

## Chapitre I : Propriétés des fluides

### 1.1. Définition d'un fluide

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.

États de la matière : Il y a trois états de la matière pour un corps simple :

- solide : matériau à faible température
- liquide : matériau à température moyenne et pression suffisamment élevée
- gaz : matériau à température suffisamment élevée et à faible pression.

### 1.2. Système d'unités

Les unités de mesure utilisées dans ce document sont celles du système international (SI). Les unités principales de ce système sont rassemblées dans le tableau suivant :

**Tableau 1.1** : Principales unités dans le système international (SI)

| Longueur | Masse      | Temps   | Pression        | Force      | Energie      | Puissance    | Couple       |
|----------|------------|---------|-----------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| Mètre    | Kilogramme | Seconde | Pascal          | Newton     | Joule        | Watt         | Mètre-newton |
| (m)      | (Kg)       | (s)     | (Pa)            | (N)        | (J)          | (W)          | m.N          |
| L        | M          | T       | $ML^{-1}T^{-2}$ | $MLT^{-2}$ | $ML^2T^{-2}$ | $ML^2T^{-3}$ | $ML^2T^{-2}$ |

### 1.3. Comportement des fluides

**- Fluide Parfait - réel** : Le fluide est supposé parfait si sa viscosité est nulle. Le fluide est supposé réel si sa viscosité n'est pas nulle et qui peut donner naissance à des contraintes de cisaillement provoquées par le frottement du fluide avec la paroi de la conduite, il offre aussi une résistance au mouvement.

**-Écoulement permanent** : Un écoulement est permanent ou stationnaire si toutes les variables qui décrivent le mouvement du fluide ( $\rho$ ,  $U$ ,  $P...$ ) ne dépendent pas du temps. Dans le cas contraire l'écoulement est instationnaire ou transitoire.

**-Écoulement incompressible - compressible** :

Un fluide est incompressible si sa masse volumique  $\rho$  est constante. Dans le cas contraire l'écoulement est compressible (exemple : Un gaz qui occupe tout le volume qui l'entoure). La

majorité des fluides sont incompressibles. Dans ce cas la variation de volume est nulle : En coordonnées cartésiennes nous avons :  $\Delta V \cdot \vec{V} = \text{div} \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}$

#### 1.4. Propriétés physiques des fluides

Tous les fluides possèdent des caractéristiques permettant de décrire leurs conditions physiques dans un état donné. Parmi ces caractéristiques qu'on appelle propriétés des fluides on a :

- 1.4.1 Compressibilité
- 1.4.2 Masse volumique et densité
- 1.4.3 Poids volumique
- 1.4.4 Volume massique
- 1.4.5 Viscosité

##### 1.4.1. Compressibilité

La compressibilité est le caractère de variation de volume de fluide avec une variation de pression (dp), le volume de fluide subit une diminution de volume (dV).

L'augmentation de pression entraîne une diminution de volume.

Le coefficient de compressibilité est :  $\beta = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{dV}{dpV}$  (Pa<sup>-1</sup>) (1.1)

$\beta$  : coefficient de compressibilité (m<sup>2</sup>/N)

V : volume de fluide (m<sup>3</sup>)

dV : variation de volume (m<sup>3</sup>)

dp : variation de pression (N/m<sup>2</sup>)

##### 1.4.2. Masse volumique et densité

a) *Masse volumique* : La masse volumique  $\rho$  d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Si M est la masse d'un volume V,  $\rho$  désignant la masse volumique. Elle s'exprime en dans le système international en (kg/m<sup>3</sup>), on utilise aussi le gramme par centimètre cube (g/cm<sup>3</sup>)

Les fluides sont caractérisés par leur masse volumique  $\rho = \frac{\text{masse}}{\text{Volume}} = \frac{M}{V}$  (1.2)

M : masse du fluide (kg)

V : volume du fluide (m<sup>3</sup>)

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

**Tableau 1.2** : Valeurs de la masse volumique de quelques liquides pris à la température ordinaire

| Fluides                     | mercure | Eau de mer | Eau pure | Huile | Essence (auto) | Glycérine | Lait  |
|-----------------------------|---------|------------|----------|-------|----------------|-----------|-------|
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 13600   | 1030       | 1000     | 900   | 700            | 1260      | 1030  |
| $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 13.6    | 1.030      | 1        | 0.9   | 0.7            | 1.260     | 1.030 |

**Tableau 1.3** : Valeurs de la masse volumique de quelques solides pris à la température ordinaire

| Solides                     | Platine | Or    | Plomb | Argent | Cuivre | Aluminium | Verre ordinaire | Quartz |
|-----------------------------|---------|-------|-------|--------|--------|-----------|-----------------|--------|
| $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 21500   | 19300 | 11300 | 10400  | 8900   | 2600      | 2500            | 2650   |
| $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 21.5    | 19.3  | 11.3  | 10.4   | 8.9    | 2.6       | 2.5             | 2.65   |

b) Densité

On appelle densité d'une substance le rapport de la masse volumique du fluide rapportée à un corps de référence. C'est une grandeur sans unité définie par :

$$d = \frac{\rho}{\rho_{réf}} \quad (1.3)$$

Le corps de référence dépend de l'état physique du corps

Pour les solides et les liquides, le corps de référence est l'eau liquide, par suite la densité de l'eau liquide est **1**

Pour les gaz, le corps de référence est l'air, par suite la densité de l'air est **1**

Exemples :  $d_{eau} = \frac{1000}{1000} = 1$   $d_{acier} = \frac{7800}{1000} = 7.8$   $d_{essence} = \frac{700}{1000} = 0.7$   $d_{gaz.carbonique} = \frac{1.95}{1.3} = 1.5$

Les liquides sont caractérisés par une masse volumique relativement importante :  $\rho_{liquide} \gg \rho_{gaz}$

Pour les gaz, la masse volumique dépend de la température et de la pression.

**1.4.3. Poids volumique** (poids spécifique) :  $\varpi$  ( $\gamma$ )

Il représente la force d'attraction exercée par la terre sur l'unité de volume, c'est-à-dire le poids de l'unité de volume.

$$\varpi = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V} = \frac{\rho Vg}{V} \quad \varpi = \rho g \quad (\text{N/m}^3) \quad (1.4)$$

|   | MASSE VOLUMIQUE   | POIDS VOLUMIQUE   | DENSITE  |
|---|---|---|--|
| Relation de définition $\longrightarrow$  | $\rho = \frac{M}{V}$  | $\varpi = \frac{G}{V} = \rho.g$   | $d = \frac{\rho}{\rho_{réf}} = \frac{M}{M_{réf}} = \frac{G}{G_{réf}}$                  |
| Unités habituelles $\longrightarrow$<br>(Les unités conseillées sont encadrées) | $\boxed{\text{Kg/m}^3}$ , g/cm <sup>3</sup>                                 | $\boxed{\text{N/m}^3}$ , gf/cm <sup>3</sup>   | $\boxed{\text{Pas d'unité}}$   |
| exemples {  | 7800 kg/m <sup>3</sup><br>13600 kg/m <sup>3</sup><br>1.95 kg/m <sup>3</sup> | 7800.9,81 N/m <sup>3</sup><br>13600.9,81 N/m <sup>3</sup><br>1,95.9,81 N/m <sup>3</sup> | 7.8 [par rapport à l'eau]<br>13.6 [par rapport à l'eau]<br>1.5 8 [par rapport à l'air] |

#### 1.4.4. Volume massique (volume spécifique)

C'est le volume qu'occupe l'unité de masse d'une substance, c'est l'inverse de la masse volumique

$$V_m = \frac{V}{M} = \frac{V}{\rho V} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1.5)$$

#### 1.4.5. Viscosité

La viscosité d'un fluide est la propriété de résister aux efforts tangentiels qui tendent à faire déplacer les couches de fluide les unes par rapport aux autres. Lorsque le fluide se déplace en couches parallèles ; le facteur de proportionnalité est le coefficient de viscosité dynamique, ( $\mu$ ) et on écrit alors :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.6)$$

La viscosité cinématique,  $\nu$ , est définie comme étant le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.7)$$

Dans le système SI, l'unité de la viscosité dynamique est le (Pa.s) ou (kg/ms) ou (Pl)

Pa.s : Pascal seconde

Pl : Poiseuille avec 1 Pa.s = 1 Pl = 1kg /ms

Dans le système CGS l'unité est le Poise (Po) avec 1 Po = 10<sup>-1</sup> Pl

Dans le système SI, l'unité de la viscosité cinématique,  $\nu$ , est le (m<sup>2</sup>/s) ; dans le système CGS l'unité est le stokes où 1 stokes = 1 cm<sup>2</sup>/s = 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s 1cSt = 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s

**Tableau 1.4** : Valeurs types de la viscosité

| Fluide      | Viscosité (Pa.s)   | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|--------------------|--------------------------------------|
| Air         | 2.10 <sup>-5</sup> | 1.25                                 |
| Eau         | 10 <sup>-3</sup>   | 10 <sup>3</sup>                      |
| Huile       | 0.08               | 900                                  |
| Miel        | 10 <sup>3</sup>    | -                                    |
| bitume      | 10 <sup>8</sup>    | -                                    |
| Verre fondu | 10 <sup>12</sup>   | -                                    |

### 1.4.6. Tension de surface d'un fluide

On appelle tension de surface ou tension capillaire, cette force surfacique permettant de maintenir deux fluides en contact le long d'une interface commune. On l'a noté  $\sigma$ ;  $\sigma$  a la dimension (Pa.m), on l'exprime parfois aussi comme une énergie par unité de surface ( $J/m^2$ )

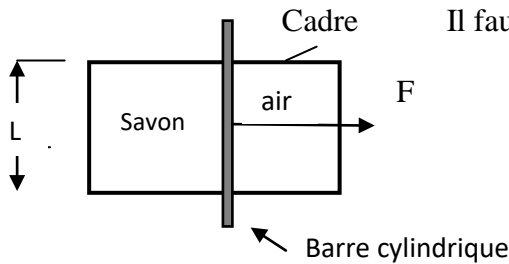
La tension de surface est une propriété des fluides qui sont attirés ou repoussés lorsqu'ils sont en contact avec un solide, un liquide ou un gaz. Cette propriété est importante puisqu'elle explique la stabilité des gouttes de pluie dans l'atmosphère, le déplacement des insectes à la surface de l'eau.

La tension de surface varie avec la température,  $\gamma$  diminue quand la température augmente jusqu'à s'annuler à la température critique.

Eau (20°C)  $\sigma=73mN/m$

Eau (80°C)  $\sigma= 62mN/m$

La valeur de la capillarité (h) dépend du diamètre du tube, du poids volumique du liquide et de sa tension superficielle.

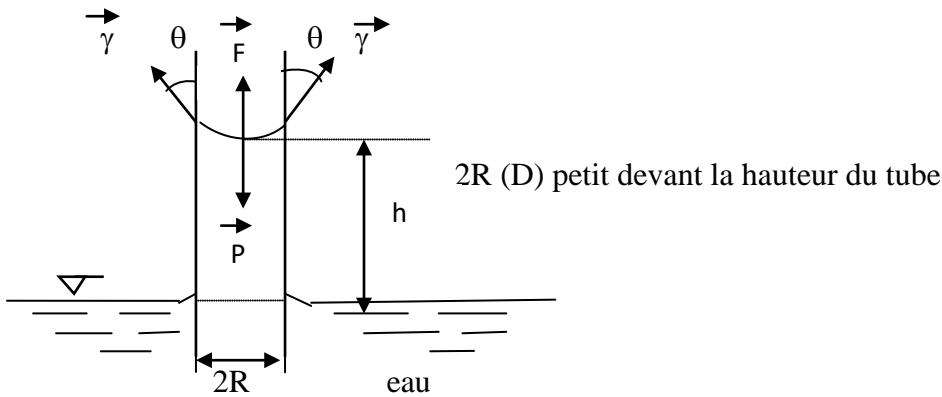


Il faut appliquer une force F pour immobiliser la barre

$$F = 2\sigma L \quad (N) \quad (1.8)$$

Force par unité de longueur

### Montée capillaire



Le poids de la colonne de liquide dans le tube :  $P = mg = \rho V g = \rho \pi R^2 h$  est équilibré par la force de tension superficielle :  $F = 2\pi R \sigma \cos \theta$  s'exerçant sur le liquide raccordant entre le liquide et la paroi du tube. On obtient ainsi la relation :

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{R \rho g} = \frac{4(\cos \theta) \sigma}{D \rho g} \quad \text{que l'on appelle loi de Jurin} \quad (1.9)$$

R : rayon intérieur du tube ;  $\rho$  : masse volumique du tube ;  $\sigma$  : tension superficielle du liquide

$\theta$  : angle de raccordement liquide/solide

$\cos\theta$  : parce que seule la composante verticale contribue à la résultante F. dans le cas d'un mouillage parfait,  $\cos\theta = 1$

Remarque : si l'angle  $\sigma$  dépasse  $90^\circ$ , la loi de Jurin donne h négatif, on parle alors de dépression capillaire, c'est le cas du mercure au contact du verre et de tous les liquides non mouillants.

Les surfaces libres du mercure et de l'eau se comportent différemment lorsqu'elles se trouvent en contact avec une surface solide. L'eau monte, par contre le mercure s'abaisse dans le tube étroit

**Tableau 1.5** : Valeurs types de la tension superficielle

| Fluide              | $\sigma$ (N/m) |
|---------------------|----------------|
| Huile               | 0.021          |
| Eau + savon         | 0.03           |
| Glycérol            | 0.063          |
| Eau                 | 0.72           |
| Mercure             | 0.5            |
| Verre fondu (1500K) | 0.3            |

La hauteur de l'ascension ou de descente capillaire dans un tube de verre de diamètre d (mm), à  $20^\circ\text{C}$  peut être déterminée à l'aide des formules empiriques suivantes :

Pour l'eau :

$$h = \frac{30}{D} (mm)$$

Pour le mercure

$$h = \frac{10,15}{D} (mm)$$

Pour l'alcool

$$h = \frac{12}{D} (mm)$$

Le tableau suivant donne les valeurs numériques de h pour différents diamètres du tube capillaire pour l'eau, le mercure et l'alcool, calculées à partir des formules empiriques ci-dessus.

**Tableau 1.6** : Montée ou descente capillaire h (mm)

| Diamètre du tube (mm) | 2    | 5   | 10   | 15   | 20   | 25   |
|-----------------------|------|-----|------|------|------|------|
| Eau                   | 15   | 6   | 3    | 2    | 1.5  | 1.2  |
| Mercure (dépression)  | 5.13 | 2.1 | 1.03 | 0.68 | 0.51 | 0.41 |
| Alcool                | 6    | 2.4 | 1.2  | 0.8  | 0.6  | 0.48 |

### 1.5. Exercices corrigés :

1. Soit un volume d'huile  $V = 6\text{m}^3$  qui pèse  $G = 47\text{KN}$ . Calculer la masse volumique, le poids spécifique et la densité de cette huile sachant que  $g = 9,81\text{ m/s}^2$ . Calculer le poids  $G$  et la masse  $M$  d'un volume  $V = 3$  litres d'huile de boîte de vitesse ayant une densité égale à 0,9

#### Solution

Masse volumique

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{47.1000}{9,81.6} = 798,5\text{ kg/m}^3$$

$$\text{Poids volumique : } \varpi = \rho g \quad \varpi = 798,5.9,81 = 7833,3\text{ N/m}^3$$

Densité

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{réf}}} \quad d = \frac{798,5}{1000} = 0,7985$$

$$\text{Poids ; } \varpi = \frac{G}{V} \quad G = \varpi.V = \rho g V = 0,9 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 26,48\text{ N}$$

$$\text{Masse : } M = \rho.V = 0,9 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 2,7\text{ kg} \quad M = \frac{G}{g} = \frac{26,48}{9,81} = 2,7\text{ kg}$$

2. Déterminer le poids volumique de l'essence sachant que sa densité  $d = 0,7$ . On donne :

- l'accélération de la pesanteur  $g = 9,81\text{ m/s}^2$  - la masse volumique de l'eau  $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$

#### Solution

$$\varpi = \rho g \quad \varpi = 0,7.1000.9,81 = 6867\text{ N/m}^3$$

3. La viscosité de l'eau à  $20^\circ\text{C}$  est de  $0,01008$  Poise. Calculer

- La viscosité absolue (dynamique)

- Si la densité est de  $0,988$ , calculer la valeur de la viscosité cinématique en  $\text{m}^2/\text{s}$  et en Stokes

#### Solution

$$1\text{ Po} = 10^{-1}\text{ Pa}\cdot\text{s} \quad \mu = 0,001008\text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \nu = \frac{0,001008}{988}$$

$$\nu = 1,02 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s} = 1,02 \cdot 10^{-2}\text{ St}$$