

# Mécanique des Fluides

Auteur : Noureddine AZZAM

Université Frères Mentouri – Constantine 1

Département de Génie des Transports

© 2025 Noureddine AZZAM – Licence CC BY 4.0

v1.0 14 juillet 2025



*Mécanique des Fluides – Série pédagogique  
MDF-L2-USSTC-2025*

# Table des matières

<b>Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I - INTRODUCTION A LA MECANIQUE DES FLUIDES</b>	<b>5</b>
1. La définition physique d'un fluide .....	6
2. Types de fluides .....	7
2.1. Fluide parfait .....	8
2.2. Fluide réel .....	8
2.3. Fluide compressible ou incompressible .....	8
2.4. Fluide newtonien ou non-newtonien.....	10
3. Les caractéristiques physiques des fluides .....	11
3.1. Masse volumique d'un fluide.....	11
3.2. Densité d'un fluide .....	12
3.3. Poids spécifique .....	13
3.4. Compressibilité d'un fluide .....	13
3.5. Viscosité d'un fluide .....	14
4. Tension de surface et capillarité d'un fluide .....	17
4.1. Tension superficielle sur les gouttes liquides.....	18
4.2. Tension superficielle sur un jet de liquide .....	19
4.3. Capillarité .....	20
<b>Mentions légales</b>	<b>23</b>



# Objectifs

---

À l'issue de ce cours, l'étudiant(e) sera capable de :

1. **Définir** les propriétés physiques des fluides et distinguer les différents types de fluides (**parfaits, réels, newtoniens, compressibles**, etc.).
2. **Analyser** la statique des fluides, notamment la notion de pression, la loi fondamentale de l'hydrostatique, les forces hydrostatiques et la poussée d'Archimède.
3. **Appliquer** les lois de conservation (masse, énergie) à l'étude des écoulements des fluides parfaits incompressibles, notamment via les équations d'Euler et de Bernoulli.
4. **Évaluer** les conditions d'écoulement des fluides réels en prenant en compte les effets de la viscosité, les régimes d'écoulement, les pertes de charges et les contraintes de cisaillement.
5. **Utiliser** les instruments et dispositifs de mesure des débits et des vitesses dans les conduites (**venturi-mètre, tube de Pitot**, etc.).
6. **Résoudre** des exercices concrets et des cas pratiques à travers une approche progressive et contextualisée.



# Introduction

---

La mécanique des fluides est une branche de la mécanique générale qui traite le comportement des liquides et des gaz au repos ou en mouvement, ainsi que l'étude de l'interaction de fluide avec les corps solides immersés. Elle est divisée en deux parties : statiques des fluides et dynamiques des fluides.

Ce support de cours s'articule en quatre chapitres.

Le **premier chapitre**, de ce cours concerne les propriétés des fluides. Il y est présenté la définition physique d'un fluide et les différents types de fluides tels que le fluide parfait, le fluide réel, le fluide compressible ou incompressible et le fluide newtonien ou non-newtonien. Ensuite, les types d'écoulements d'un fluide. Enfin, les différentes caractéristiques physiques des fluides comme la masse volumique, la densité, le poids spécifique, la compressibilité et la viscosité d'un fluide, ainsi que la tension de surface et capillarité d'un liquide.

Le **second chapitre** est consacré à l'étude de la statique et de la pression dans les fluides. Dans ce chapitre, les fluides au repos sont étudiés où les forces de frottement entre les molécules de fluides sont nulles. Il traite les notions de pression d'un fluide et les moyens de la mesure de pression telle que le baromètre et le manomètre. Ensuite, la loi fondamentale de la statique des fluides et le principe de Pascal. Les forces hydrostatiques sur les surfaces immergées, ainsi que la force d'Archimède seront aussi abordées.

La dynamique des fluides parfaits incompressibles sera présentée dans le **chapitre trois**. Elle étudie les fluides parfaits incompressibles (ou non-visqueux) en mouvement. Ce chapitre présente les lois fondamentales de conservation de masse et les débits volumiques et massiques. Ensuite, les équations du mouvement d'Euler et de Bernoulli seront détaillées avec et sans échange de travail. Enfin, de nombreuses applications de l'équation de Bernoulli aux mesures des débits et des vitesses seront présentées telles que le venturi-mètre, le diaphragme, tube de Pitot et la vidange d'un réservoir.

Le **dernier chapitre** de ce cours met en évidence la dynamique des fluides réels incompressibles. Dans ce chapitre, les forces de frottement, les contraintes de cisaillement et la viscosité, sont considérées. Il introduit l'expérience de Reynolds. Ensuite, le régime d'écoulement, ainsi que les pertes de charges linéaires dans les conduites et les pertes de charges singulières dans les réseaux de conduites. Enfin, le théorème de Bernoulli généralisé à un fluide réel sera abordé.

Chaque chapitre de ce cours contient de nombreux exercices corrigés d'une façon détaillée qui permettront ainsi aux étudiants d'appliquer leurs connaissances théorique.

# INTRODUCTION A LA MECANIQUE DES FLUIDES



## 1. Introduction

La Mécanique Des Fluides (M.D.F) est une discipline vaste de la mécanique appliquée qui s'intéresse au comportement des liquides et des gaz au repos ou en mouvement, ainsi que l'étude de l'interaction de fluide avec les corps solides immersés. Elle couvre une large gamme de phénomènes qui se produisent dans la nature (**météos, vagues, vents, ...**), en biologie (**corps humain, coeurs, poumons, ...**), et dans de nombreux domaines pratiques de l'ingénierie (**automobiles, bateaux, machines hydrauliques, ...**).

D'autre part, la mécanique des fluides est basée sur les mêmes principes utilisés dans la mécanique des solides. Ainsi, c'est un domaine de la mécanique des milieux continus qui étudie les écoulements de fluides lorsqu'ils sont soumis à des forces ou des contraintes. L'M.D.F est la base de plusieurs disciplines modernes de *l'hydraulique, l'aérodynamique, l'hydrodynamique, l'énergétique, etc.*

Ses applications technologiques couvrent différents domaines tels que **l'architecture navale, l'aéronautique, l'automobile, l'industrie pétrolière et énergétique, l'environnement, le biomédical, etc.**

Par conséquent, il est important de développer et de bien comprendre les principes fondamentaux de la mécanique des fluides. La mécanique des fluides peut être subdivisée en deux grandes parties principales (*Voir la Figure I.1*) :

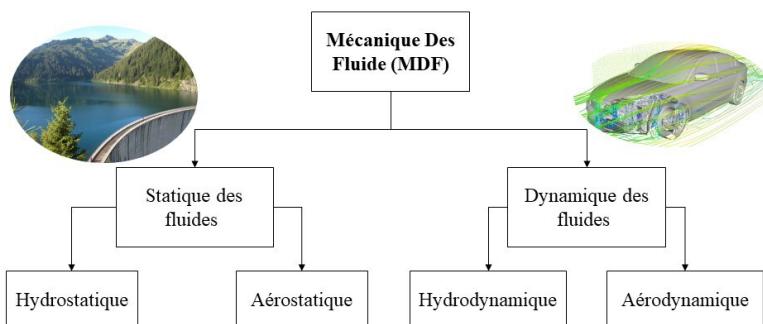


Image 1   Figure I. 1. Les branches principales de la mécanique des fluides

- **Statique des fluides :**

La statique des fluides traite les lois de comportement des liquides (hydrostatique) et des gaz (aérostatique) au repos ou uniformément accélérés,

- **Dynamique des fluides :**

La dynamique des fluides traite les lois de comportement des liquides (hydrodynamique) et des gaz (aérodynamique) en mouvement.

## 2. La définition physique d'un fluide

### États de la matière

Généralement en physique, il y a trois états de la matière pour un corps simple tels que l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux (Voir la figure I.2)



Image 2 Figure I. 2. États de la matière

Toute matière se trouvant à l'état liquide ou gazeux est dite fluide. Les forces de cohésion entre les molécules de liquide sont relativement faibles. Dans le cas du gaz, les forces de cohésion entre les molécules sont quasi inexistantes.

#### Exemple

Liquides	Gaz
Eau	Air
Essence	Oxygène
Huile	Hydrogène

Tableau 1 Tableau I. 1. Exemple de quelques fluides

#### Conseil

Les principales différences existant entre un liquide et un gaz peuvent être résumées dans le tableau I.2 et la figure I.3 :

Liquides	Gaz
Incompressible	Compressible
Occuper un volume bien défini	Occuper tout le volume du récipient
Présenter une surface libre	Aucune surface libre

Tableau 2 Tableau I. 2. Les principales différences entre un liquide et un gaz

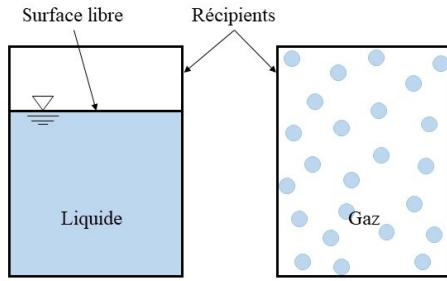


Image 3 Figure I. 3. Caractéristiques du liquide et du gaz

### Complément

Un fluide est considéré comme une matière dans la phase liquide ou gaz. C'est un corps physique facilement à déformer sous l'action d'un effort de cisaillement même très faible. D'autre part, le fluide est un milieu continu, et se caractérise par sa capacité à s'écouler. Par conséquent, le fluide n'a pas de forme fixe, sa forme dépend de la forme du récipient qui le contient voir la figure I.4.

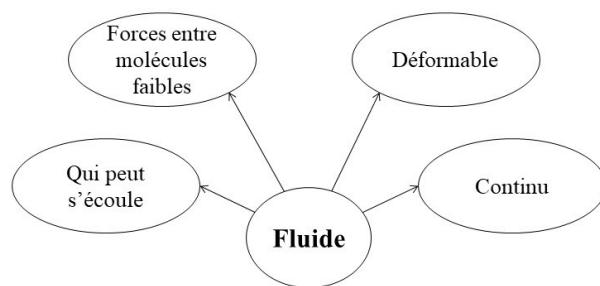


Image 4 Figure I. 4. Quelques caractéristiques des fluides

## 3. Types de fluides

Les fluides peuvent être classés en quatre types suivants : fluide parfait, fluide réel, fluide compressible ou incompressible et fluide newtonien ou non-newtonien.

### 3.1. Fluide parfait



Généralement, un fluide est considéré comme parfait (idéal, non-visqueux), s'il est possible de décrire son mouvement sans tenir en considération les effets de la force de frottement entre les molécules de fluide. La viscosité de ce type de fluide est supposée nulle. Dans la nature, un fluide parfait est inexistant, il est pris souvent pour simplifier les calculs.



Par exemple, l'eau est plus proche de la définition d'un fluide parfait que l'huile.

### 3.2. Fluide réel



Contrairement à un fluide parfait, dans un fluide réel en mouvement les effets de la force de frottement entre les molécules sont pris en compte. Tous les fluides, en réalité, sont des fluides réels la viscosité de ce type de fluide est différente de zéro. Dans le cas d'un fluide réel au repos, qu'on considère que le fluide réel se comporte comme un fluide parfait.

### 3.3. Fluide compressible ou incompressible

#### a) Fluide compressible



Un fluide compressible est un fluide qui peut être changé son volume occupé avec la pression extérieure. Ainsi, dans ce type de fluide, sa masse volumique est variable. Comme déjà dit précédemment, un fluide est constitué de liquide ou de gaz. Les gaz sont des fluides compressibles (Voir la figure I.5).

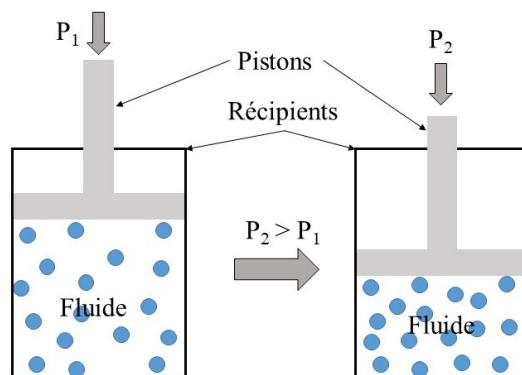


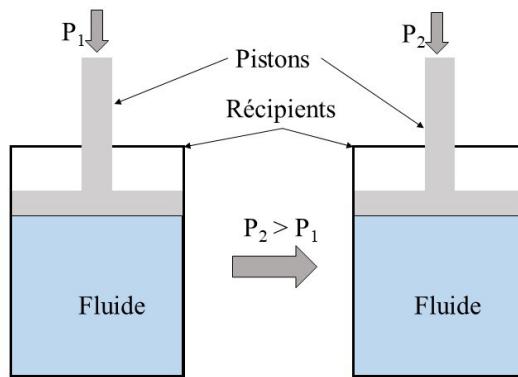
Image 5   Figure I. 5. Un fluide compressible

? **Exemple**

- L'air,
- L'hydrogène,
- L'azote,
- Le méthane à l'état gazeux.

**b) Fluide incompressible**
? **Définition**

Un fluide incompressible ou isovolume (toujours le même volume) est un fluide qui ne peut pas être changé son volume occupé avec la pression extérieure. Ainsi, dans ce type de fluide, sa masse volumique est considérée comme constante. Dans réalité, il n'y a pas des fluides incompressibles, certains plus que d'autres. À cet effet, les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (Voir la figure I.6).



*Image 6    Figure I. 6. Un fluide incompressible*

? **Exemple**

- L'eau,
- L'huile,
- Le mercure,
- L'essence.

### 3.4. Fluide newtonien ou non-newtonien

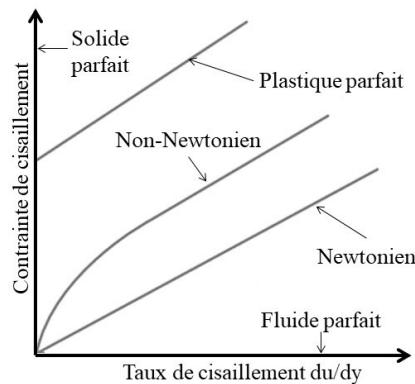


Image 7 Figure I. 7. Les fluides newtoniens et non-newtoniens

#### a) Fluide newtonien



**Définition**

D'après Isaac Newton<sup>1</sup>, les fluides newtoniens sont des fluides réels dans lesquels la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement sont reliés linéairement par la viscosité voir la figure I.7.



**Exemple**

- L'air,
- Les gaz,
- L'eau,
- L'essence,
- Le pétrole.

#### b) Fluide non-newtonien



**Définition**

Les fluides non-newtoniens sont des fluides réels dans lesquels la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement ne sont pas reliés linéairement avec la viscosité voir la figure I.7. Dans ce cours, ne traite que les fluides newtoniens.



**Exemple**

- Le sang,
- Les gels,
- La colle,
- La mayonnaise,

<sup>1</sup> file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%201.docx#\_ftn1

- Le dentifrice,
- Le goudron,
- La peinture,
- Le mélanger l'eau avec la féculle de maïs,
- Les pâtes,
- Les boues.

## 4. Les caractéristiques physiques des fluides

Il existe plusieurs caractéristiques et propriétés de chaque type de fluide telles que :

1. la masse volumique,
2. la densité,
3. le poids spécifique,
4. la compressibilité,
5. la viscosité d'un fluide.

### 4.1. Masse volumique d'un fluide



Définition

La masse volumique ou spécifique d'un fluide est une grandeur physique, qui caractérise la masse d'un fluide par unité de volume ou la masse d'un mètre cube de ce fluide. Elle est peut-être écrite comme suite :

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

*Formule 1*

Où :

$\rho$  : la masse volumique d'un fluide en  $\text{kg/m}^3$ ,

$m$  : la masse d'un fluide en kg,

$V$  : le volume d'un fluide en  $\text{m}^3$ .



Complément

Généralement, la masse volumique du fluide dépend de la température et de la pression. Dans les gaz, la masse volumique est proportionnelle à la pression et inversement proportionnelle à la température. D'autre part, les liquides sont des fluides incompressibles, et la variation de leur masse volumique avec la pression est très faible. Ainsi, la masse volumique des liquides dépend beaucoup plus de la température que de la pression (Voir le tableau I.3).

Fluides	Température	Pression	La masse volumique kg/m <sup>3</sup>
Eau	5 C°	1 atm	1000
	20 C°		998,2
		100 atm	1003
Air	70 C°	1 atm	977,8
	0 C°		1,292
			1,204
Oxygène	20 C°	1 atm	1,33
Mercure			13600

Tableau 3 Tableau I. 3. La masse volumique de certains fluides

D'autre part, l'inverse de la masse volumique par unité de masse est appelée le volume spécifique (volume massique) est définie par la relation suivante :

$$V_s = \frac{1}{\rho}$$

Formule 2

Où :

$V_s$  : le volume spécifique d'un fluide en m<sup>3</sup>/kg.

Le tableau I.4 présente le volume spécifique de certains fluides à la pression atmosphérique ( $P = 1\text{atm} = 101325.1\text{Pa}$ ).).

Fluides	Température	Le volume spécifique m <sup>3</sup> /kg
Air	20 C°	0,831
Oxygène		0,752
Eau	5 C°	1,00E-03
	20 C°	1,00E-03
Mercure		7,353E-05

Image 8 Tableau I. 4. Le volume spécifique de certains fluides à la pression atmosphérique

## 4.2. Densité d'un fluide



La densité (ou densité relative) d'un fluide est définie comme étant le rapport de la masse volumique du fluide par celle de fluide de référence. Dans le cas, des liquides, on prendra l'eau comme fluide de référence et pour les gaz, on prendra l'air. Ainsi, la densité est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité définie par la relation suivante :

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

Formule 3

Où :

d : la densité d'un fluide sans unité,

$\rho_{ref}$  : la masse volumique d'un fluide de référence en kg/m<sup>3</sup> pour les liquides  $\rho_{ref} = 1000 \text{ kg/m}^3$  et pour les gaz  $\rho_{ref} = 1.204 \text{ kg/m}^3$ .



Le tableau I.5 donne quelques valeurs de la densité pour différents fluides à la pression atmosphérique ( $P = 1\text{atm}$ ).

Fluides	Densité
Eau	1
Air	1
Oxygène	1,105
Mercure	13,6

Tableau 4 Tableau I. 5. La densité de quelques fluides

### 4.3. Poids spécifique



Le poids spécifique ou poids volumique d'un fluide est défini comme son poids par l'unité de volume. Ainsi, le poids spécifique est lié à la masse volumique à travers la relation suivante :

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

Formule 4

Où :

$\gamma$  : le poids spécifique d'un fluide en N/m<sup>3</sup>,

$g$  : l'accélération de la pesanteur en m/s<sup>2</sup> égal 9.807 m/s<sup>2</sup>,



Le tableau I.6 donne quelques valeurs de poids spécifique pour différents fluides fréquemment utilisés.

Fluides	Poids spécifique N/m3
Eau	9789
Air	11,81
Oxygène	13,04
Mercure	133375

Tableau 5 Tableau I. 6. Le poids spécifique de quelques fluides

### 4.4. Compressibilité d'un fluide



La compressibilité isotherme (toujours la même température) est une caractéristique des fluides. Elle est représentée le changement relatif de volume sous l'action d'une pression appliquée, à température constante. La valeur de compressibilité est très grande dans les gaz par rapport aux liquides. (Voir le tableau I.8).

La compressibilité est exprimée par la relation suivante :

$$\chi_T = \frac{-1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

Formule 5

Où :

$\chi_T$  : la compressibilité isotherme d'un fluide en Pa<sup>-1</sup> ou m<sup>2</sup>/N,

$\partial V$  : le changement de volume d'un fluide en m<sup>3</sup>,

$\partial P$  : la variation de la pression appliquée en Pa ou N/m<sup>2</sup>.

T : l'indice de la dérivée indique que la dérivée partielle est prise à température constante.

En général, la compressibilité d'un fluide est toujours positive. Par conséquent, le signe moins doit être placé parce que l'accroissement de pression entraînera une diminution de volume (Voir la figure I.8).

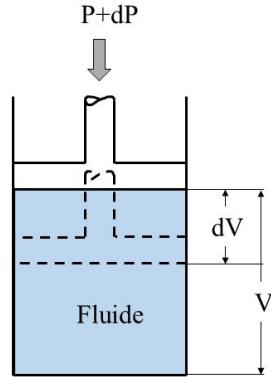


Image 9 Figure I. 8. La compressibilité d'un fluide

D'autre part, la compressibilité d'un fluide peut être écrite aussi en fonction de la masse volumique par relation suivante :

$$\chi_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T$$

Formule 6

Où :

$\partial \rho$  : la variation de la masse volumique d'un fluide en  $\text{kg/m}^3$ ,

### Exemple

Le tableau I.7 montre les valeurs de compressibilité de quelques fluides.

Fluides	Compressibilités
Eau	4,6E-10
Mercure	4,40E-10
Air	1E-05

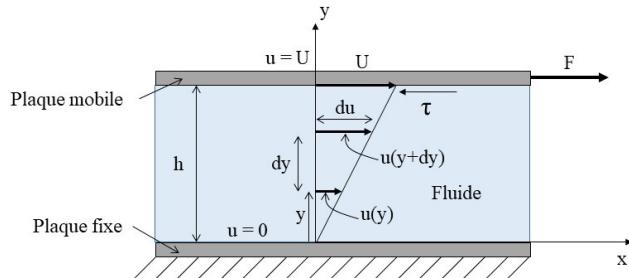
Tableau 6 Tableau I. 7. La compressibilité de quelques fluides

## 4.5. Viscosité d'un fluide

### Définition

La viscosité est la propriété qui exprime la quantité de résistance interne d'un fluide à l'écoulement. Elle est liée au frottement entre les molécules du fluide en mouvement. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler facilement diminue.

On considère deux plaques parallèles très larges à une faible distance l'une de l'autre,  $h$ . Un fluide visqueux rempli l'espace entre les deux plaques, l'une fixe et l'autre mobile. Sous l'effet de la force  $F$ , la plaque supérieure se déplace à une vitesse constante  $U$  (Voir la figure I.9).



*Image 10    Figure I. 9. Le comportement d'un fluide entre deux plaques*

La force  $F$  induit une contrainte de cisaillement ou contrainte de frottement,  $\tau$ . Cette contrainte est opposée au mouvement du fluide, elle est définie par la relation suivante :

$$\tau = \frac{F}{A}$$

*Formule 7*

Où :

$\tau$  : la contrainte de cisaillement en  $N/m^2$  ou  $Pa$ ,

$F$  : la force appliquée sur la plaque en  $N$ ,

$A$  : la surface de contact entre la plaque et le fluide en  $m^2$ .

Le fluide qui contacter la plaque mobile se déplace à la même vitesse de la plaque  $U$ , et le fluide qui touche la plaque fixe à une vitesse nulle. Par contre, le fluide entre les deux plaques se déplace en couches parallèle avec une distribution de vitesse linéaire. Dans ce cas, la vitesse de fluide est variée en fonction de  $y$ , selon la relation  $u = Uy/h$  comme montré sur la figure I.9. Ainsi, un gradient de vitesse  $du/dy$ , est développé dans le fluide entre les deux plaques. Ce gradient est constant dans le cas d'écoulement laminaire puisque  $du/dy = U/h$ . On remarque qu'il existe une proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse de l'écoulement du fluide. Cette proportionnalité est représenté le coefficient de viscosité  $\mu$  (viscosité dynamique), du fluide. La loi de viscosité de Newton est définie par la relation suivante :

$$\tau = \mu \left| \frac{du}{dy} \right|$$

*Formule 8*

Où :

$\mu$  : la viscosité dynamique ou coefficient de viscosité d'un fluide en  $Pa.s$  ou  $kg/m.s$ ,

$du/dy$  : le gradient de vitesse ou la vitesse de cisaillement ou le taux de cisaillement.

Généralement, l'unité de la viscosité dynamique dans le système international est le Pascal seconde Pa.s ou Poiseuille[1]<sup>2</sup> (Pl) et dans l'ancienne unité du système CGS (Centimètre, Gramme, Seconde) sont encore utilisées comme la Poise (Po) de sorte que :

- 1 Pa.s = 1 Pl = 1 kg/m.s = 10 Po.

### Exemple

Le tableau I.8 donne quelques valeurs de viscosité dynamique des fluides couramment utilisés.

Fluides	Viscosité dynamique Pa.s
Eau	1,00E-03
Air	1,82E-05
Mercure	1,50E-03
Oxygène	2,04E-05

Tableau 7 Tableau I. 8. La viscosité dynamique de quelques fluides

### Complément

La viscosité  $\mu$  est appelée la viscosité dynamique ou la viscosité absolue. Il existe une autre mesure de la viscosité appelée la viscosité cinématique. Cette viscosité est définie comme étant le rapport de la viscosité dynamique et la masse volumique. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma}$$

Formule 9

Où :

$\nu$  : la viscosité cinématique de fluide en  $m^2/s$ .

### Remarque

Dans le système international, l'unité de la viscosité cinématique est le  $m^2/s$  et dans le système d'unités CGS, 1cm<sup>2</sup>/s est équivalent 1 Stokes de sorte que :

- 1 St = 1 cm<sup>2</sup>/s = 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s.

### Exemple

Le tableau I.9 donne quelques valeurs de viscosité cinématique pour des fluides couramment utilisés.

Fluides	Viscosité cinématique m <sup>2</sup> /s
Eau	1,004E-06
Air	1,51E-05
Mercure	1,15E-07
Oxygène	1,53E-05

Tableau 8 Tableau I. 9. La viscosité cinématique de quelques fluides

La viscosité d'un fluide, généralement, ne dépend que de la température. Dans les liquides, la viscosité est inversement proportionnelle à la température. À cause de l'augmentation de la température, les forces de cohésion entre les molécules diminuent, et donc la viscosité de liquide diminue. Par contre, la viscosité des gaz est proportionnelle à la température. Parce que l'augmentation de la température va augmenter la quantité de mouvement des molécules. À cet effet, le taux de collision, les forces de frottement et les contraintes de cisaillement entre ces molécules augmentent, et donc la viscosité augmente (Voir la figure I.10).

<sup>2</sup>.file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%201.docx#\_ftn1

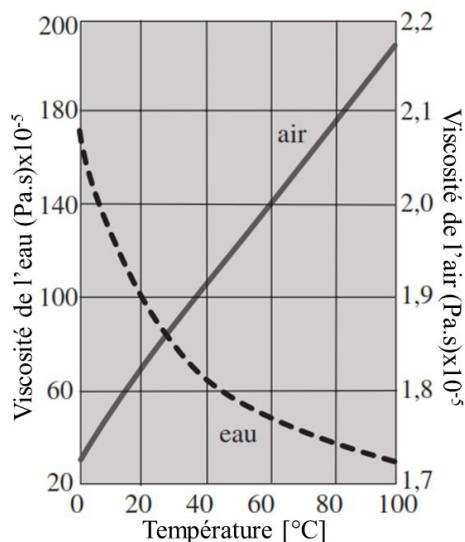


Image 11    Figure I. 10. L'effet de la température sur la viscosité

## 5. Tension de surface et capillarité d'un fluide



La tension de surface (ou superficielle) d'un fluide est définie comme la force de traction agissant au niveau de l'interface d'un liquide et un gaz ou à l'interface de deux liquides non-miscibles, de telle sorte que l'interface de contact se comporte comme une membrane tendue.



Le phénomène de la tension superficielle est un phénomène physico-chimique du liquide et du gaz expliqué par la figure I.11. Considérons deux molécules A et B dans un liquide immobile. La molécule A est complètement immergée dans le liquide, de sorte qu'elle est attirée dans toutes les directions par les molécules environnantes du liquide. À cet effet, la force résultante nette intermoléculaire agissant sur la molécule A est nulle. Mais la molécule B, située en la surface du liquide, subit une force résultante nette dirigée vers le bas. Toutes les molécules à la surface libre sont soumises à une force dirigée vers le bas. Cette force est équilibrée par la force de tension superficielle. Ainsi, la surface libre du liquide agit comme un film très mince sous la tension de la surface du liquide, agissant comme s'il s'agissait d'une membrane élastique étirée.

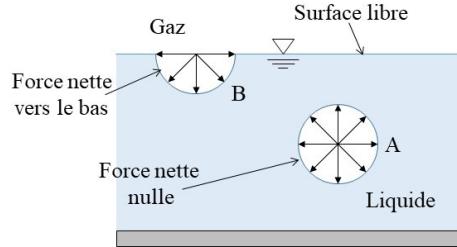


Image 12 Figure I. 11. Tension de surface d'un fluide

L'unité de tension superficielle dans le système SI on l'exprime en N/m. Le tableau I.10 donne quelques valeurs numériques de tension de surface des fluides couramment utilisées en contact avec l'air.

Fluides	Tension superficielle
Eau	0,073
Mercure	0,440
Huile	0,035

Tableau 9 Tableau I. 10. La tension superficielle de quelques fluides

## 5.1. Tension superficielle sur les gouttes liquides

Considérons une petite goutte de liquide en forme sphérique d'un diamètre D. Sur toute la surface de la goutte, il existe une force de traction liée à la tension superficielle. Soit  $\sigma$  la tension superficielle du liquide et P la pression à l'intérieur de la goutte. Si on divise la goutte en deux parties, comme indiqué sur la figure I.12 (a).

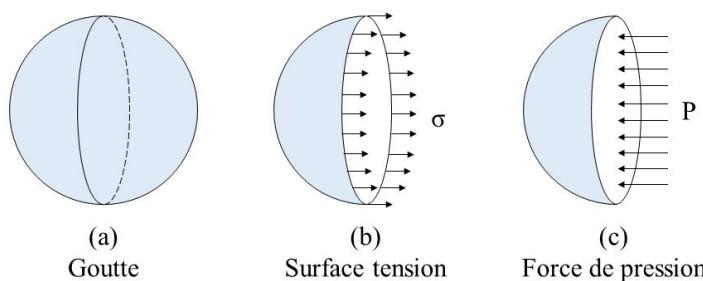


Image 13 Figure I. 12. Tension superficielle sur la goutte de liquide

Les forces agissant sur la partie gauche de demi-sphère de la goutte sont :

1. La force de traction liée à la tension superficielle agissant autour de la circonférence de la partie coupée, comme le montre la figure I.12(b) est égale à :

$$F_1 = \sigma \cdot \pi \cdot D$$

2. La force de pression intérieure sur la surface comme indiquée sur la figure I.12 (c) est égale à :

$$F_2 = P \cdot A = P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Les forces de pression et de tension superficielle ( $F_1$  et  $F_2$ ) sont égales et opposées. L'équilibre des forces donne :

$$F_1 = F_2$$

$$\sigma \cdot \pi \cdot D = P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

On simplifiant l'équation précédente, on trouve :

$$P = \frac{4 \cdot \sigma}{D}$$

*Formule 10*

Où :

P : la pression à l'intérieur de la goutte en Pa ou N/m<sup>2</sup>,

$\sigma$  : la tension superficielle du liquide en N/m,

D : le diamètre de la goutte en m.

L'équation (I-10) est appelée la loi de Young<sup>3</sup>-Laplace<sup>4</sup> et elle montre que la pression à l'intérieur d'une goutte liquide est inversement proportionnelle au diamètre de la goutte.

## 5.2. Tension superficielle sur un jet de liquide

Considérons un jet de liquide de diamètre D et de longueur L, comme le montre la figure I.13. Soit P, la pression à l'intérieur du jet de liquide au-dessus de la pression extérieure et  $\sigma$  la tension superficielle du liquide.

<sup>3</sup>. file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycoopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%201.docx#\_ftn1  
<sup>4</sup>. file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycoopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%201.docx#\_ftn2

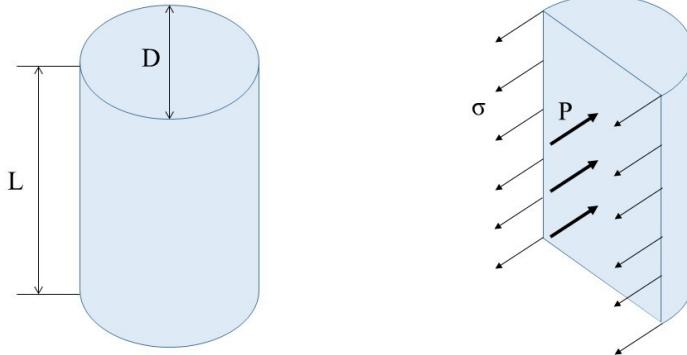


Image 14   Figure I. 13. Tension superficielle sur jet de liquide

Les forces agissant sur le semi-jet de liquide sont :

1. La force liée à la pression est :

$$F_1 = P \cdot L \cdot D$$

2. La force liée à la tension superficielle est :

$$F_2 = 2 \cdot \sigma \cdot L$$

En l'équilibre le semi-jet de liquide, on trouve :

$$F_1 = F_2$$

$$P \cdot D \cdot L = 2 \cdot \sigma \cdot L$$

On simplifiant l'équation précédente, on trouve :

$$P = \frac{2\sigma}{D}$$

Formule 11

Où :

P : la pression à l'intérieur du jet de liquide en Pa ou N/m<sup>2</sup>,

D : le diamètre de jet de liquide en m.

### 5.3. Capillarité

La capillarité est définie comme un phénomène de montée ou de descente d'une surface liquide dans un petit tube par rapport au niveau de la surface libre de liquide lorsque le tube est maintenu verticalement dans le liquide. La surélévation de la surface du liquide est connue sous le nom la montée capillaire (hauteur de capillarité) alors que la descente de la surface du liquide est appelée dépression capillaire (descente capillaire). Il est exprimé en termes de cm ou mm de liquide. Sa valeur dépend du poids spécifique du liquide, du diamètre du tube et de la tension superficielle du liquide.

#### a) La montée capillaire

Considérons un tube transparent en verre de petit diamètre D ouvert aux deux extrémités et inséré dans un liquide, par exemple de l'eau comme le montré la figure I.14. Le liquide montera dans le tube au-dessus du niveau du liquide. Dans un état d'équilibre, le poids du liquide de hauteur h est compensé par la force à la surface du liquide dans le tube. Mais la force à la surface du liquide dans le tube est liée à la tension de surface.

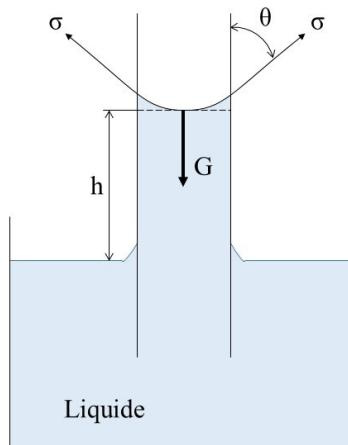


Image 15   Figure I. 14. Montée capillaire

Le poids du liquide de hauteur  $h$  dans le tube est.

$$G = A \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

Formule 12

Où :

$G$  : le poids de liquide en N,

$h$  : la hauteur de liquide dans le tube en m.

D'autre part, la composante verticale de la force de traction de surface :

$$F = \sigma \cdot \pi \cdot D \cdot \cos(\theta)$$

Formule 13

Où :

$D$  : le diamètre de tube en m,

$\theta$  : l'angle de contact entre le liquide et le tube en degrés.

En l'équilibrant les deux forces, on obtient :

$$F = G$$

$$\sigma \cdot \pi \cdot D \cdot \cos(\theta) = A \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

On remplaçant la surface  $A$  par  $\pi D^2/4$  et après simplification, on trouve l'expression de la hauteur de remontée d'eau dans le capillaire :

$$h = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{\rho \cdot g \cdot D}$$

La valeur de l'angle  $\theta$  entre l'eau et le tube de verre propre est approximativement égale à  $0^\circ$  et donc  $\cos(\theta)$  est égal à 1. Puis la montée de l'eau est donnée par la relation suivante :

$$h = \frac{4 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot D}$$

Formule 14

Où :

$h$  : la hauteur de liquide dans le tube en m,

$D$  : le diamètre de tube en m.

L'équation I-14 montre que la capillarité d'un liquide dépend de diamètre de tube, de la tension superficielle, le poids spécifique d'un liquide.

## b) La descente capillaire

Si le tube transparent est immergé dans du mercure, le niveau de mercure dans le tube sera inférieur au niveau de la surface libre du mercure extérieur, comme le montre la figure I.15.

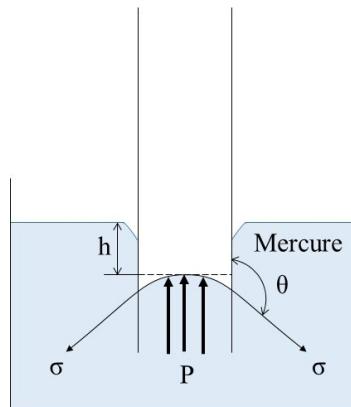


Image 16   Figure I. 15. Dépression capillaire

Dans l'état d'équilibre, deux forces agissant sur le mercure à l'intérieur de tube :

- La force due à la tension superficielle agissant dans le sens descendant est égale :

$$F_1 = \sigma \cdot \pi \cdot D \cdot \cos(\theta)$$

- La force due à la force hydrostatique agissant vers le haut est égale :

$$F_2 = P \cdot A = \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

En assimilant les deux forces, on obtient :

$$F_1 = F_2$$

$$\sigma \cdot \pi \cdot D \cdot \cos(\theta) = \rho \cdot g \cdot h \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Après simplification, on trouve l'expression de la profondeur de descente de mercure dans le capillaire :

$$h = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{\rho \cdot g \cdot D}$$

La valeur de l'angle  $\theta$  pour le mercure en contact avec le verre propre est de  $130^\circ$ .

### Exemple

Le tableau I.11 donne les valeurs de la hauteur de capillaire,  $h$ , pour différents diamètres du tube capillaire pour quelques liquides en contact avec l'air.

Diamètre de tube D (mm)	Eau	Mercure	Kérosène	Alcool
2	14,88	-4,24	6,26	6,00
5	5,95	-1,70	2,50	2,40
10	2,98	-0,85	1,25	1,20
15	1,98	-0,57	0,83	0,80

Tableau I. 11. Montée ou descente capillaire

# Mentions légales



Ce module est publié sous licence **Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)**

Vous êtes autorisé à copier, distribuer, modifier et utiliser ce contenu à condition d'en attribuer la paternité à l'auteur : **Noureddine AZZAM – Université Frères Mentouri Constantine 1.**