

## Introduction

La **mécanique** est la plus ancienne des sciences physiques qui étudie l'influence des forces sur les corps statiques et aussi les corps en mouvement. La branche de la mécanique qui analyse les corps au repos est appelée **statique**, tandis que la branche qui considère les corps en mouvement est appelée **dynamique**.

La mécanique des fluides est une sous-catégorie de la mécanique qui étudie le comportement des fluides au repos (statique des fluides) ou en mouvement (dynamique des fluides). La mécanique des fluides est également divisée en plusieurs catégories :

- **l'hydrodynamique** étudie le mouvement des fluides qui sont pratiquement incompressibles (comme les liquides, en particulier l'eau et les gaz à basse vitesse).
- **L'hydraulique** est une sous-catégorie de l'hydrodynamique et qui considère les écoulements des liquides dans les canalisations et les canaux ouverts.
- **La gazodynamique** traite les écoulements des fluides qui subissent des modifications importantes de densité (masse volumique), tels que les écoulements de gaz à travers des buses à haute vitesse.
- **L'aérodynamique** est la catégorie de la mécanique des fluides qui étudie les écoulements de gaz (notamment l'air) autour des objets tels que les avions, les fusées et les voitures à des vitesses basses ou élevée.
- D'autres catégories spécialisées comme la météorologie, l'océanographie, l'hydrologie analysent les écoulements qui se trouvent dans la nature.

## États de la matière

Toute substance existe sous trois formes principales : solide, liquide, et gaz (Fig.1 ).

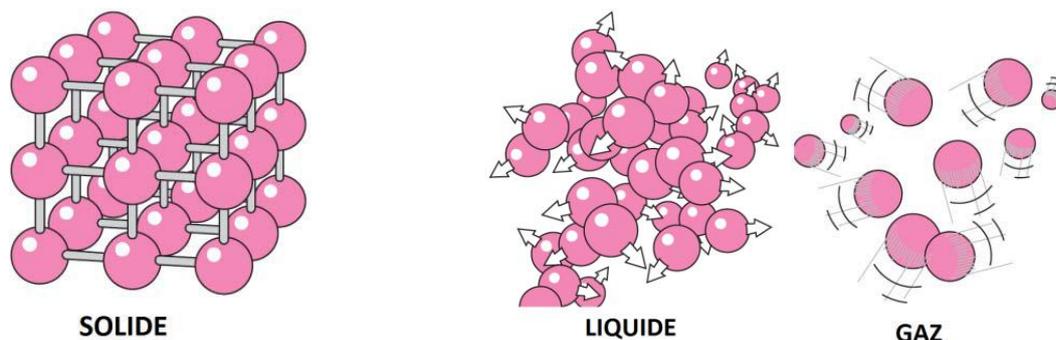


Figure 1

Une substance en phase liquide ou en phase gazeuse est appelée **fluide**.

Dans un liquide, les molécules peuvent se déplacer les unes par rapport aux autres, mais le volume reste relativement constant en raison des forces de cohésion fortes entre les molécules. En conséquence, un liquide prend la forme du récipient où il se trouve, et il forme une **surface libre** (Fig. 2). Un gaz, cependant, se dilate jusqu'à ce qu'il rencontre les parois du récipient et remplit tout l'espace disponible. C'est parce que les molécules du gaz sont

largement espacées, et les forces de cohésion entre eux sont très faibles. Donc contrairement à un liquide, les gaz ne peuvent pas former une surface libre (Fig.2)

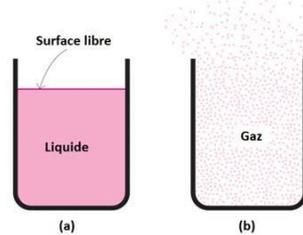


Figure 2

### Caractéristiques physiques

**1 Masse volumique.** La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un fluide par unité de volume. Elle est déterminée par le quotient de sa masse "m" sur son volume "v".

$$\rho = \frac{m}{V}$$

**2. Poids spécifique.** On utilise souvent en mécanique des fluides le poids spécifique noté  $\gamma$ , c'est tout simplement la masse volumique  $\rho$  multipliée par l'accélération gravitationnelle  $g$ .

$$\gamma = \rho \cdot g$$

$g$ : Accélération de la pesanteur (SI:  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ )

L'unité du poids spécifique est le (N/m<sup>3</sup>).

- La masse volumique des liquides est peu dépendante de la pression et de la température.
- La masse volumique des gaz varie en fonction de la pression et de la température. On utilise souvent la **loi des gaz parfaits** pour décrire son évolution :

$$PV = nrT \leftrightarrow P = \rho rT$$

$\rho$  : masse volumique en (kg/m<sup>3</sup>),

$T$ : température en Kelvin :  $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$

$r$ : constante du gaz (Air:  $r = 287 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ ) ;  $r = R / M$

$R$ : constante universelle des gaz ( $R = 8.314 \text{ KJ/kmol}\cdot\text{K}$ ).

$M$ : masse molaire du gaz (Air :  $M = 28.97 \text{ kg/kmol}$ ).

### 3. Densité

La densité (ou densité relative) d'un fluide est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un fluide pris comme référence.

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

Dans le cas des liquides on prend l'eau comme fluide de référence. Dans le cas des gaz on prend l'air comme fluide de référence.

#### 4. Viscosité

La viscosité d'un fluide est une mesure de sa résistance à la déformation par contrainte de cisaillement (contrainte appliquée de manière parallèle ou tangentielle). Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. Cette résistance s'explique par les forces d'attraction entre les molécules du fluide. En conséquence, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement plus que les fluides à faible viscosité qui s'écoulent plus facilement (par exemple, le miel a une viscosité beaucoup plus élevée que l'eau).

##### 4.1 Viscosité dynamique

La viscosité dynamique d'un fluide exprime sa résistance aux écoulements cisailés, où les couches de particules fluides adjacentes se déplacent parallèlement les unes par rapport aux autres avec des vitesses différentes. Elle peut être définie par la situation idéalisée connue sous le nom de **l'écoulement de Couette**, où une couche de fluide est piégée entre deux plaques horizontales, l'une fixe et l'autre mobile avec une vitesse constante  $u$  (Fig. 3).

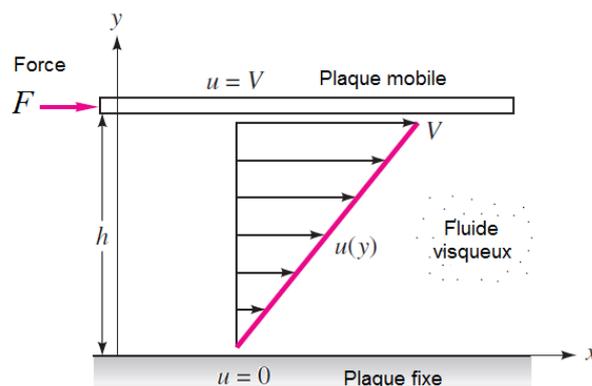


Figure 3. Écoulement de Couette

Si la vitesse de la plaque supérieure est suffisamment petite, les particules de fluide se déplacent parallèlement à elle, et leur vitesse varie de manière linéaire de "zéro" en bas à " $u$ " en haut. Chaque couche de fluide se déplace plus vite que celle juste en dessous, et le frottement entre les couches de particules fluides va donner lieu à une force de résistance. En conséquence, le fluide va appliquer sur la plaque supérieure une force dans la direction opposée à son mouvement, et aussi une force sur la plaque inférieure égale à celle du haut mais dans le sens inverse. Ainsi une force externe " $F$ " est donc nécessaire afin de maintenir la plaque supérieure se déplaçant à une vitesse constante " $u$ ". L'amplitude de la force " $F$ " est proportionnelle à la vitesse " $u$ ", à la surface " $A$ " de chaque plaque, et inversement proportionnelle à la distance séparant les deux plaques " $y$ ". Le facteur de proportionnalité est la viscosité dynamique du fluide " $\mu$ ", on a donc:

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{u}{y}$$

$F$ : Force en (N),

$\mu$ : viscosité dynamique en (kg/m.s ou N.s/m<sup>2</sup>),

$S$ : surface de contact en (m<sup>2</sup>),

$u$ : vitesse en (m/s),

$y$ : distance entre les deux plaques en (m).

Isaac Newton a exprimé les forces visqueuses par l'équation différentielle suivante :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

Où  $\tau = \frac{F}{S}$  est la **contrainte de cisaillement** et  $\frac{\partial u}{\partial y}$  est le **taux de déformation** qui représente la dérivée de la vitesse du fluide par rapport à la direction perpendiculaire aux plaques.

Dans le cas où  $\mu$  est une constante, le fluide qui obéit à la relation ci-dessus est appelé **fluide Newtonien**.

## 4.2 Viscosité cinématique

La viscosité cinématique est le rapport entre la viscosité dynamique  $\mu$  et la masse volumique  $\rho$  du fluide. Elle est généralement désignée par la lettre grecque  $\nu$  (nu)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

L'unité de la viscosité cinématique est le (m<sup>2</sup>/s).

## 5. Définitions

### 5.1 Fluide réel

Un fluide qui possède une certaine viscosité est connu sous le nom de fluide réel. Dans la pratique tous les fluides sont des fluides réels.

### 5.2 Fluide parfait

Un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de viscosité. Tous les fluides ayant une viscosité (sauf un **superfluide**, ce qui en pratique ne concerne guère que l'hélium à très basse température), le fluide parfait ne peut être qu'une approximation pour une viscosité tendant vers zéro.

### 5.3 Fluide incompressible

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée de fluide ne varie pas en fonction de la pression extérieure. Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.)

### 5.4 Fluide compressible

Un fluide est dit compressible lorsque le volume occupé par une masse donnée de ce fluide varie en fonction de la pression extérieure. Les gaz sont des fluides compressibles. Par exemple, l'air, l'hydrogène, le méthane à l'état gazeux, sont considérés comme des fluides compressibles.

## Exercice 1

Un système piston-cylindre contenant un volume d'air de 90 litres à une pression de 130 kPa et une température de 26 °C. La pression de l'air double lorsque le volume est réduit dans le système à 56 litres. Déterminer la masse volumique et la température de l'air après la compression. ( $r_{\text{Air}} = 287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ).

*Réponse* :  $\rho = 2.44 \text{ kg/m}^3$ ,  $T = 371 \text{ K}$ .

**Exercice 2 (Figure 1)**

Un ballon dirigeable peut être approximé par un cylindre de 60 m de long et 30 m de diamètre. Estimer le poids du gaz à l'intérieur du ballon lorsque celui-ci est à une température de 20°C:

- a) Si le gaz est de l'hélium à une pression de 1.1 atm
- b) Si le gaz est de l'air à 1 atm.

Que représente la différence entre ces deux valeurs ? ( $r_{He} = 2077 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$  et  $1 \text{ atm} = 101350 \text{ Pa}$ )

Réponse : a)  $p = 76000 \text{ N}$ , b)  $p = 501000 \text{ N}$ .

**Exercice 3 (Figure 2)**

Un fluide avec une viscosité dynamique  $\mu = 0.001 \text{ (kg/m}\cdot\text{s)}$  s'écoule sur une plaque. Déterminer le gradient de vitesse ( $dv/dy$ ) et l'intensité de la contrainte de cisaillement aux points  $y = 0, 1, 2$  et  $3 \text{ m}$ , en supposant qu'entre le point A et B :

- a) la vitesse varie de façon linéaire.
- b) la distribution de vitesse est parabolique avec un gradient de vitesse nulle au point A.

Réponse: a)  $dv/dy = 15 \text{ s}^{-1}$ ,  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = 0.0015 \text{ N/m}^2$  pour tout  $y$

b)  $dv/dy = 30, 20, 10, 0 \text{ s}^{-1}$  et  $\tau = 0.030, 0.020, 0.010, 0 \text{ N/m}^2$  pour  $y = 0, 1, 2$  et  $3 \text{ m}$  respectivement.

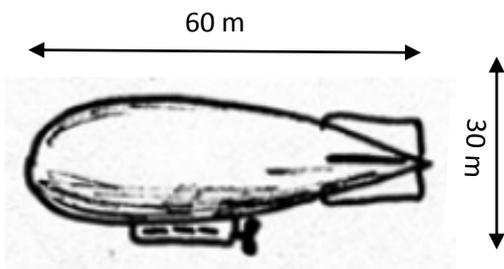


Figure 1

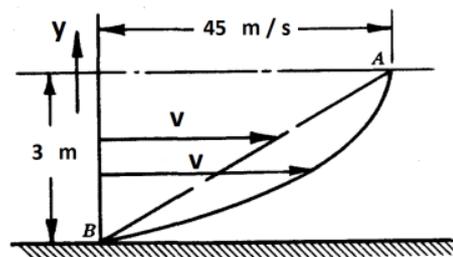


Figure 2