

**FILIERE : AGROBIOLOGIQUE**  
**Module : Physique Industrielle et**  
**Appliquée & statistiques.**

**ELEMENT : Physique Industrielle et**  
**Appliquée.**

# Chapitre I

## STATIQUE DES FLUIDES

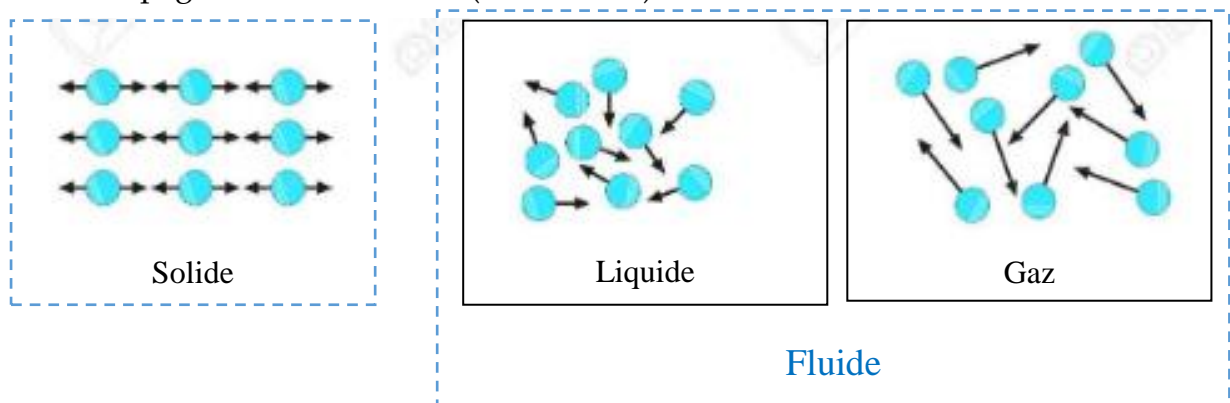
### Introduction

On appelle fluide un corps qui n'a pas de forme propre et qui est facilement déformable. Les liquides et les gaz sont des fluides, ainsi que des corps plus complexes tels que les polymères ou les fluides alimentaires. Ils se déforment et s'écoulent facilement. Un fluide englobe principalement deux états physiques : l'état gazeux et l'état liquide.

#### ➤ **Liquides et gaz**

Les liquides et gaz habituellement étudiés sont isotropes, mobiles et visqueux. La propriété physique qui permet de faire la différence entre les deux est la compressibilité.

- l'isotropie assure que les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.
- la mobilité fait qu'ils n'ont pas de forme propre et qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient.
- la viscosité caractérise le fait que tout changement de forme d'un fluide réel s'accompagne d'une résistance (frottements)



#### **Forces de volume et forces de surface**

Comme tout problème de mécanique, la résolution d'un problème de mécanique des

fluides passe par la définition du système matériel S, particules de fluide à l'intérieur d'une surface fermée limitant S. À ce système on applique les principes et théorèmes généraux de mécanique et thermodynamique :

- principe de la conservation de la masse.
- principe fondamental de la dynamique.
- principe de la conservation de l'énergie.

## I. Définition du fluide parfait et statique des fluides

### 1- Fluide parfait

En mécanique des fluides, un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de viscosité et de conduction thermique (Pas de frottements ni du fluide sur la paroi, ni du fluide sur lui-même et Pas d'échange thermique). Le mouvement du fluide est donc adiabatique.

### 2- statique des fluides

La statique des fluides est la branche de la mécanique des fluides qui traite principalement les fluides au repos. L'étude des propriétés des fluides au repos constitue la statique des fluides.

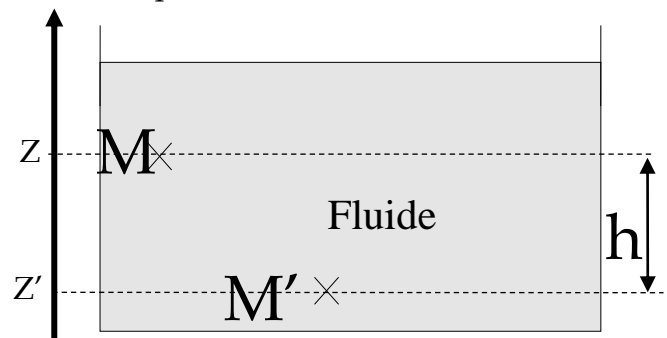
## II. Variation de la pression à l'intérieur d'un fluide en équilibre

Deux points M et M' (de côtes Z et Z') situés à l'intérieur d'un fluide sont entourés de surfaces élémentaires dS et dS' sur lesquelles s'exercent les pressions P et P'. Du fait du champ de pesanteur g on déduit la relation:

$$P - P' = \rho g (Z' - Z)$$

$\rho$ : est la masse volumique du fluide considéré.  
Cette relation s'écrit aussi, pour n'importe quel point du fluide:

$$P + \rho g z = \text{cte}$$



### Application d'un manomètre U.

Soit un tube en U fermé à une extrémité qui contient deux liquides non miscibles.

Entre les surfaces :

- (1) et (2) il s'agit de l'essence de masse volumique

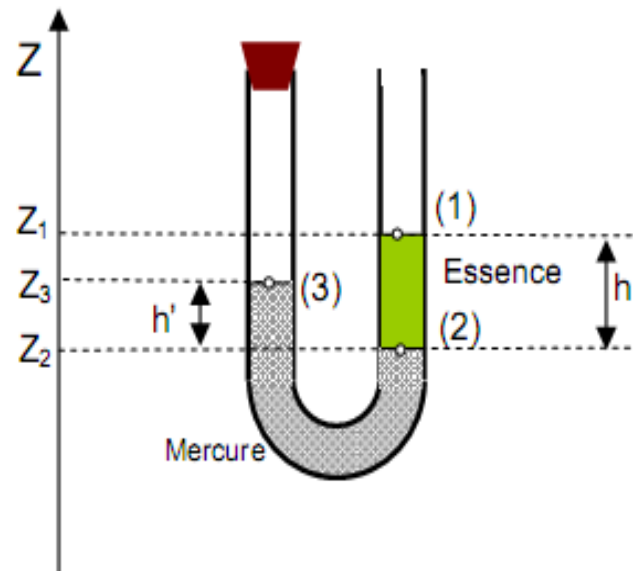
$$\rho_{\text{essence}} = 700 \text{ kg/m}^3.$$

- (2) et (3), il s'agit du mercure de masse volumique

$$\rho_{\text{mercure}} = 13600 \text{ kg/m}^3.$$

La pression au-dessus de la surface libre (1) est

$$P_1 = P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}.$$



L'accélération de la pesanteur est  $g=9,8\text{m/s}^2$ .

$h = (Z_1 - Z_2) = 728 \text{ mm}$  et  $h' = (Z_3 - Z_2) = 15 \text{ mm}$ .

La branche fermée emprisonne un gaz à une pression  $P_3$ .

- 1- Calculer la valeur de la pression  $P_2$
- 2- Calculer la valeur de la pression  $P_3$ .

### Solution

- 1- Etude de l'essence

On a  $P_2 - P_1 = \rho_{\text{essence}} \cdot g (Z_1 - Z_2)$

Donc  $P_2 = P_1 + \rho_{\text{essence}} g (Z_1 - Z_2)$  et on  $h = (Z_1 - Z_2)$

Donc  $P_2 = P_1 + \rho_{\text{essence}} g \cdot h$

A.N :  $P_2 = 1.10^5 + 700.9,8.0,728 = 1,05.10^5 \text{ Pa}$

$$P_2 = 1,05.10^5 \text{ Pa}$$

- 2- Etude du mercure

On a  $P_3 - P_2 = \rho_{\text{mercure}} \cdot g (Z_2 - Z_3)$

Donc  $P_3 = P_2 + \rho_{\text{mercure}} g (Z_2 - Z_3)$  et on  $h' = (Z_2 - Z_3)$

Donc  $P_3 = P_2 - \rho_{\text{mercure}} g \cdot h'$

A.N :  $P_3 = 1,05.10^5 - 13600.9,8.0,015 = 1,03.10^5 \text{ Pa}$

$$P_3 = 1,03.10^5 \text{ Pa}$$

## III. Théorème de Pascal

Il résulte de la relation précédente:

“Dans un fluide incompressible ( $\rho = \text{constante}$ ), en équilibre, toute augmentation de pression produite en un point se transmet intégralement à tous les points du fluide”.

**Exemple d'application:** le principe d'une presse hydraulique

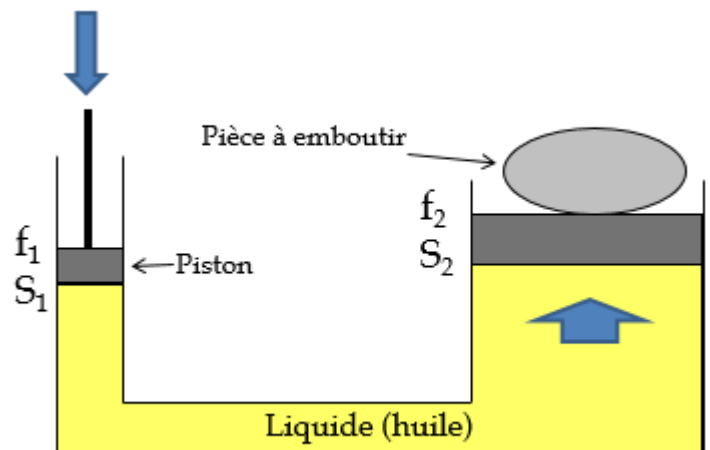
Toute force  $f_1$  exercée sur le petit piston, produit une augmentation de pression, égale à:  $\Delta p = f_1 / S_1$  qui est transmise au niveau du piston de surface  $S_2$ . Le piston de surface  $S_2$  est alors soumis à une force  $f_2$  telle que:

$$\Delta P_1 = f_1 / S_1$$

$$\Delta P_2 = f_2 / S_2$$

Et on a  $\Delta P_1 = \Delta P_2$  donc  $f_1 / S_1 = f_2 / S_2$

$$f_2 = f_1 \cdot S_2 / S_1$$



#### IV. Equation générale de la statique des fluides

Si le fluide n'est pas soumis seulement au champ de pesanteur  $g$  (par exemple lorsqu'il est en équilibre dans un référentiel tournant, il faut ajouter le champ dont l'accélération est centrifuge) on peut généraliser l'équation d'équilibre précédente et on l'écrit en chaque point du fluide sous la forme:

$$\vec{\text{grad}}(P) = \rho \cdot \vec{g}$$

qui donne la variation de pression en chaque point en fonction du champ de forces total d'accélération  $\vec{g}$ .

Cette équation est utilisée notamment pour déterminer, à l'intérieur du fluide, les surfaces qui subissent la même pression.

#### V. Hydrostatique

L'Hydrostatique se rapporte à la statique des fluides à masse volumique constante.

Cette dernière est supposée être indépendante de la pression c'est à dire que le fluide est incompressible.

De plus, on fait les hypothèses suivantes:

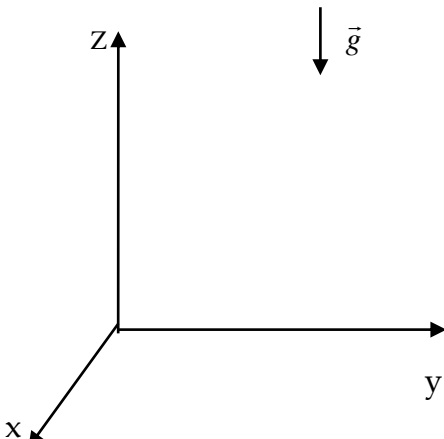
Le seul champ de forces agissant sur le fluide est celui de la pesanteur.

La pression atmosphérique est la même en tout point du domaine considéré.

La relation fondamentale de l'hydrostatique devient:

$$\vec{g} \begin{pmatrix} g_x = 0 \\ g_y = 0 \\ g_z = -g \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{\text{grad}}(P) = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Donc



$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = \rho g_x \\ \frac{\partial P}{\partial y} = \rho g_y \\ \frac{\partial P}{\partial z} = \rho g_z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \end{cases}$$

$$\frac{dp}{dz} = -\rho \cdot g \quad \Rightarrow \quad dp = -\rho \cdot g \cdot dz$$

$$\text{d'où :} \quad \int_1^2 dp = \int_1^2 -\rho \cdot g \cdot dz \quad \Rightarrow \quad [P]_1^2 = -\rho \cdot g \cdot [z]_1^2$$

$$P_2 - P_1 = -\rho \cdot g \cdot (Z_2 - Z_1) \quad \Rightarrow \quad P_2 + \rho \cdot g \cdot Z_2 = P_1 + \rho \cdot g \cdot Z_1$$

donc

$$P + \rho g Z = \text{cte}$$

## VI. Théorème d'Archimède

L'équilibre d'un corps immergé dans un liquide montre que celui-ci exerce sur le corps une force  $F$  dirigée vers le haut et appliquée en un point  $C$  appelé centre de poussée.

En général  $C$  est distinct du centre gravité  $G$  du corps immergé et l'on peut étudier la stabilité de l'équilibre étant données les positions respectives de  $C$  et  $G$ .

*Le théorème d'Archimède traduit l'existence de la force  $F$  équilibrant le poids  $P$ .*

$$F_A = \rho_{\text{fluide}} \cdot g \cdot V$$

$\rho_{\text{fluide}}$  : masse volumique du fluide en  $(\text{Kg}/\text{m}^3)$

$g$  : accélération de pesanteur  $(\text{m}/\text{s}^2)$

$V$  : volume corps immergé dans le fluide  $(\text{m}^3)$



# DYNAMIQUE DES FLUIDES

## INCOMPRESSIBLES

### I. DEFINITIONS

Le débit est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement.

#### 1- Débit-masse

Si  $\Delta m$  est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps  $\Delta t$ , par définition le débit-masse est :

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

Unité :  $\text{kg.s}^{-1}$ .

#### 2- Débit-volume

Si  $\Delta V$  est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps  $\Delta t$ , par définition le débit volume est :

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Unité :  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ .

#### 3- Relation entre $q_m$ et $q_v$

La masse volumique  $\rho$  est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad \text{d'où :}$$

$$q_m = \rho \cdot q_v$$

#### Remarques:

- Les liquides sont *incompressibles* et peu dilatables (masse volumique constante) ; on parle alors d'*écoulements isovolumes*.
- Pour les **gaz**, la masse volumique dépend de la température et de la pression. Pour des vitesses faibles (variation de pression limitée) et pour des températures constantes on retrouve le cas d'un écoulement isovolume.

#### 4- Écoulements permanents ou stationnaires

Un régime d'écoulement est dit *permanent* ou *stationnaire* si les paramètres qui le caractérisent (pression, température, vitesse, masse volumique, ...), ont une valeur constante au cours du temps.

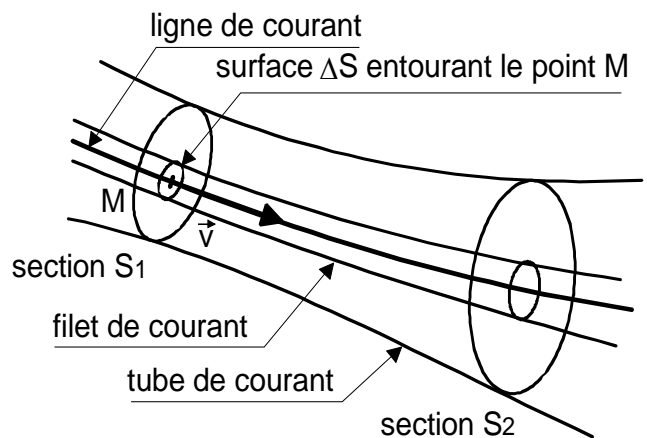
## II. Équation de conservation de la masse ou équation de continuité

### 1- Définitions

**Ligne de courant** : En régime stationnaire, on appelle ligne de courant la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide. Une ligne de courant est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse du fluide en ce point.

**Tube de courant** : Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

**Filet de courant** : Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface  $\Delta S$ .



La section de base  $\Delta S$  du tube ainsi définie est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points (répartition uniforme).

### 2- Conservation du débit

Considérons un tube de courant entre deux sections  $S_1$  et  $S_2$ . Pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ , infiniment petit, la masse  $\Delta m_1$  de fluide ayant traversé la section  $S_1$  est la même que la masse  $\Delta m_2$  ayant traversé la section  $S_2$ .  $q_{m1} = q_{m2}$

En régime stationnaire, le débit-masse est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.

Dans le cas d'un écoulement isovolume ( $\rho = \text{Cte}$ ) :  $q_{v1} = q_{v2}$

En régime stationnaire, le débit-volume est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant

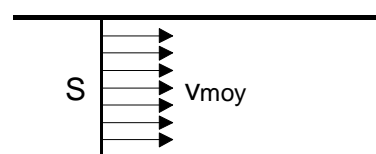
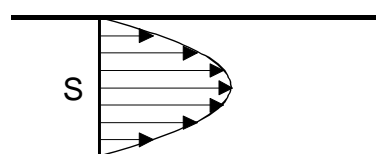
### 3- Expression du débit en fonction de la vitesse $v$

Le débit-volume est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base  $S$  et de longueur égale à  $v$ , correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant  $S$ .

Il en résulte la relation importante :  $q_v = v \cdot S$

### 4- Vitesse moyenne

En général la vitesse  $v$  n'est pas constante sur la section  $S$  d'un tube de courant ; on dit qu'il existe un **profil de vitesse** (à cause des forces de frottement). Le débit-masse





ou le débit-volume s'obtient en intégrant la relation précédente :

Dans une section droite  $S$  de la canalisation, on appelle *vitesse moyenne*  $v_m$  la vitesse

telle que :  $v_{moy} = \frac{q_V}{S}$

La vitesse moyenne  $v_{moy}$  apparaît comme la vitesse uniforme à travers la section  $S$  qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses.

Si l'écoulement est isovolume, cette vitesse moyenne est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite.

$$q_V = v_{1moy} \cdot S_1 = v_{2moy} \cdot S_2 = Cte \quad \text{C'est l'équation de continuité.}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad \text{La vitesse moyenne est d'autant plus grande que la section est faible.}$$

### III. Théorème de BERNOULLI

#### 1- Le phénomène

##### Observations

- Une balle de ping-pong peut rester en suspension dans un jet d'air incliné.
- Une feuille de papier est aspirée lorsqu'on souffle dessus.

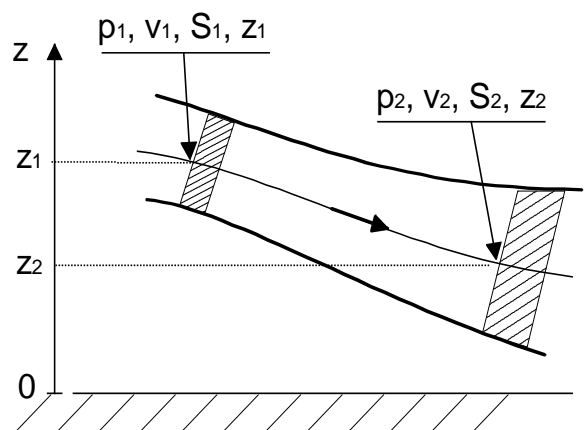
Conclusion: La pression d'un fluide diminue lorsque sa vitesse augmente.

#### 2- Théorème de Bernoulli pour un écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible

Un *fluide parfait* est un fluide dont l'écoulement se fait *sans frottement*.

On considère un écoulement permanent isovolume d'un fluide parfait, entre les sections  $S_1$  et  $S_2$ , entre lesquelles il n'y a aucune machine hydraulique, (pas de pompe, ni de turbine).

Soit  $m$  la masse et  $V$  le volume du fluide qui passe à travers la section  $S_1$  entre les instants  $t$  et  $t+\Delta t$ . Pendant ce temps la même masse et le même volume de fluide passe à travers la section  $S_2$ . Tout se passe comme si ce fluide était passé de la position (1) à la position (2).



En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à ce fluide entre les instants  $t$  et  $t+\Delta t$  (la variation d'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des forces extérieures: poids et forces pressantes), on obtient:

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho g z + p = Cte$$

$p$  est la pression statique,  $\rho g z$  est la pression de pesanteur,  $\rho \frac{v^2}{2}$  est la pression cinétique.

Tous les termes s'expriment en pascal.

En divisant tous les termes de la relation précédente par le produit  $\rho g$ , on écrit tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pressions exprimées en mètres de colonne de fluide).

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} = H = Cte$$

$H$  est la Hauteur totale,  $\frac{P}{\rho g}$  est la Hauteur de Pression,  $z$  est la cote,  $\frac{v^2}{2g}$  est la Hauteur cinétique,  $z + \frac{P}{\rho g}$  est la Hauteur piézométrique.

### 3- Cas d'un écoulement (1)→(2) sans échange de travail

Lorsque, dans un écoulement d'un fluide parfait, il n'y a aucune machine (ni pompe ni turbine) entre les points (1) et (2) d'une même ligne de courant, la relation de Bernoulli peut s'écrire sous l'une ou l'autre des formes suivantes :

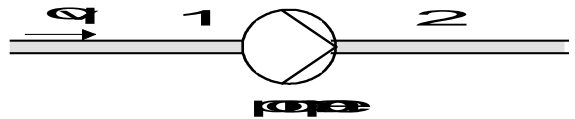
$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2g} (v_2^2 - v_1^2) + (z_2 - z_1) + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = 0$$

### 4- Cas d'un écoulement (1)→(2) avec échange d'énergie

Lorsque le fluide traverse une machine hydraulique, il échange de l'énergie avec cette machine sous forme de travail  $\Delta W$

pendant une durée  $\Delta t$ . La puissance  $P$

échangée est  $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$



Unités :  $P$  en watt (W),  $W$  en joule (J),  $t$  en seconde (s).

- $P > 0$  si l'énergie est reçue par le fluide (ex. : pompe) ;
- $P < 0$  si l'énergie est fournie par le fluide (ex. : turbine).

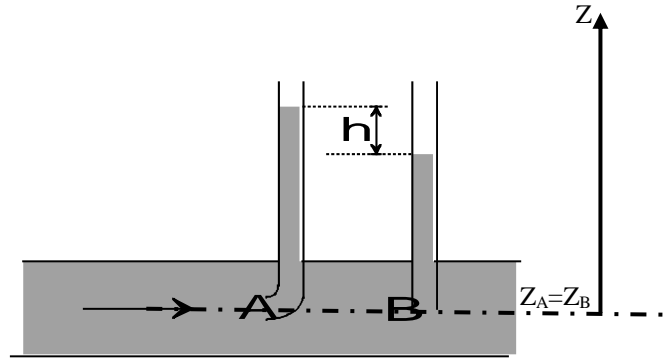
Si le débit-volume est  $q_v$ , la relation de Bernoulli s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) = \frac{P}{q_v}$$

## IV. Application du Théorème de Bernoulli

### 1- Tube de Pitot

On considère un liquide en écoulement permanent dans une canalisation et deux tubes plongeant dans le liquide, l'un débouchant en A face au courant, et l'autre en B est le long des lignes de courant, les deux extrémités étant à la même hauteur. Au point B, le liquide a la même vitesse  $v$  que dans la canalisation et la pression est la même que celle du liquide  $p_B = p$ .



En A, point d'arrêt, la vitesse est nulle et la pression est  $p_A$ .

D'après le théorème de Bernoulli ( $Z_A = Z_B$ ),

$$p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = p_A$$

soit 
$$\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = p_A - p_B = \rho \cdot g \cdot h$$

En mesurant la dénivellation  $h$  du liquide dans les deux tubes, on peut en déduire la vitesse  $v$  d'écoulement du fluide.

### 2- Phénomène de Venturi

Un conduit de section principale  $S_A$  subit un étranglement en B où sa section est  $S_B$ . La vitesse d'un fluide augmente dans l'étranglement, donc sa pression  $y$  diminue :  $v_B > v_A \Rightarrow p_B < p_A$

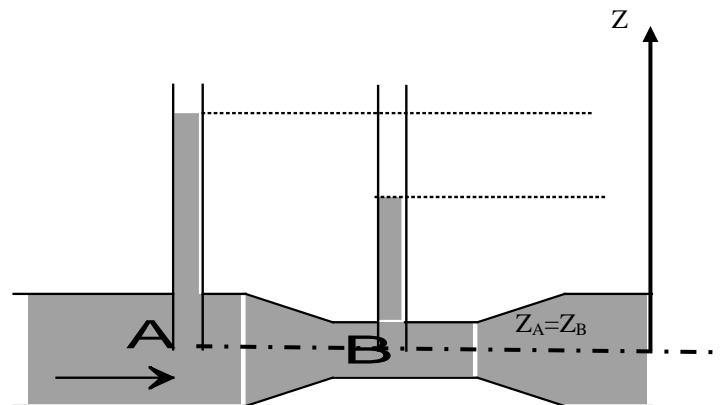
Le théorème de Bernoulli s'écrit ici :

$$p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 + \rho g Z_A = p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2 + \rho g Z_B$$

Et on a  $Z_A = Z_B$  donc 
$$p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 = p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2$$

D'après l'équation de continuité,  $v_B S_B = v_A S_A = q_v$  et  $v_B > v_A$  donc  $p_A > p_B$

$$p_A - p_B = \frac{1}{2} \rho \cdot \left( \frac{1}{S_B^2} - \frac{1}{S_A^2} \right) \cdot q^2 = k \cdot q^2 \text{ avec } k = \frac{1}{2} \rho \cdot \left( \frac{1}{S_B^2} - \frac{1}{S_A^2} \right)$$



La différence de pression aux bornes aux extrémités du tube de Venturi est proportionnelle au carré du débit ; application à la mesure des débits (organes déprimogènes). On peut citer aussi la trompe à eau, le pulvérisateur.

### 3- Écoulement d'un liquide contenu dans un réservoir - Théorème de Torricelli

Considérons un réservoir muni d'un petit orifice à sa base, de section  $s$  et une ligne de courant partant de la surface au point (1) et arrivant à l'orifice au point (2). En appliquant le théorème de Bernoulli entre les points (1) et (2),

$$\rho \cdot \frac{v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 + p_1 = \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 + p_2$$

Or  $p_1 = p_2 = p_{\text{atmosphérique}}$  et  $v_1 \ll v_2$

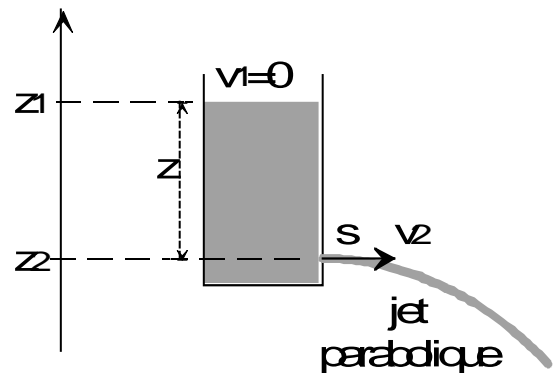
$$\rho \cdot \frac{0^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 + p_{\text{atm}} = \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 + p_{\text{atm}}$$

$$\rho \cdot g(z_1 - z_2) = \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} \quad \text{et on a } Z = (z_1 - z_2)$$

d'où

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot z}$$

La vitesse d'écoulement est la même que la vitesse de chute libre entre la surface libre et l'orifice, quelle que soit la masse volumique du liquide.



# VISCOSITE

## I. Le phénomène

### Observations

- L'eau, l'huile, le miel coulent différemment : l'eau coule vite, mais avec des tourbillons ; le miel coule lentement, mais de façon bien régulière.
- La chute d'un parachutiste se fait à vitesse constante, contrairement à la loi de la chute libre.
- La pression d'un liquide réel diminue tout au long d'une canalisation dans laquelle il s'écoule, même si elle est horizontale et de section uniforme, contrairement au théorème de Bernoulli.

### Conclusion

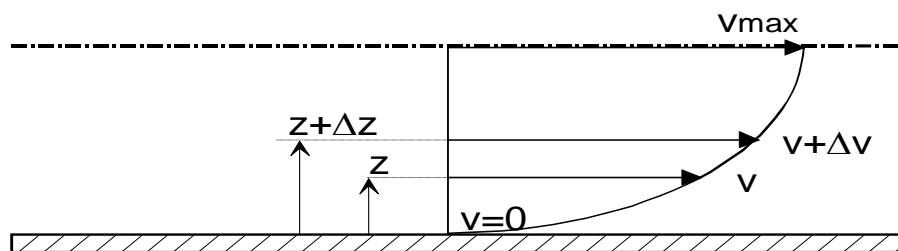
- Dans un *fluide réel*, les forces de contact ne sont pas perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquelles elles s'exercent. La viscosité est due à ces *frottements* qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres.
- Les phénomènes dus à la **viscosité** des fluides ne se produisent que **lorsque ces fluides sont en mouvement**.

## II. Viscosité dynamique - Viscosité cinématique

### 1- Profil des vitesses

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. *On dit qu'il existe un profil de vitesse.*

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section



droite perpendiculaire à l'écoulement d'ensemble, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse.

Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres.

La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance  $z$  de cette couche au plan fixe :  $v = v(z)$ .

## 2- Viscosité dynamique

Considérons deux couches de fluide contiguës distantes de  $\Delta z$ . La force de frottement  $F$  qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit  $\Delta v$ , à leur surface  $S$  et inversement proportionnelle à  $\Delta z$  :

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta z}$$

Le facteur de proportionnalité  $\eta$  est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

Dimension :  $[\eta] = \text{M.L}^{-1}.\text{T}^{-1}$ .

Unité : Dans le système international (SI), l'unité de viscosité dynamique est le *Pascal seconde (Pa.s)* ou *Poiseuille (Pl)* :  $1 \text{ Pa.s} = 1 \text{ Pl} = 1 \text{ kg/m.s}$

La viscosité de produits industriels (huiles en particulier) est exprimée au moyen d'unités empiriques : degré ENGLER en Europe, degré Redwood en Angleterre, degré Saybolt aux USA.

## 3- Viscosité cinématique

Dans de nombreuses formules apparaît le rapport de la viscosité dynamique  $\eta$  et de la masse volumique  $\rho$ .

Ce rapport est appelé viscosité cinématique  $\nu$  :  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Dimension :  $[\nu] = \text{L}^2.\text{T}^{-1} = (\text{m}^2/\text{s})$ .

Dans le système CGS (non légal), l'unité est le Stokes (St) :  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St}$ .

## 4- Ordre de grandeur ; influence de la température

Fluide	$\eta$ (Pa.s)
eau (0 °C)	$1,787 \cdot 10^{-3}$
eau (20 °C)	$1,002 \cdot 10^{-3}$
eau (100 °C)	$0,2818 \cdot 10^{-3}$
huile d'olive (20 °C)	$\approx 100 \cdot 10^{-3}$
glycérol (20 °C)	$\approx 1000 \cdot 10^{-3}$
H <sub>2</sub> (20 °C)	$0,86 \cdot 10^{-5}$
O <sub>2</sub> (20 °C)	$1,95 \cdot 10^{-5}$

La viscosité des liquides diminue beaucoup lorsque la température augmente.

### Remarques

- Il n'existe pas de relation rigoureuse liant  $\eta$  et  $T$ .
- Contrairement à celle des liquides, *la viscosité des gaz augmente avec la température.*

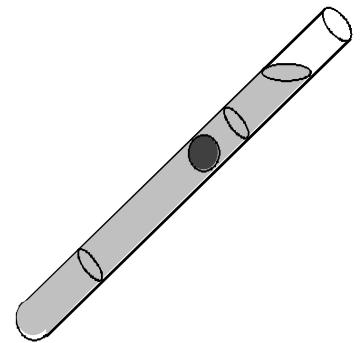
### III. Mesurage de viscosités

#### 1- Viscosimètre d'Ostwald

On mesure la durée d'écoulement  $t$  d'un volume  $V$  de liquide à travers un tube capillaire. On montre que la viscosité cinématique  $\nu$  est proportionnelle à la durée  $t$ .  
Si on connaît la constante de l'appareil ( $K$ ) fournie par le constructeur :  $\nu = K \cdot t$   
Si on ne connaît pas cette constante, on la détermine préalablement à l'aide de l'eau.

#### 2- Viscosimètre à chute de bille ou viscosimètre d'Hoepler

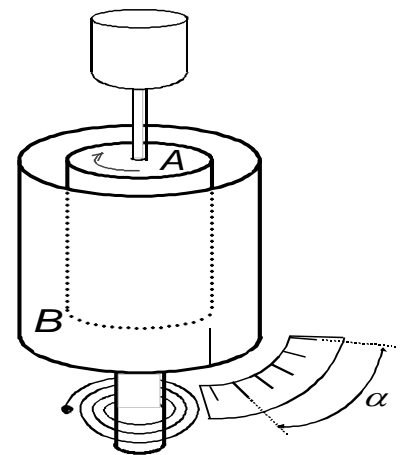
Une bille sphérique tombe lentement dans un tube bien calibré renfermant le liquide visqueux. On mesure la durée  $t$  que met la bille pour parcourir une certaine distance. On montre que la viscosité dynamique  $\eta$  est proportionnelle à la durée  $t$  :  $\eta = K \cdot t$



#### 3- Viscosimètre rotatif ou viscosimètre de Couette

Un cylindre plein ( $A$ ) tourne à vitesse constante dans un liquide contenu dans un récipient cylindrique ( $B$ ) ; celui-ci, mobile autour de son axe de révolution, est entraîné par le liquide. Un ressort, exerçant un couple de torsion après avoir tourné d'un angle  $\alpha$ , retient ( $B$ ) en équilibre.

On montre que la viscosité dynamique  $\eta$  est proportionnelle à l'angle  $\alpha$  :  $\eta = K \cdot \alpha$



#### Applications et conséquences:

- La propulsion par hélice d'un avion ou d'un bateau est possible grâce à la viscosité de l'air ou de l'eau.
- A cause de sa viscosité, la pression d'un fluide réel diminue en s'écoulant dans une canalisation ; cela nécessite parfois d'introduire des pompes à distance régulière tout au long de la canalisation.