

# CHAPITRE 5 MECANIQUE DES FLUIDES NON VISQUEUX

Pr. M. ABD-LEFDIL  
Université Mohammed V- Agdal  
Département de Physique  
Année universitaire 05-06  
SVI-STU

---

---

---

---

---

---

---

---

## INTRODUCTION

- Les 3 états de la matière sont :
- L'état solide, l'état liquide et l'état gazeux.
- Ces différents états sont caractérisés par deux notions : **la rigidité et la cohésion**.
- Lorsqu'on applique une force à un élément de matière, sa rigidité caractérise sa capacité à conserver son volume.
- Quant à sa cohésion, elle caractérise sa capacité à conserver sa forme.

---

---

---

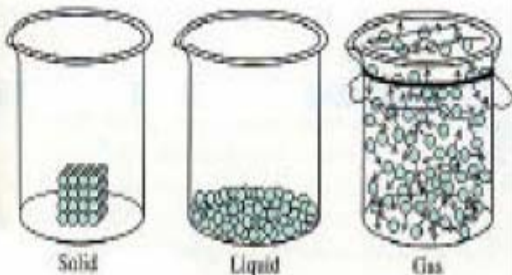
---

---

---

---

---



---

---

---

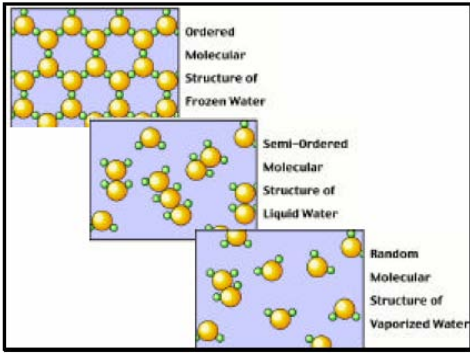
---

---

---

---

---




---



---



---



---



---



---

**Un élément de matière sans cohésion est un fluide: le liquide et le gaz**

Dans ce chapitre, nous allons étudier:

- les fluides au repos,
- les fluides en mouvement sans frottement: les fluides parfaits ou non visqueux.

---



---



---



---



---



---

- Une propriété importante des liquides est leur grande résistance vis à vis des changements de volume: Les liquides sont pratiquement **incompressibles** (masse volumique est constante).

**Exemple** : Il faut une force de  $10^9$  par  $m^2$  de surface pour diminuer le volume de l'eau de 5%.

---



---



---



---



---



---

- Une masse donnée du fluide n'a pas une forme fixe. On utilisera les notions de masse volumique et de pression pour l'étude du mouvement ou l'état d'équilibre d'un fluide.

---

---

---

---

---

---

---

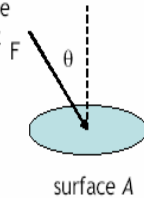
---

## I- Définition de la pression

• **Pression:** C'est la force par unité de surface agissant perpendiculairement à la surface.

$$P = \frac{F_{\perp}}{A}$$

$$P = \frac{F \cos \theta}{A}$$



L'unité de la pression est le Pascal (Pa). 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>

---

---

---

---

---

---

---

---

$$P = \frac{F \cos \theta}{A} = \frac{F \cos \theta \ell}{A \ell} = \frac{W}{V}$$

- P correspond à des N/m<sup>2</sup> ou J/m<sup>3</sup>.

### Unités de la pression :

- Dans le S.I, l'unité est le Pascal Pa.
- 1 atm = 1.013 10<sup>5</sup> Pa
- 1 atm = 760 mm Hg = 1 bar
- 1 torr = 1 mm Hg = 0.133 KPa

---

---

---

---

---

---

---

---

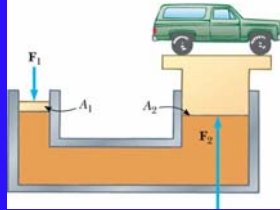
## Transmission de force

• On a:

$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Une force appliquée  $F_1$  peut être "amplifiée":

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1}$$



Exemple: Elévateur hydraulique, ascenseur

---

---

---

---

---

---

---

---

## Pression et profondeur

$w$  est le poids

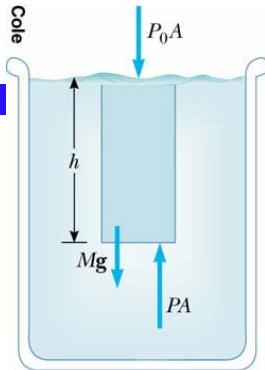
$$w = Mg = \rho Vg = \rho Ahg$$

Somme des forces est nulle,

$$PA - P_0A - w = 0$$

On simplifie par  $A$

$$P = P_0 + \rho gh$$




---

---

---

---

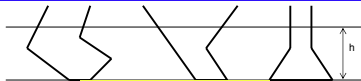
---

---

---

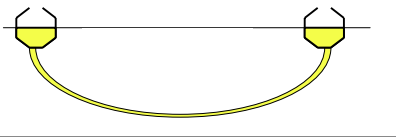
---

- La pression au fond d'un récipient ne dépend pas de la forme du récipient mais uniquement de la hauteur du liquide.



La pression au fond est la même

- Deux récipients communicants (vases communicants) ont leurs surfaces libres sur un même plan horizontal.




---

---

---

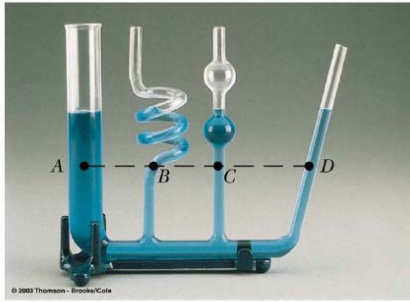
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

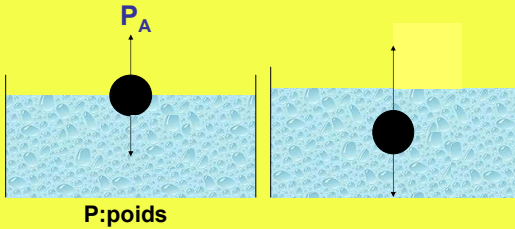
---

---

---

## II - Principe d'Archimède :

- Un objet, flottant ou submergé dans un fluide, subit de la part du fluide une force appelée poussée d'Archimède  $P_A$ .




---

---

---

---

---

---

---

---

*Accidents are just the tip of the iceberg.....*




---

---

---

---

---

---

---

---

- La différence de pression entre le haut et le bas du solide engendre une poussée verticale dirigée vers les pressions décroissantes (de bas vers le haut). Elle est appelée **poussée d'Archimède  $P_A$** .
- La poussée exercée sur un objet est égale au poids du fluide déplacé : C'est le principe d'Archimède.

$$P_A = \rho_0 V g$$

V est le volume du fluide déplacé et  $\rho_0$  sa masse volumique.

---

---

---

---

---

---

---

---

### III - Ecoulements :

Un fluide peut présenter 2 types principaux d'écoulement :

- écoulement **laminaire**
- écoulement **turbulent**

---

---

---

---

---

---

---

---

1- Dans un écoulement **laminaire**, chaque particule suit alors une trajectoire uniforme qui ne croise pas celle d'aucune autre particule.

La vitesse du fluide en un point quelconque est tangente à cette ligne de courant.




---

---

---

---

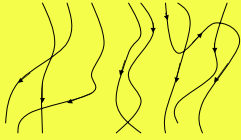
---

---

---

---

2- A partir d'une certaine vitesse, l'écoulement devient **turbulent**. Ce dernier se caractérise par des lignes de courant qui tourbillonnent et s'entrecroisent.



On verra dans le chapitre 6 l'équation mathématique qui permet de définir la nature de l'écoulement ( nombre de Reynolds)

---

---

---

---

---

---

---

---

Exemple d'écoulement



---

---

---

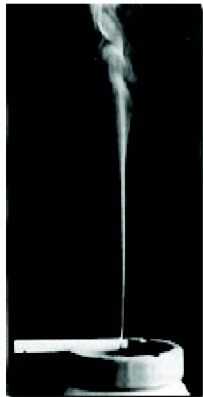
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---

## IV - Equation de continuité :

- Considérons un fluide incompressible qui remplit totalement un conduit (un tube ou une artère par exemple).
- Si une masse supplémentaire pénètre à l'une des 2 extrémités, une masse identique en sort à cause du caractère **incompressible** du fluide. Ce principe simple est régi par **l'équation de continuité** et exprime la **conservation du débit**.

---

---

---

---

---

---

---

---

- Un débit  $Q$  à travers une canalisation est défini par le volume du fluide qui la traverse par unité de temps.  $Q$  est en  $m^3/s$ .

- L'équation de continuité :  $Q_1 = Q_2$

$Q_1$  est le débit à l'entrée de la canalisation

$Q_2$  est le débit à la sortie de la canalisation

---

---

---

---

---

---

---

---

Considérons un tube de section  $A_1$  à l'entrée et supposons que le fluide s'y déplace avec une **vitesse moyenne**  $v_1$ .

Dans l'autre extrémité de section  $A_2$ , la vitesse est  $v_2$ .

---

---

---

---

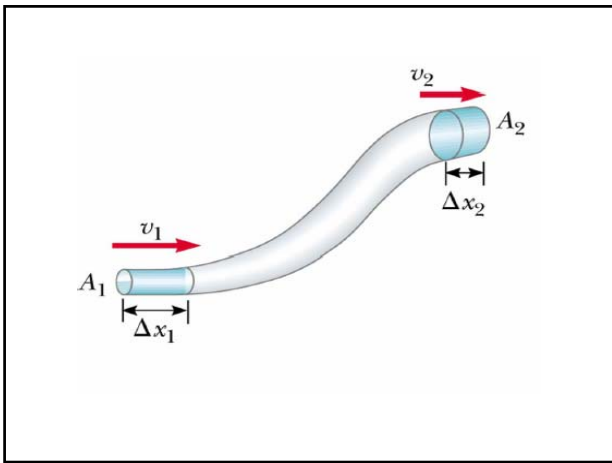
---

---

---

---






---

---

---

---

---

---

---

---

$$Q_1 = \frac{\Delta V_1}{\Delta t} \quad \text{et} \quad Q_2 = \frac{\Delta V_2}{\Delta t}$$

- Au bout de  $\Delta t$ , le volume du fluide  $\Delta V_1 = A_1 \Delta x_1$  ou encore  $\Delta V_1 = A_1 v_1 \Delta t$ , s'est déplacé à l'entrée d'une distance  $\Delta x_1 = v_1 \Delta t$ .
- Le volume du fluide quittant le tube est  $\Delta V_2 = A_2 \Delta x_2$  ou encore  $\Delta V_2 = A_2 v_2 \Delta t$ .  
Or  $\Delta V_1 = \Delta V_2$  (ou encore  $Q_1 = Q_2$ ), d'où :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

---

---

---

---

---

---

---

---

- Le débit d'un fluide est égal au produit de sa vitesse par la section du conduit (canalisation, tube, artère,...).

$$Q = A v$$

- Le produit de la section A du conduit par la vitesse du fluide est constant :

$$A v = Cte$$

C'est l'équation de continuité

---

---

---

---

---

---

---

---

## V- Théorème de Bernoulli :

- - Pourquoi les pressions du sang sont différentes au niveau du cerveau, du cœur et des pieds par exemple?
- - Comment l'air circule-t-il dans un terrier?
- - Pourquoi la fumée s'élève-t-elle dans une cheminée?
- - Comment déterminer la hauteur à laquelle l'eau peut monter dans les canalisations d'un immeuble?

Le théorème de Bernoulli nous donne une explication à ces questions.

---

---

---

---

---

---

---

---

## Conditions de validité du th. de Bernoulli :

- **i** - Le fluide est incompressible ( $\rho$  reste constante).
- **ii** - Le fluide est dépourvu de frottement ou le fluide est non visqueux ou parfait.
- **iii** - Le fluide est régulier (régime stationnaire) ou le fluide a une vitesse qui ne change pas au cours du temps.

---

---

---

---

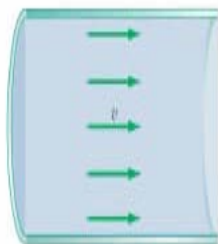
---

---

---

---

Fluide idéale sans viscosité.



---

---

---

---

---

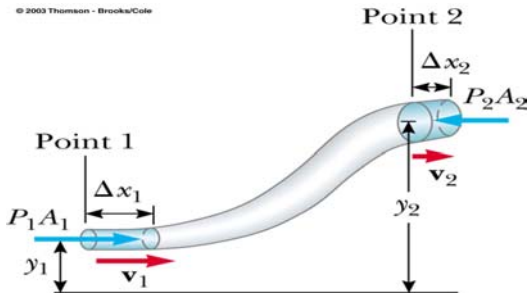
---

---

---

Considérons un fluide dans une portion de tube de courant de section droite variable.

© 2003 Thomson - Brooks/Cole




---

---

---

---

---

---

---

---

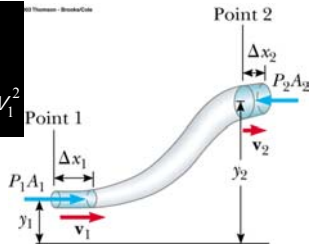
### Equation de Bernoulli: démonstration

Considérons un volume  $V$  de masse  $M$ ,

$$\begin{aligned} \Delta E_c &= \frac{1}{2} M v_2^2 - \frac{1}{2} M v_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho V v_2^2 - \frac{1}{2} \rho V v_1^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_p &= M g y_2 - M g y_1 \\ &= \rho V g y_2 - \rho V g y_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= F_1 \Delta x_1 - F_2 \Delta x_2 \\ &= P_1 A_1 \Delta x_1 - P_2 A_2 \Delta x_2 \\ &= P_1 V - P_2 V \end{aligned}$$



On obtient alors:

---

---

---

---

---

---

---

---

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

La somme de la pression et de l'énergie mécanique par unité de volume reste constante tout au long du tube de courant. C'est le théorème de Bernoulli.

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = cte$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### Lévitaiton d'une balle

Lorsque l'on place la balle de ping-pong sous un entonnoir retourné, en soufflant assez fort et régulièrement dans l'entonnoir, on maintient la balle "collée" sous ce dernier. La vitesse de l'air est plus grande au dessus de la balle (A) qu'en dessous (B). La différence de pression ( $p_a - p_b > 0$ ) produit sur la balle des forces pressantes dont la résultante est dirigée vers le haut, plaquant la balle vers le fond de l'entonnoir.



---

---

---

---

---

---

---

---

## VI- Applications du théorème de Bernoulli

- 1- Manomètre
- 2- Expérience de Pascal
- 3- Rôle de la gravitation dans la circulation sanguine
- 4- Tube de Venturi

---

---

---

---

---

---

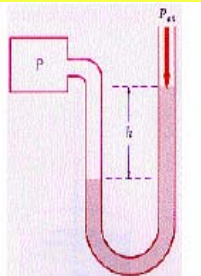
---

---

### • 1- Manomètre :

C'est un tube en U contenant un liquide (généralement le mercure Hg) et qui sert à mesurer la pression d'un gaz.

Manomètre à tube ouvert



---

---

---

---

---

---

---

---

• Appliquons le théorème de Bernoulli au cas du manomètre à tube ouvert:

$$P_{\text{gaz}} + [\rho g y_1] = P_{\text{atm}} + [\rho g y_2]$$

$$P_{\text{gaz}} - P_{\text{atm}} = \rho g (y_2 - y_1) = \rho g h$$

La pression du gaz se ramène donc à la mesure de la différence des hauteurs dans le tube en U.

**Remarques :**

i)  $P - P_{\text{atm}}$  est appelée **pression de jauge**.

ii) le tube en U peut aussi servir à mesurer la pression d'un liquide à condition que ce liquide ne se mélange pas à celui du manomètre.

---

---

---

---

---

---

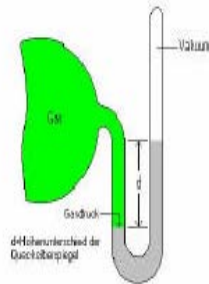
---

---

Manomètre à tube fermé

$$P = \rho g h$$

Ce dispositif mesure la pression absolue



---

---

---

---

---

---

---

---

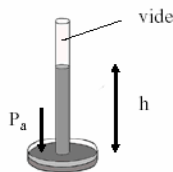
## 2- Expérience de Pascal :

Elle consiste en la mesure de la pression atmosphérique à l'aide d'un baromètre.

Baromètre

$$P_a = \rho g h$$

Ce dispositif mesure la pression atmosphérique



---

---

---

---

---

---

---

---

- Si on fait l'expérience avec le **mercure** ( $\rho = 13600 \text{ kg m}^{-3}$ ), on mesure  **$h = 0.76 \text{ m}$** .

- Si on réalise cette expérience avec de l'**eau** ( $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ), on mesure  **$h = 10.33 \text{ m}$** .

La pression ainsi mesurée est la pression atmosphérique :

$$P_{\text{atm}} = \rho g h$$

**A.N.** :  $P_{\text{atm}} = 13600 \times 9,81 \times 0.76 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ S.I.}$

$$P_{\text{atm}} = 1000 \times 9,81 \times 10.33 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ S.I.}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### 3- Rôle de la gravitation dans la circulation sanguine:

Dans la position debout, les pressions entre le cœur, les pieds et le cerveau sont très différentes. Ceci reflète les grandes différences de niveau entre ces 3 points.

---

---

---

---

---

---

---

---

• Sachant que les effets de viscosité sont faibles, on peut utiliser le théorème de Bernoulli. En plus, les **vitesse**s de circulation dans ces artères sont petites et **sensiblement égales**, d'où :

$$P_{\text{cerveau}} + [\rho g h_{\text{cv}}] = P_{\text{cœur}} + [\rho g h_{\text{c}}] = P_{\text{pieds}}$$

$$\rho(\text{sang}) = 1060 \text{ Kg m}^{-3}.$$

$$g = 9.8 \text{ ms}^{-2}.$$

---

---

---

---

---

---

---

---

### Exemple pratique :

$$h_{cv} = 1.8 \text{ m et } h_c = 1.3 \text{ m}$$

$$P_{\text{pieds}} - P_{\text{coeur}} = 13.5 \text{ KPa et}$$

$$P_{\text{coeur}} - P_{\text{cerveau}} = 4.1 \text{ KPa}$$

$$\text{Or : } P_{\text{coeur}} = 100 \text{ mm Hg} = 13.3 \text{ KPa}$$

$$\text{d'où : } P_{\text{cerveau}} = 62 \text{ mm Hg} = 8.3 \text{ KPa}$$

$$\text{et } P_{\text{pieds}} = 200 \text{ mm Hg} = 26.6 \text{ KPa}$$

---

---

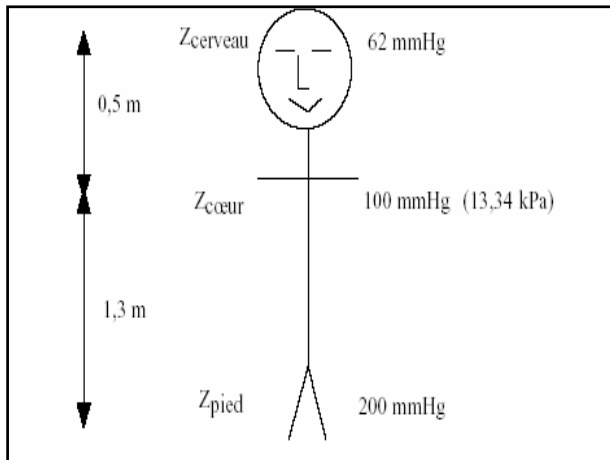
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

### Remarques

- a) Le cœur fournit, par rapport à la pression externe, une surpression de l'ordre de 13.3 KPa = 100 mm Hg. C'est ce qu'on appelle la pression sanguine fournie par le cœur.
- b) En l'absence de tout phénomène compensatoire, la pression de perfusion cérébrale subit une baisse de l'ordre de 32 %. Ce qui est préjudiciable aux cellules cérébrales (anoxie).

---

---

---

---

---

---

---

• c) Sous l'effet d'une accélération, le sang est poussé dans le sens de l'accélération et va s'accumuler dans certains organes, par exemple les membres inférieurs en position assise ou debout. En effet:

Appliquons le théorème de Bernoulli à une personne en présence d'une accélération  $a$  vers le haut ( dans une fusée, un siège éjectable...):

$$P_{\text{cerveau}} + [\rho (g+a) h_{\text{cv}}] = P_{\text{coeur}} + [\rho (g+a) h_c]$$

$$P_{\text{cerveau}} = P_{\text{coeur}} + [\rho (g+a) (h_{\text{cv}} - h_c)]$$

---

---

---

---

---

---

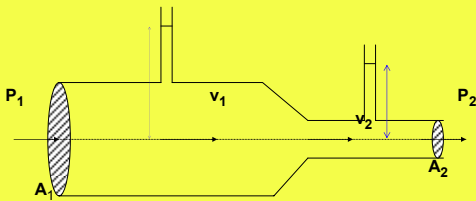
---

---

• 4- Tube de Venturi :

C'est un tube qui présente un rétrécissement (ou étranglement ou goulot).

- Cas d'un tube de Venturi horizontal :




---

---

---

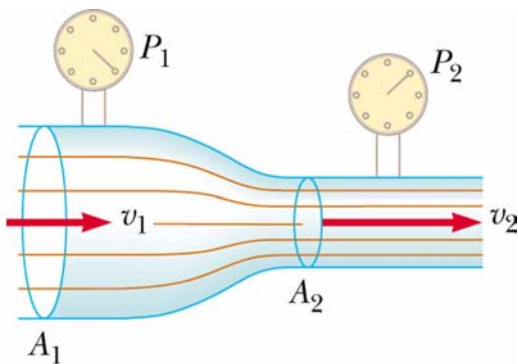
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---



• L'équation de continuité nous donne :

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Si  $A_1 > A_2$ , alors  $v_2 > v_1$

En vertu du théorème de Bernoulli, la pression doit chuter à l'endroit de l'étranglement.

La chute de pression étant fonction de la vitesse d'écoulement. En pratique, sa mesure est réalisée au moyen d'étroites colonnes insérées dans le tube.

---

---

---

---

---

---

---

---

• Le théorème de Bernoulli donne (pour une même hauteur) :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Or :  $v_2 = (A_1 / A_2) v_1$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho [(A_1^2 / A_2^2) - 1]}}$$

La mesure de  $P_1 - P_2$  et la connaissance des aires  $A_1$  et  $A_2$  permettent de déterminer  $v_1$ , et par la suite  $v_2$ .

---

---

---

---

---

---

---

---

• Applications :

- Vaporisateurs de parfums,
- Extincteurs de feu
- Fontaines...

---

---

---

---

---

---

---

---