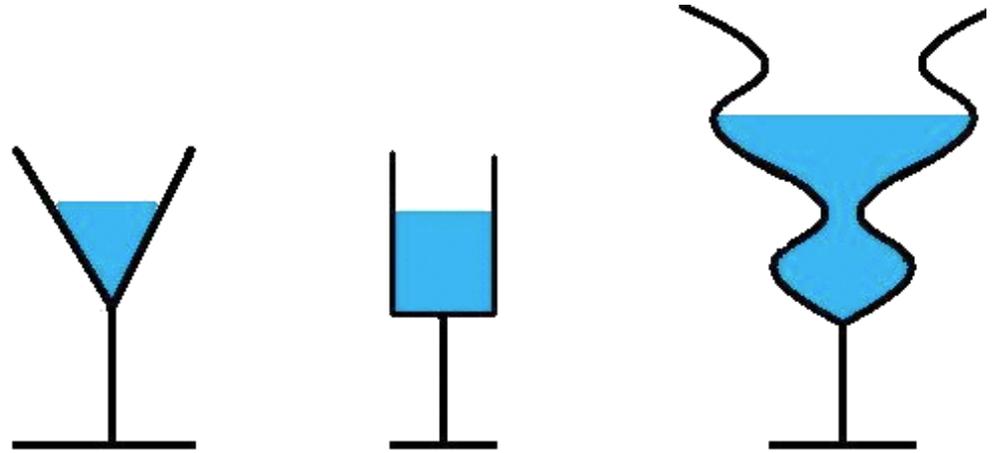
Un solide a une forme propre. Pour modifier cette forme, il faut exercer des forces importantes. Son volume est donc pratiquement **invariable**.



Etats de la matière

Quand la matière passe d'un état à un autre on dit qu'il y a un **changement d'état**. Exemple : L'eau peut être un solide (glace), un liquide (mer), un gaz (vapeur)

Aspect macroscopique



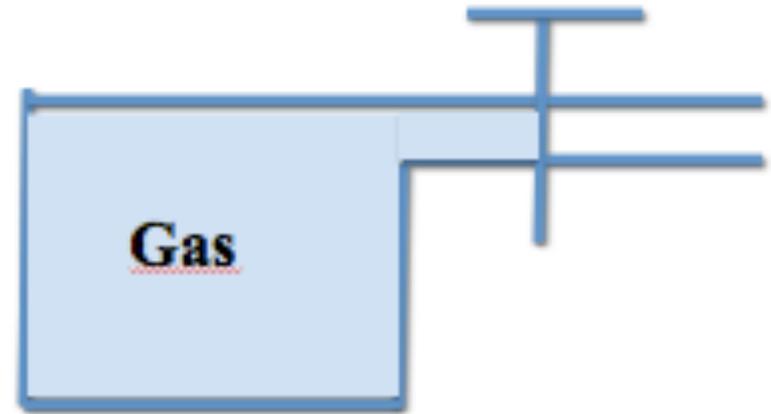
Un liquide n'a pas de forme propre. Il épouse exactement la forme du récipient qui le contient. Il possède une surface libre qui limite son volume vers le haut. Comme pour le solide, ce volume est pratiquement **invariable**.

Etats de la matière

Quand la matière passe d'un état à un autre on dit qu'il y a un **changement d'état**. Exemple : L'eau peut être un solide (glace), un liquide (mer), un gaz (vapeur)

Aspect macroscopique

Un gaz n'a ni forme propre ni volume propre. Il occupe tout le volume disponible, aussi grand soit-il. Un gaz est donc **expansible et compressible**.

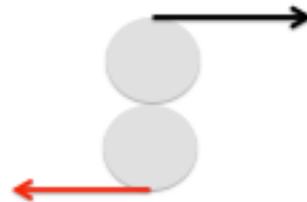


Les liquides et les gaz sont **des fluides**

Le fluide parfait

Un fluide réel, surtout un liquide, oppose une certaine résistance à l'écoulement : les particules glissent en frottant les unes sur les autres.

Frottement moléculaire dans le sens inverse du déplacement



Sens de l'écoulement des particules

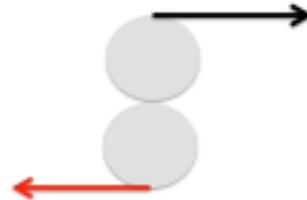
Le paramètre physique qui traduit l'existence de ces frottements s'appelle la **viscosité**. Il est la cause d'une perte d'énergie durant l'écoulement.

Les liquides et les gaz sont **des fluides**

Le fluide parfait

Un fluide réel, surtout un liquide, oppose une certaine résistance à l'écoulement : les particules glissent en frottant les unes sur les autres.

Frottement moléculaire dans le sens inverse du déplacement



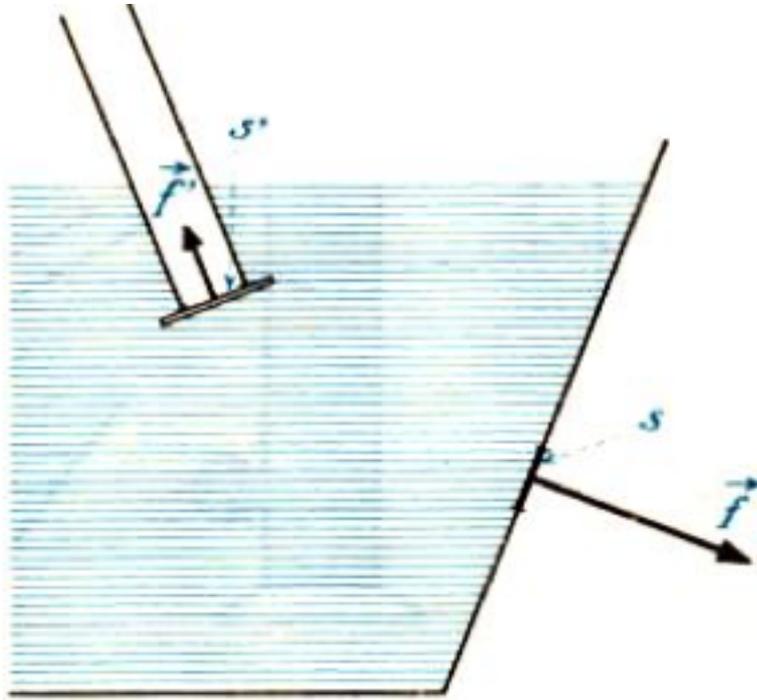
Sens de l'écoulement des particules

Le paramètre physique qui traduit l'existence de ces frottements s'appelle la **viscosité**. Il est la cause d'une perte d'énergie durant l'écoulement.

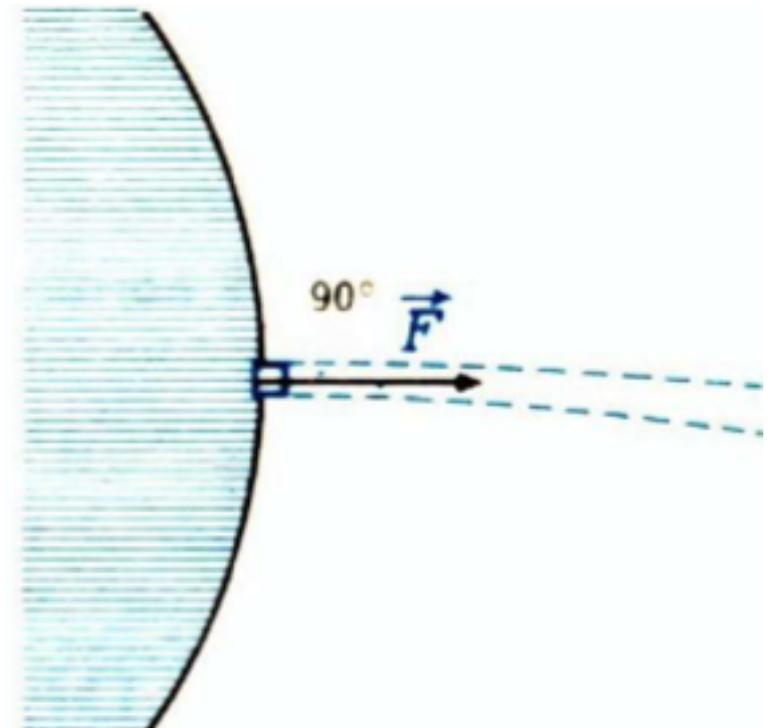
Un **fluide parfait** est un fluide non visqueux (écoulement sans frottement). C'est bien sûr un cas idéal

Dans un fluide en équilibre, il n'y a pas de forces de viscosité : la statique des fluides parfaits est équivalente à celle des fluides réels.

Notion de pression



Forces pressantes agissant sur des portions de surface immergées dans un fluide.



En franchissant le trou, l'eau s'écoule perpendiculairement à la paroi.

La force pressante exercée par un fluide en équilibre sur un élément de surface quelconque est normale à cet élément.

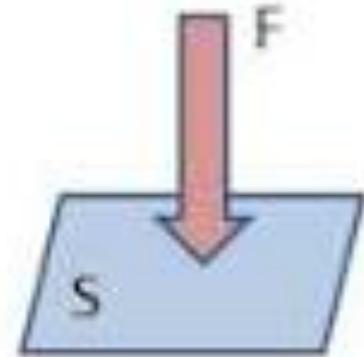
Notion de pression

Si la force pressante F est normale à la surface pressée S et s'exerce uniformément en chaque point de cette surface, la pression s'exprime comme

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

La pression est une grandeur scalaire.

p s'appelle aussi “pression hydrostatique”.



Notion de pression

Unités de mesure de la pression :

- Unité légale : **le Pascal** $1\text{Pa} = 1 \text{ Newton} / \text{m}^2$
(équivalente à une masse de 100 g sur une surface de 1 m², donc très petite)
- Un multiple: le bar: $1\text{bar} = 10^5 \text{ Pascal}$ (1mb=1hPa)
- Autres unités :
 - le mm Hg : $1 \text{ mm Hg} = 133,3 \text{ Pa}$
 - l'atmosphère : $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ mb} = 760 \text{ mm Hg}$

Notion de pression

Masse volumique d'un fluide

Un échantillon de fluide homogène de masse m et occupant un volume V possède la masse volumique

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{En kg/m}^3$$

Dépendance en pression et en température :

- **Liquide** (incompressible) : ρ ne dépend pratiquement que de la température T . En général, ρ diminue lorsque T augmente, puisque V augmente avec T
- **Gaz**: ρ dépend de T et de la pression p .

L'équation des gaz parfaits $PV = nRT$ associée à celle de la masse $m = nM$ donne

ρ augmente quand p augmente et diminue lorsque T augmente.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M}{R} \frac{p}{T} \propto \frac{p}{T}$$

Densité

- Liquide ou solide : quotient de la masse d'un volume V d'un corps à T sur la masse d'un même volume d'eau à 4°C .

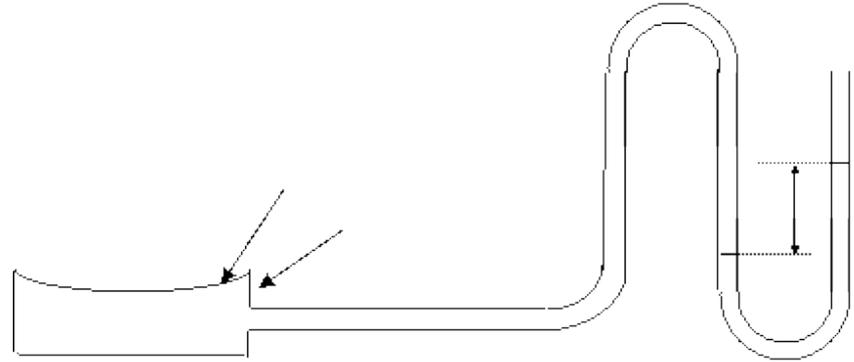
$$d = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

- Gaz : la référence est l'air dans les mêmes conditions de température et de pression

$$d_{gaz} = \frac{\rho(T, p)}{\rho_{air}(T, p)}$$

densité indépendante de T et p

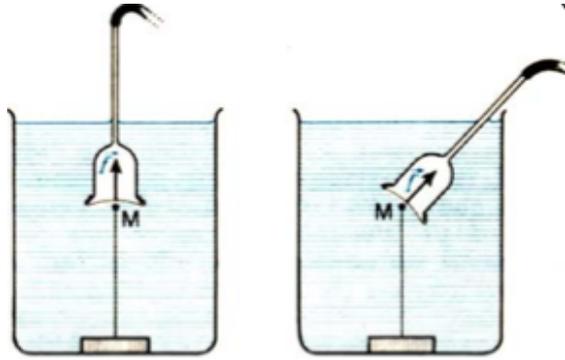
Quelques expériences simples



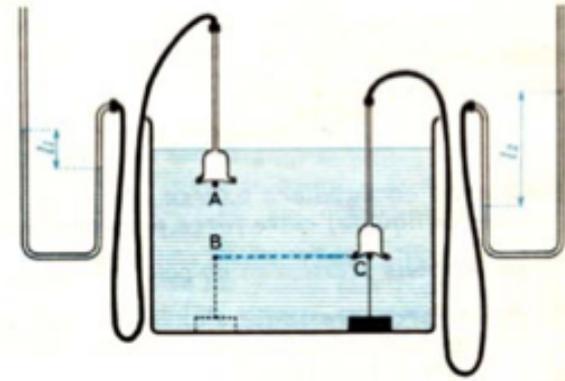
Capsule manométrique pour mesurer la pression dans un liquide

C'est un appareil qui permet de mesurer la pression dans les liquides. Il est composé d'un tube en U dans lequel se trouve un liquide coloré, d'un tube relié à une capsule manométrique. C'est une petite boîte sur laquelle est mise une membrane qui se déforme avec la pression.

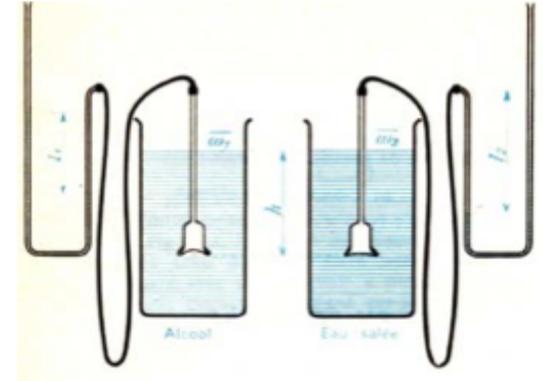
Statique des fluides



La pression ne dépend pas de l'orientation de la capsule

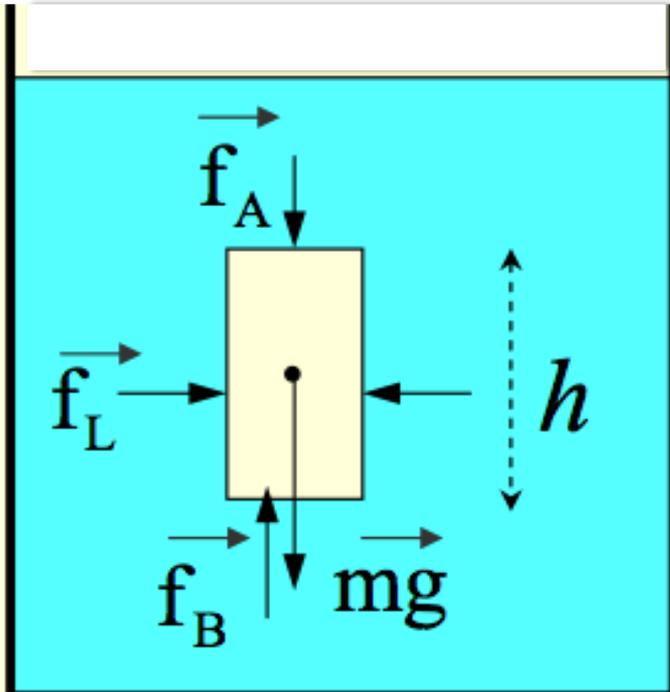


La pression augmente avec la profondeur d'immersion.



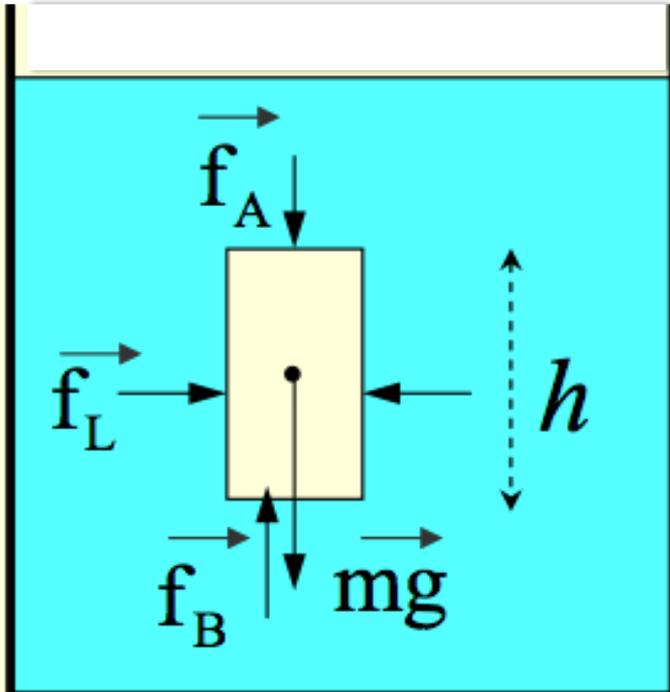
A profondeur identique, la pression augmente avec la masse volumique.

Le principe fondamental



Dans un fluide de masse volumique ρ , isolons un petit cylindre de hauteur $AB = h$, et de surface de base s . Le fluide est en équilibre, donc la somme des forces appliquées à ce cylindre est nulle. Ces forces sont : le poids mg , et les forces pressantes sur chacune des faces.

Le principe fondamental



l'équilibre du cylindre se traduit par

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$

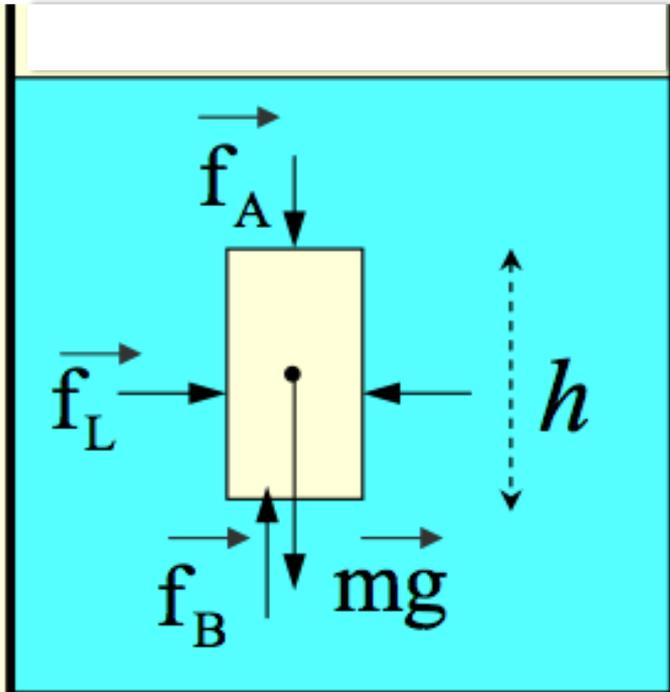
$$\vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_B = \vec{0}$$

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_B = \vec{0}$$

soit, après projection sur la verticale,

$$mg + F_A - F_B = 0$$

Le principe fondamental



$$mg + F_A - F_B = 0$$

Or $F_A = p_A S$ et $F_B = p_B S$

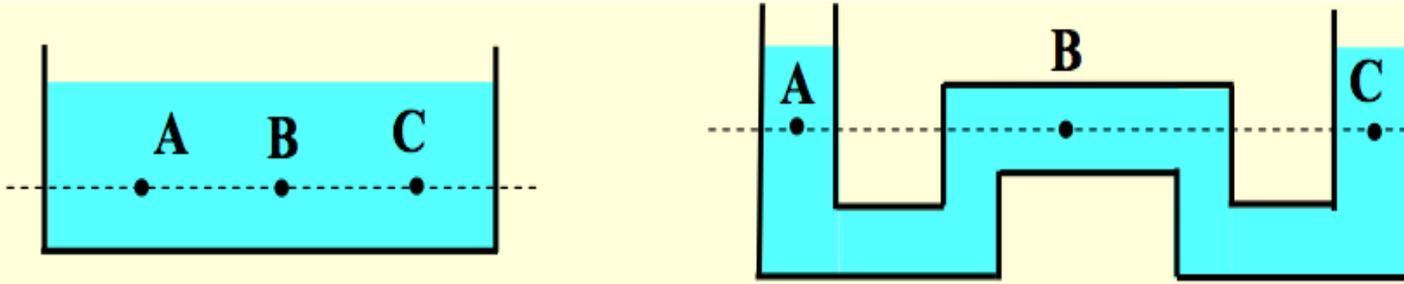
p_A et p_B étant les pressions existant respectivement au sommet et à la base du cylindre.

De plus $m = \rho.V = \rho.S.h$

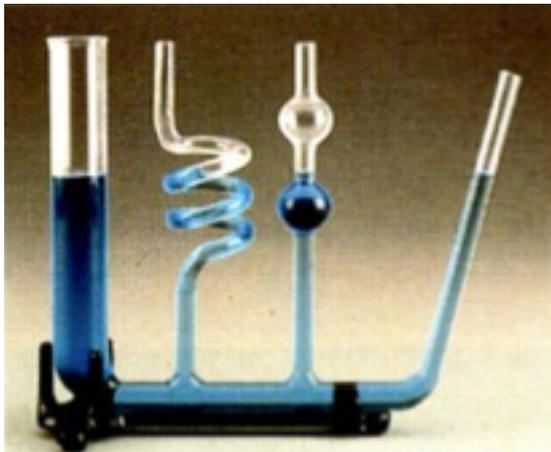
On obtient ainsi la relation très importante : $p_B - p_A = \rho.g.h$

La pression augmente donc avec la profondeur.

Conséquences du principe fondamental

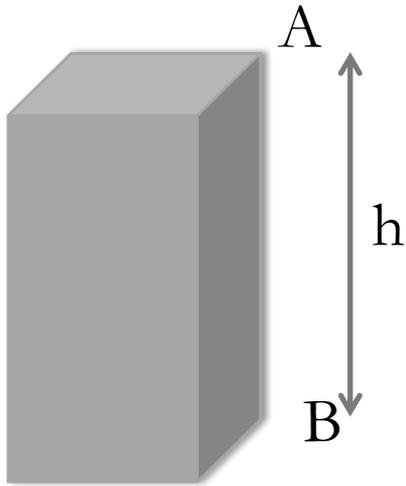


Tous les points d'un même fluide situés dans un même plan horizontal sont à la même **pression**, et ce **quelle que soit la forme du récipient**.



La surface libre d'un liquide, qui est le lieu des points à la même pression (vide ou pression atmosphérique), est un **plan horizontal**, et ce **quelle que soit la forme du récipient**.

Autre expression du principe fondamental :



Soit dans un fluide un volume de hauteur h et de surface de base S :

$$p_B = p_A + \rho \cdot g \cdot h$$

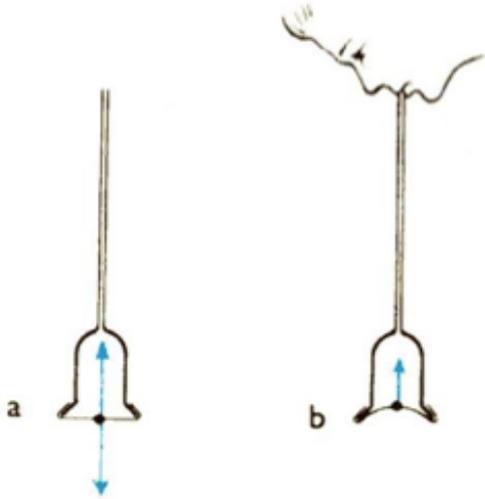
s'écrit aussi

$$p_B S = p_A S + \rho \cdot g \cdot h \cdot S = p_A S + mg$$

La pression en B est égale à celle existant en A augmentée du poids de la colonne de fluide de hauteur h et de section égale à l'unité de surface (1 m^2).

Application aux gaz : la pression atmosphérique

Existence de la pression atmosphérique :



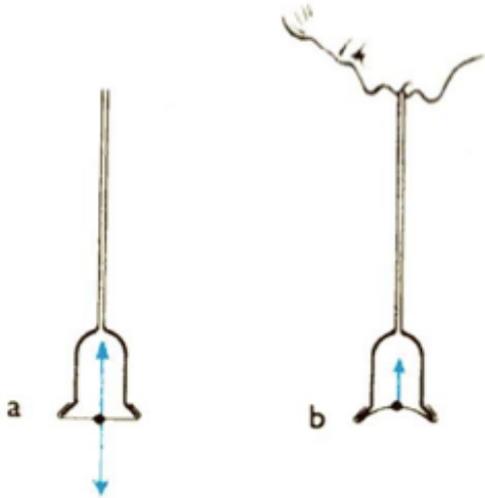
La membrane n'est pas déformée quand ses deux faces sont en contact avec l'air atmosphérique.

Si on raréfie l'air qui baigne sa face interne, la membrane se creuse, mettant ainsi en évidence la force pressante que l'air continue d'exercer sur sa face externe.

Cependant la masse volumique d'un gaz n'est pas constante. Le principe fondamental ne peut plus s'y appliquer entre deux niveaux quelconques, mais seulement sur de très faibles hauteurs. On montre que la pression dans le gaz augmente avec la profondeur, mais pas en suivant une loi linéaire comme dans un liquide

Application aux gaz : la pression atmosphérique

Existence de la pression atmosphérique :



La membrane n'est pas déformée quand ses deux faces sont en contact avec l'air atmosphérique.

Si on raréfie l'air qui baigne sa face interne, la membrane se creuse, mettant ainsi en évidence la force pressante que l'air continue d'exercer sur sa face externe.

La propriété vue pour les liquides est encore vraie pour un gaz :

La pression atmosphérique au niveau du sol est égale au poids de la colonne d'air contenu dans un volume de surface de base égale à l'unité (1 m^2) et de hauteur très grande (100 km).

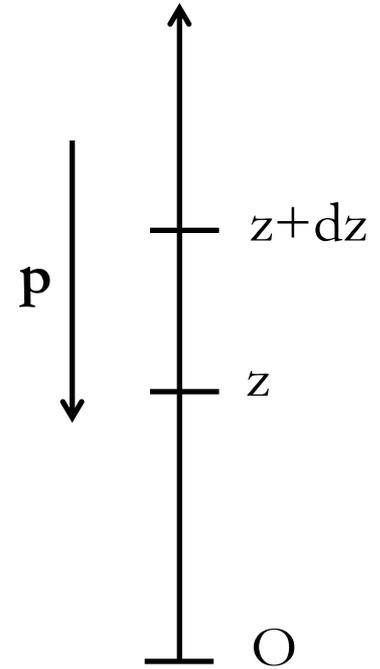
La pression atmosphérique au sol vaut en moyenne 1013 mb (1 atmosphère) et subit des variations notables selon le climat

Pression en un point quelconque de l'atmosphère :

Expression différentielle du principe fondamental :

Si l'on oriente vers le haut un axe vertical \mathbf{Oz} , et que l'on considère une différence de niveaux comprise entre les altitudes z et $z + dz$, la variation de pression (négative) :

$$dp = p(z + dz) - p(z) = -\rho(z)g(z)dz$$



Hypothèses

- L'air obéit à la loi des gaz parfaits ($pV = nRT$).
- La température \mathbf{T} de l'air ne varie pas avec l'altitude (atmosphère isotherme à $\mathbf{T}_0 = 273 \text{ K}$).
- L'accélération de la pesanteur g est constante (vrai à 1% près jusqu'à $h = 30 \text{ km}$)

Statique des fluides

Pression en un point quelconque de l'atmosphère :

Expression différentielle du principe fondamental :

$$pV = nRT$$

avec $n = m / M$ donne
$$p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} = \rho \frac{RT}{M}$$

avec

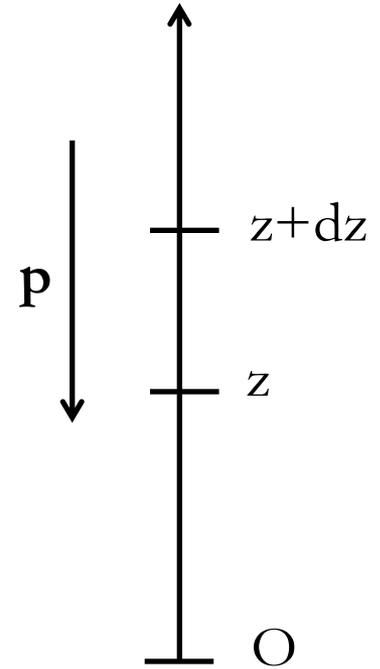
V : volume de gaz à la pression p ;

$M \approx 29$ g : masse molaire ;

$T = 273$ K : température ;

$R = 8,32$ S.I. : constante des gaz parfaits ;

ρ : masse volumique).



Statique des fluides

Pression en un point quelconque de l'atmosphère :

Expression différentielle du principe fondamental :

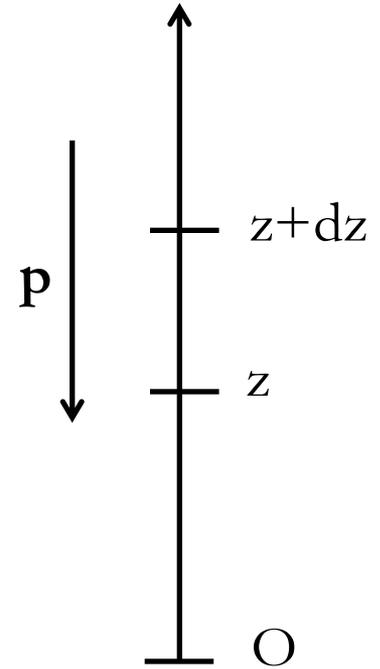
$$dp = -\rho g dz \quad \text{donne}$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dz = -\frac{dz}{H}$$

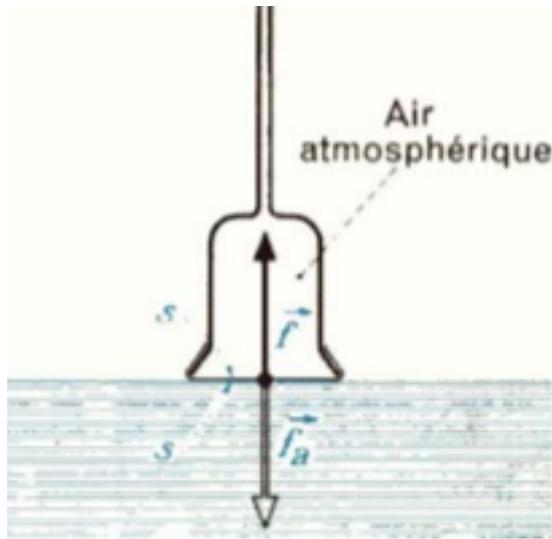
Avec $H = \frac{RT}{Mg} \approx 8km$

Soit

$$\int_{P_{atm}}^p \frac{dp}{p} = -\int_0^z \frac{dz}{H} \Rightarrow \ln\left(\frac{p}{P_{atm}}\right) = -\frac{z}{H} \Rightarrow p(z) = P_{atm} \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$



Pression absolue dans un liquide :



Plaçons la membrane de la capsule manométrique sur la surface libre d'un liquide de façon que sa face externe, *en contact avec le liquide*, soit confondue avec une portion de cette surface. La membrane ne subit aucune déformation, donc ses deux faces sont à la même pression :

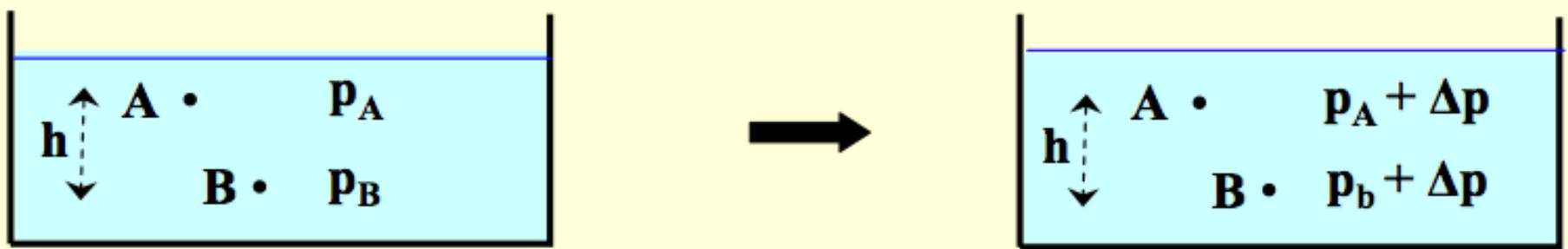
La pression à la surface libre d'un liquide exposé à l'air est égale à la pression atmosphérique.

Il s'ensuit qu'à la profondeur h sous la surface du liquide, la pression est

$$p = p_{atm} + \rho gh$$

p s'appelle "pression absolue" (ρgh est la pression manométrique ou hydrostatique). p augmente d'environ 1 atmosphère tous les 10 m.

Théorème de Pascal (1628-1662) ::



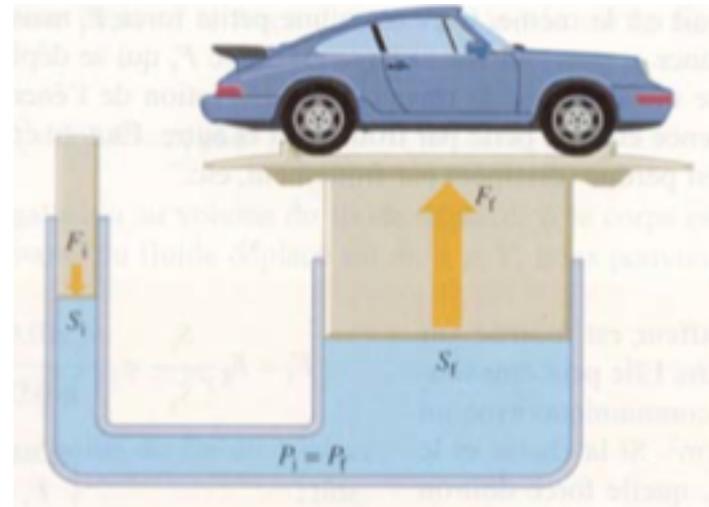
Soit dans un liquide homogène deux points quelconques A et B, distants verticalement de la profondeur h . La différence de pression entre eux est ρgh . Augmentons, par un procédé approprié, la pression en A de la quantité Δp : comme le liquide est pratiquement incompressible, cette variation de pression ne modifie pas son volume : la masse volumique ρ et, par conséquent, la quantité ρgh , restent inchangés. Il s'ensuit que la pression en B augmente aussi de Δp . D'où l'énoncé du théorème :

Tout liquide en équilibre transmet intégralement et en tous ses points une variation de pression imposée en l'un quelconque de ces points.

Théorème de Pascal (1628-1662) ::

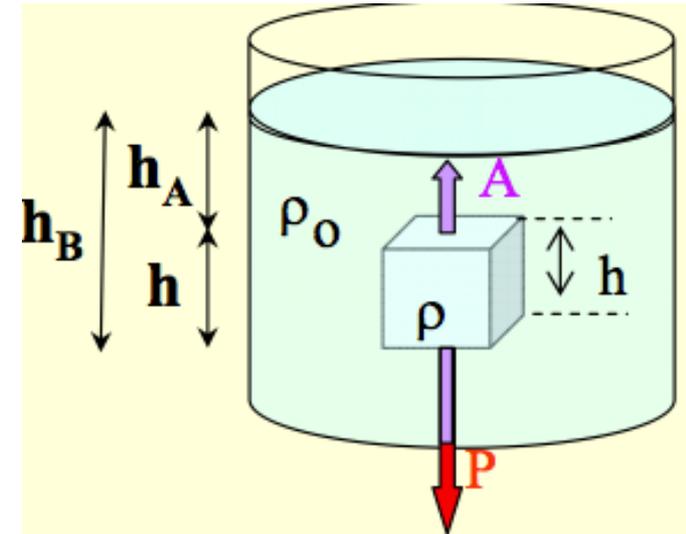
Application : vérin hydraulique

La force exercée sur le petit piston crée une surpression qui est intégralement transmise au gros piston. Le rapport des forces est égal au rapport des surfaces des cylindres correspondants : la force engendrée dans le gros piston peut être très importante et permet de soulever des charges très lourdes.



Théorème d'Archimède (250 ans avant JC) :

Soit un objet cubique de volume V et de masse volumique ρ immergé dans un fluide de masse volumique ρ_0



Les forces qui s'exercent sur cet objet sont

- Le poids \mathbf{P} de norme $\rho V g$;
- Des forces de pression hydrostatique sur les parois horizontales de l'objet (résultante nulle sur les parois verticales) :

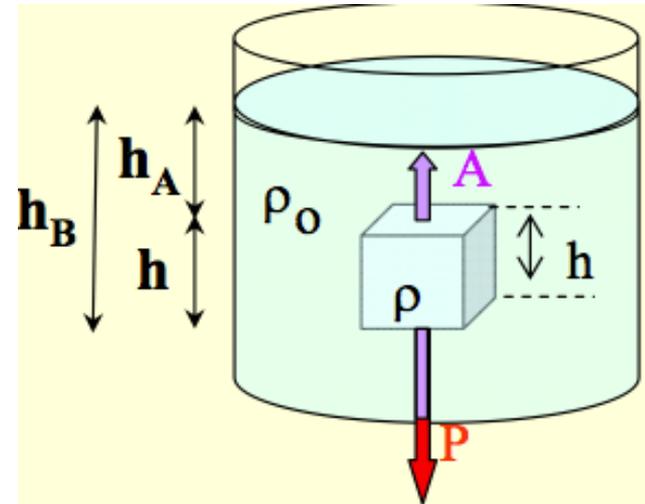
$$f_a = S(P_{atm} + \rho_0 g h_a) \quad \text{descendante sur la face supérieure } \mathbf{S}_a ;$$

$$f_b = S(P_{atm} + \rho_0 g h_b) \quad \text{ascendante sur la face inférieure } \mathbf{S}_b, \text{ et avec } f_b > f_a .$$

Théorème d'Archimède (250 ans avant JC) :

La résultante des forces de pression verticales est donc ascendante et a pour norme

$$A = f_b - f_a = S\rho_0 g (h_b - h_a) = \rho_0 Vg$$



La quantité $\rho_0 V$ représente la masse du fluide **qui occupe le même volume que l'objet**. L'objet a désormais un poids *apparent*, de norme

$$P_{app} = (\rho - \rho_0) Vg$$

La poussée exercée sur un objet par un fluide en équilibre est égale au poids du fluide déplacé. Elle est de sens opposé au poids et son support passe par le centre de gravité du fluide déplacé. On peut considérer que le point d'application de cette poussée est au centre de gravité du fluide déplacé (ce point est appelé centre de poussée).

Mesure des pressions:

- **Manomètres** dans le cas général.
- **Baromètres** s'il s'agit de mesurer la pression atmosphérique.

Le baromètre de Torricelli (ou baromètre à mercure, 1643)

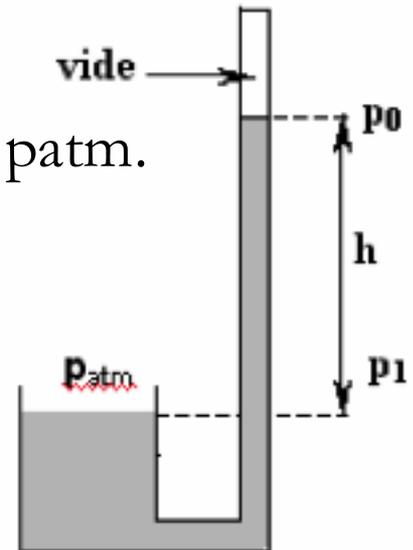
Dans la colonne de mercure on a: $p_1 - p_0 = \rho gh$

Or $p_0 = 0$, et d'après le principe de l'hydrostatique $p_1 = p_{atm}$.

$$\Rightarrow p_{atm} = \rho_{Hg}gh \quad \text{et} \quad h = \frac{p_{atm}}{\rho_{Hg}g}$$

Puisque $\rho_{Hg} \sim 13600 \text{ kg/m}^3$, la pression atmosphérique normale ($1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) correspond à une hauteur de colonne de mercure

$$h = \frac{1.013 \times 10^5}{13600 \times 9.81} = 0.76 \text{ m} = 760 \text{ mm}$$



Statique des fluides

Mesure des pressions:

- **Manomètres** dans le cas général.
- **Baromètres** s'il s'agit de mesurer la pression atmosphérique.

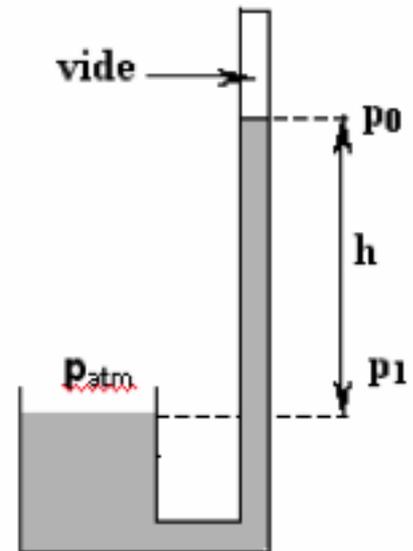
Le baromètre de Torricelli (ou baromètre à mercure, 1643)

$$h = \frac{1.013 \times 10^5}{13600 \times 9.81} = 0.76m = 760mm$$

La pression de 1 atm correspond donc à 760 mm Hg.

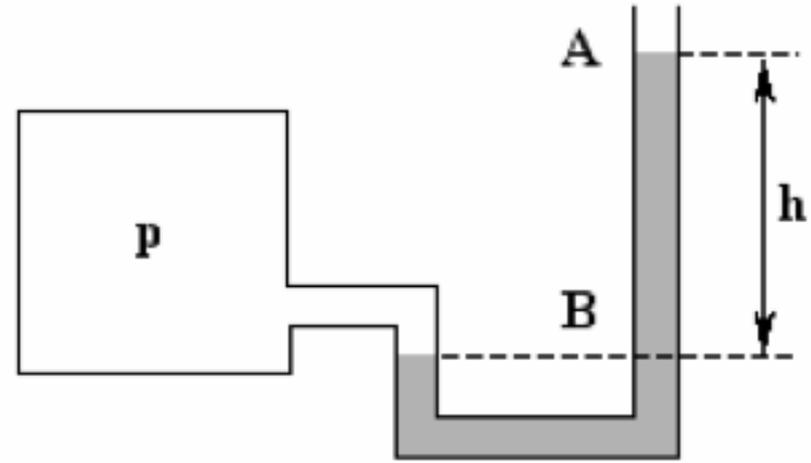
- **Remarque 1 :** On utilise souvent en médecine le **Torr** qui correspond à 1mm Hg.
- **Remarque 2 :** Si on remplaçait la colonne de mercure par une colonne d'eau (masse volumique $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$), celle-ci aurait une hauteur

$$h = \frac{1.013 \times 10^5}{1000 \times 9.81} \approx 10m$$



Le manomètre à liquide

Tube en U contenant un liquide de masse volumique ρ connue (eau, huile, ou mercure pour pressions élevées) Mesure de la pression p d'un gaz ou d'un autre liquide (non miscible avec celui du tube).



L'ouverture A du tube est à la pression p_{atm} , l'autre à la pression p . Il s'agit d'exprimer p en fonction de h :

A l'intérieur du liquide, le point B est à la pression p .

$$p_B - p_A = \rho g h \Rightarrow p = p_{atm} + \rho g h$$

La grandeur $\rho g h$ s'appelle la pression manométrique ou pression de jauge

APPLICATIONS: Mesure de la pression des pneus; Mesure de la tension artérielle