

CHAPITRE 1: PROPRIETES PHYSIQUES DES FLUIDES

1.1 Définition d'un fluide

Un fluide est un milieu continu, qui peut s'écouler librement par suite du peu d'adhérence entre les molécules qui le composent. Cette propriété que l'on appelle fluidité est due à une grande mobilité des particules fluides.

Un fluide n'a pas de forme, et son état englobe principalement deux catégories (états physiques) : 1) l'état liquide et 2) l'état gazeux.

Les liquides sont : considérés comme incompressibles, occupent un volume déterminé (adoptent la forme du récipient où ils sont versés), et ils produisent une surface libre en contact avec l'air,

Les gaz sont : très compressibles, n'ont pas de forme et occupent le volume maximum qui lui est offert, et ne produisent aucune surface libre avec l'air,

1.2 Système d'unité

Actuellement, il existe deux systèmes d'unités de mesure :

- Le système international (SI)*, maintenant adopté dans la plus part des pays, c'est celui qui est adopté dans ce polycopié ;
- Le système anglo-saxon (anglo-américain)*, adopté par les Etats-Unis (US) et l'Angleterre (UK), mais ce système d'unité est utilisé aussi dans certains métiers (forage, informatique)

Les unités de mesure de base des systèmes de mesures sont :

Grandeur physique	Symbole	Dimension	Unité SI	Unité Anglo-Saxonne
Longueur	L ou l	L	m : mètre	Pied (foot)
Temps	t	T	s: seconde	Seconde (second)
Masse	m	M	Kg : kilogramme	Livre (pound)
Température	T	t	°C : degré Celsius	°F : degré Fahrenheit

Les facteurs de conversion de l'unité anglo-saxonne à l'unité SI sont :

Grandeur	Unité Anglo-Saxonne	Facteur de conversion pour l'unité SI
Longueur	1 mile (mi)	1.609 Km
	1 yard (yr)	0.9144 m
	1 foot (ft)	0.3048 m
	1 inch (in)	2.54 cm
Surface	1 acre	4046 m ²
Volume	1 barrel (bbl)	158.987 L
	1 UK gallon (UK gal)	4.546 L
	1 US gallon (US gal)	3.785 L
Masse	1 UK ton	1016 Kg
	1 US ton	907 Kg
Température	1 degré Fahrenheit (°F)	$T(^{\circ}\text{F}) = 1.8 \times T(^{\circ}\text{C}) + 32$

1.3 Propriétés des liquides

1.3.1 La masse volumique (ρ , Rou)

La masse volumique (ou masse spécifique, ou densité absolue) d'un corps, quel que soit son état, est le quotient de sa masse (m) par son volume (V).

$$\rho = m/V \quad [\text{kg/m}^3]$$

Les liquides organiques comme les huiles et les alcools ont une masse volumique inférieure à celle de l'eau, alors que la masse volumique du mercure (un métal liquide) est supérieure à celle de l'eau.

✓ La masse volumique des liquides est généralement une fonction inverse de la température (à l'exception de l'eau pour une température entre 0 à 4°C).

Donc si la température augmente, la masse volumique de fluide diminue légèrement.

Tableau 1.1 Masse volumique de l'eau en fonction de la température.

T (°C)	ρ_{eau} (kg/m ³)	T (°C)	ρ_{eau} (kg/m ³)
0	999.79	50	988.04
4	999.97	60	983.13
10	999.65	70	977.70
20	998.16	80	971.81
30	995.59	90	965.34
40	992.17	100	958.40

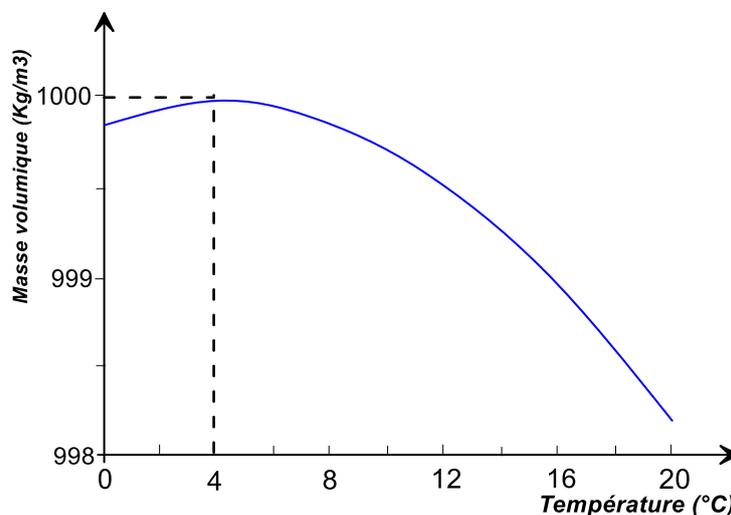


Figure 1.1 : Variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la température.

On donne ici quelques valeurs de la masse volumique de certains liquides à 20°C :

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

$$\rho_{\text{eau de mer}} = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{huile d'olive}} = 920 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{essence}} = 960 \text{ kg/m}^3$$

✓ Les gaz ont une masse volumique très faible. La masse volumique des gaz dépend en plus de la température, de l'altitude par rapport niveau de la mer.

Quelques valeurs de la masse volumique de l'air en fonction de l'altitude :

Z = 0 m	$\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$
Z = 2000 m	$\rho_{\text{air}} = 1.007 \text{ kg/m}^3$
Z = 8000 m	$\rho_{\text{air}} = 0.525 \text{ kg/m}^3$
Z = 12000 m	$\rho_{\text{air}} = 0.320 \text{ kg/m}^3$

Tableau 1.2 Quelques valeurs de la masse volumique de l'air en fonction de la température:

T (°C)	$\rho_{\text{air}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	T (°C)	$\rho_{\text{air}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$
-10	1.341	+30	1.164
-5	1.316	+40	1.127
0	1.293	+50	1.092
+5	1.269	+60	1.060
+10	1.247	+70	1.029
+20	1.204	+80	1.000

1.3.2 Le poids volumique (γ , gamma)

Le poids volumique (poids spécifique) est une notion très utile, on le définit par le rapport du poids sur le volume de la masse, ou la masse volumique multiplié par la gravité.

$$\gamma = \rho \cdot g = (m \cdot g)/V \quad [\text{N/m}^3]$$

1.3.3 La densité

La densité d'une substance est égale à la masse volumique de la substance par la masse volumique du corps de référence. Pour les liquides, la densité de l'eau est utilisée comme référence (à 4 °C $\rho_{\text{eau}} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$). Pour les gaz, les mesures s'effectuent par rapport à l'air. La densité est une grandeur physique sans dimension.

$$d = \frac{\rho_{\text{substance}} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)}{\rho_{\text{eau à 4°C}} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)} = \frac{\rho_{\text{substance}}}{1000} \quad [\text{Sans unité}]$$

1.3.4 La viscosité

La viscosité d'un fluide est sa propriété de résister aux efforts tangentiels qui tendent à faire déplacer les couches liquides les unes par rapport aux autres. C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes des fluides, elle est due à l'interaction entre les molécules des fluides. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement.

Les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement comme l'eau, alors d'autres liquides coulent difficilement comme les huiles de véhicules qui sont très visqueux.

a./ Viscosité dynamique (μ , μ)

Considérons une couche d'un fluide quelconque, retenue entre deux plaques horizontales superposées de surface « S », distants d'une espace millimétrique « Y », et dont la plaque inférieure étant immobile.

On applique sur la plaque supérieure une force « F », qui engendre une le plan supérieur est animé par une vitesse « V ».

Les plans successifs étant retenus entre eux par les forces de frottement, il s'établit entre eux une force de cisaillement « F » responsables de la diminution de la vitesse de déplacement des plans successifs d'une valeur « dv ».

Donc, à la limite inférieure (au niveau de la plaque fixe), le fluide a une vitesse nulle car il est retenue à la plaque par adhésion, et à la limite supérieure, la vitesse est maximale « V », et entre les deux plaques, la vitesse « dv » dépend de la hauteur « dy ».

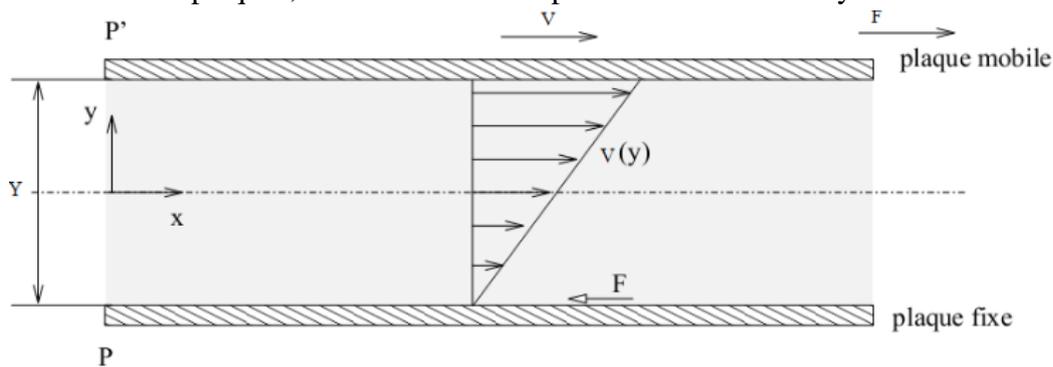


Fig. 1.2 : Comportement d'un fluide dans un écoulement laminaire entre deux plaques parallèles lorsque la plaque supérieure se déplace avec une vitesse constante.

La formule de Newton définit la viscosité dynamique « μ » comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement ($\tau = \text{Force sur Surface}$) et le gradient de vitesse (taux de déformation dv/dy).

$$\frac{V}{Y} = \frac{dv}{dy}$$

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \cdot \frac{dv}{dy}$$

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad [\text{Pa.s}] \text{ ou } [\text{Kg/m.s}] \text{ ou } [\text{N.s/m}^2]$$

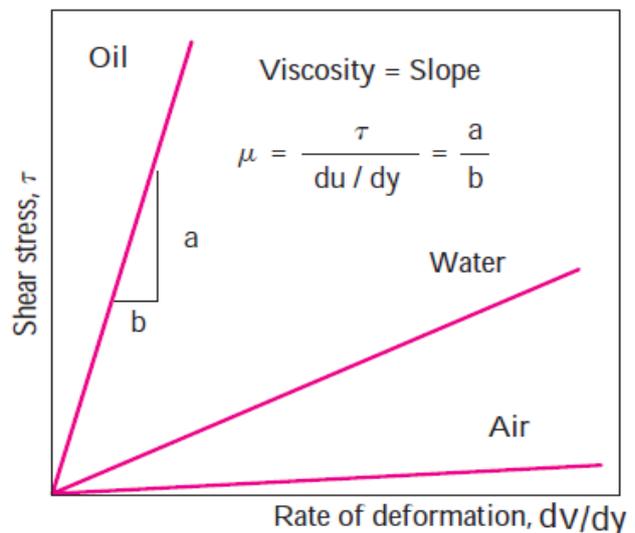


Fig. 1.3 : Contrainte de cisaillement en fonction de taux de déformation pour les fluides Newtonien

D'autre unité utilisée pour la viscosité dynamique, c'est le « poise », avec $1 \text{ Pa.s} = 10 \text{ Poise}$

Remarque :

- Les fluides Newtoniens, sont des fluides qu'ont une viscosité dynamique constante (cas de l'air, l'eau, l'huile), alors que les fluides non-newtoniens ont une viscosité dynamique variable, comme les boues, les pâtes, ...
- Les fluides parfaits ont une viscosité dynamique nulle (des fluides qui n'existent pas dans la nature).
- La viscosité existe dès qu'il y a mouvement relatif entre les particules, que ce soit en régime laminaire ou turbulent.
- La viscosité dynamique de l'eau diminue avec l'augmentation de la température.

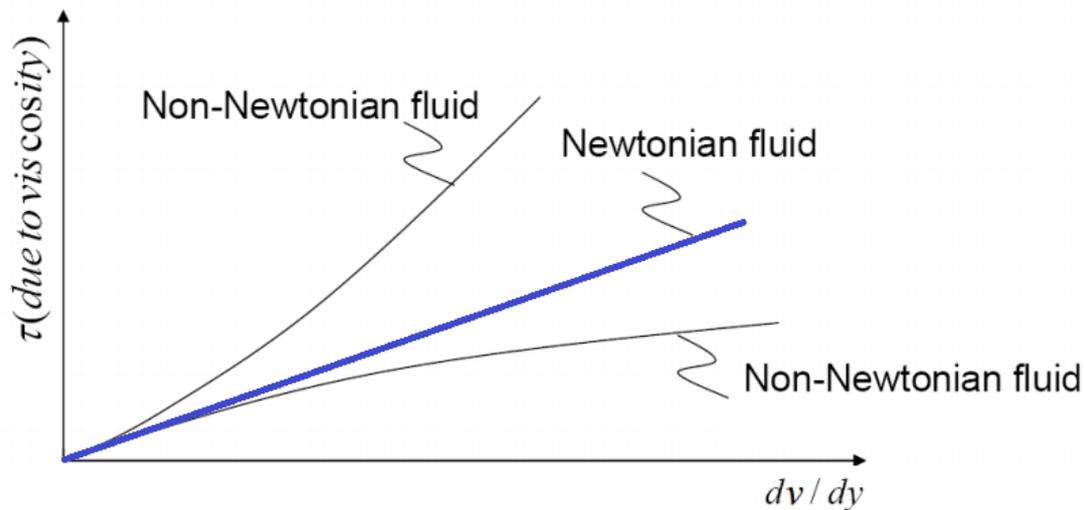


Fig. 1.4 : Variation de la viscosité d'un fluide Newtonien et non-Newtonien.

b./ Viscosité cinématique (ν, nu)

La viscosité cinématique s'obtient en divisant la viscosité dynamique par la masse volumique ρ, soit :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ [m}^2\text{/s] ou [St]} \text{ Elle peut être exprimée aussi en Stokes (St), avec } 1\text{St} = 10^{-4} \text{ m}^2\text{/s}$$

Tableau 1.3 : Quelques valeurs des viscosités dynamique et cinématiques pour différents fluides.

$\mu_{\text{eau à } 20^\circ\text{C}} = 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$	$\mu_{\text{mercure}} = 1,554 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$	$\mu_{\text{air}} = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$
$\nu_{\text{eau à } 20^\circ\text{C}} = 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$	$\nu_{\text{mercure}} = 0,1147 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$	$\nu_{\text{air}} = 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$

D'après ce tableau nous constatons :

$$\mu_{\text{mercure}} > \mu_{\text{eau}} > \mu_{\text{air}} \quad \text{et} \quad \nu_{\text{mercure}} < \nu_{\text{eau}} < \nu_{\text{air}}$$

La viscosité cinématique varie en fonction de la température suivant la relation suivante :

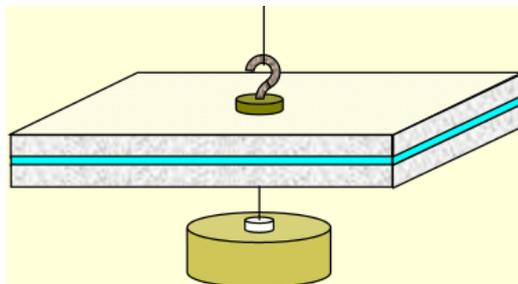
$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.003 T + 0.00022 T^2}$$

1.3.5 La tension superficielle

La tension superficielle est un phénomène physico-chimique lié aux interactions moléculaires d'un fluide. Elle résulte de l'augmentation de l'énergie à sa surface qui augmente localement par les forces d'attraction, appelées forces de cohésions.

Les forces d'attraction des molécules de deux différents liquides non-miscibles sont appelées forces d'adhésions.

Imaginons, deux plaques de verre entre lesquelles on met un mince film d'eau. La plaque inférieure peut supporter une masse de plusieurs centaines de grammes avant de tomber. Les deux plaques semblent être collées l'une à l'autre.



Certains insectes sont capables de se déplacer sur l'eau

Une pièce de monnaie flotte à la surface de l'eau

Une épingle d'acier flotte à la surface de l'eau



Fig. 1.5 : Quelques phénomènes de la tension superficielle

Les phénomènes observés dans les trois images ci-dessus sont dus à l'existence des forces à la surface libre du liquide, c'est la tension de surface. La surface libre du liquide se comporte comme une membrane élastique tendue.

La tension superficielle est une propriété des liquides qui permet de maintenir en équilibre leur surface libre.

Elle caractérise le contact entre deux fluides, généralement un liquide et un gaz. Une molécule dans un liquide immobile est soumise aux forces d'attraction de ses proches voisins.

Si cette molécule est située au sein du liquide, la résultante de ces forces est nulle. Mais si cette molécule est située en surface du liquide, la résultante est une force dirigée vers l'intérieur du liquide.

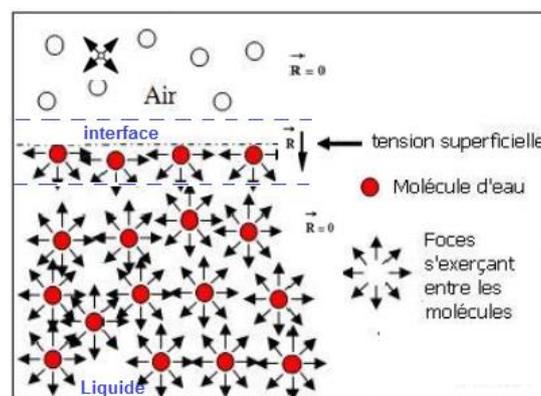


Fig. 1.6 : Schéma de la tension superficielle

1.3.5 La capillarité

Le phénomène de capillarité est un phénomène d'interaction qui regroupe l'ensemble des phénomènes qui ont lieu à la surface d'un liquide au contact d'une paroi solide.

Donc les molécules d'une surface solide attirent les molécules du liquide avec une force plus grande que celle qui existe entre les molécules du liquide (à l'exception du mercure c'est l'inverse).

Le liquide s'élève au-dessus du niveau extérieur du tube capillaire ou descend en-dessous du niveau extérieur du tube en fonction des caractéristiques du liquide (masse volumique), en fonction du diamètre de tube capillaire, et en fonction de la tension superficielle de ce liquide.

La surélévation d'eau dans le tube est appelée montée capillaire, et l'abaissement de mercure est appelée la descente capillaire.

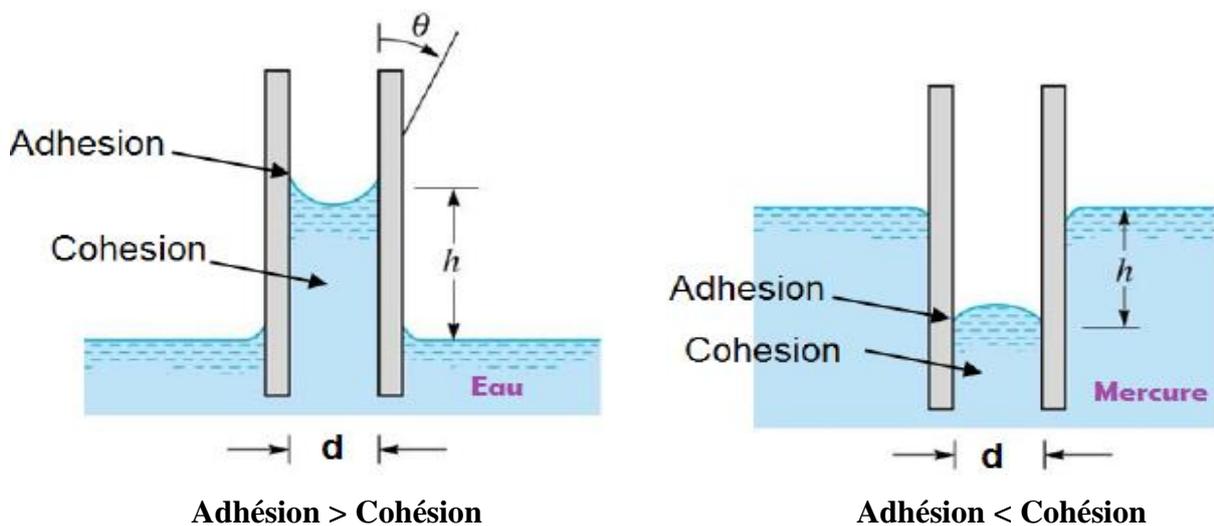


Fig. 1.7 : Phénomène de capillarité

La hauteur de l'ascension ou de descente capillaire « h » dans un tube capillaire est déterminé par la formule de *Jurin* (en mètres) :

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\gamma d}$$

Avec, θ : angle de contact entre le liquide et la surface solide en degré
 σ : tension superficielle du liquide (N/m²)
 d : diamètre interne de tube capillaire (m)

Elle peut être aussi déterminée à l'aide des formules empiriques suivantes :

Pour l'eau : $h = 30 / d$ (mm), avec d : diamètre intérieur de tube (mm) ;

Pour le mercure : $h = 30 / d$ (mm), avec d : diamètre intérieur de tube (mm) ;

Pour l'alcool : $h = 30 / d$ (mm), avec d : diamètre intérieur de tube (mm) ;