

Statique & Cinématique des fluides

Chapitre 1

Définitions et propriétés des fluides

Objectifs

Au terme de ce chapitre, l'étudiant doit être capable de :

- Définir les différents types des fluides ;
- Connaître les propriétés physiques d'un fluide.

Introduction:

La mécanique des fluides est une science de la mécanique appliquée qui étudie le comportement des fluides (liquides et gaz) au repos et en mouvement et les forces internes associées. Son importance s'explique par le fondement théorique qu'elle offre à de nombreuses disciplines - le génie des procédés, le génie énergétique, le génie environnemental, le génie naval, le génie civil, l'agriculture, l'agroalimentaire, ce qui indique l'ampleur de son champ d'investigation.

La mécanique des fluides comprend deux grandes sous branches:

□ **La statique des fluides**, ou hydrostatique qui étudie les fluides au repos. C'est historiquement le début de la mécanique des fluides, avec la poussée d'Archimède et l'étude de la pression.

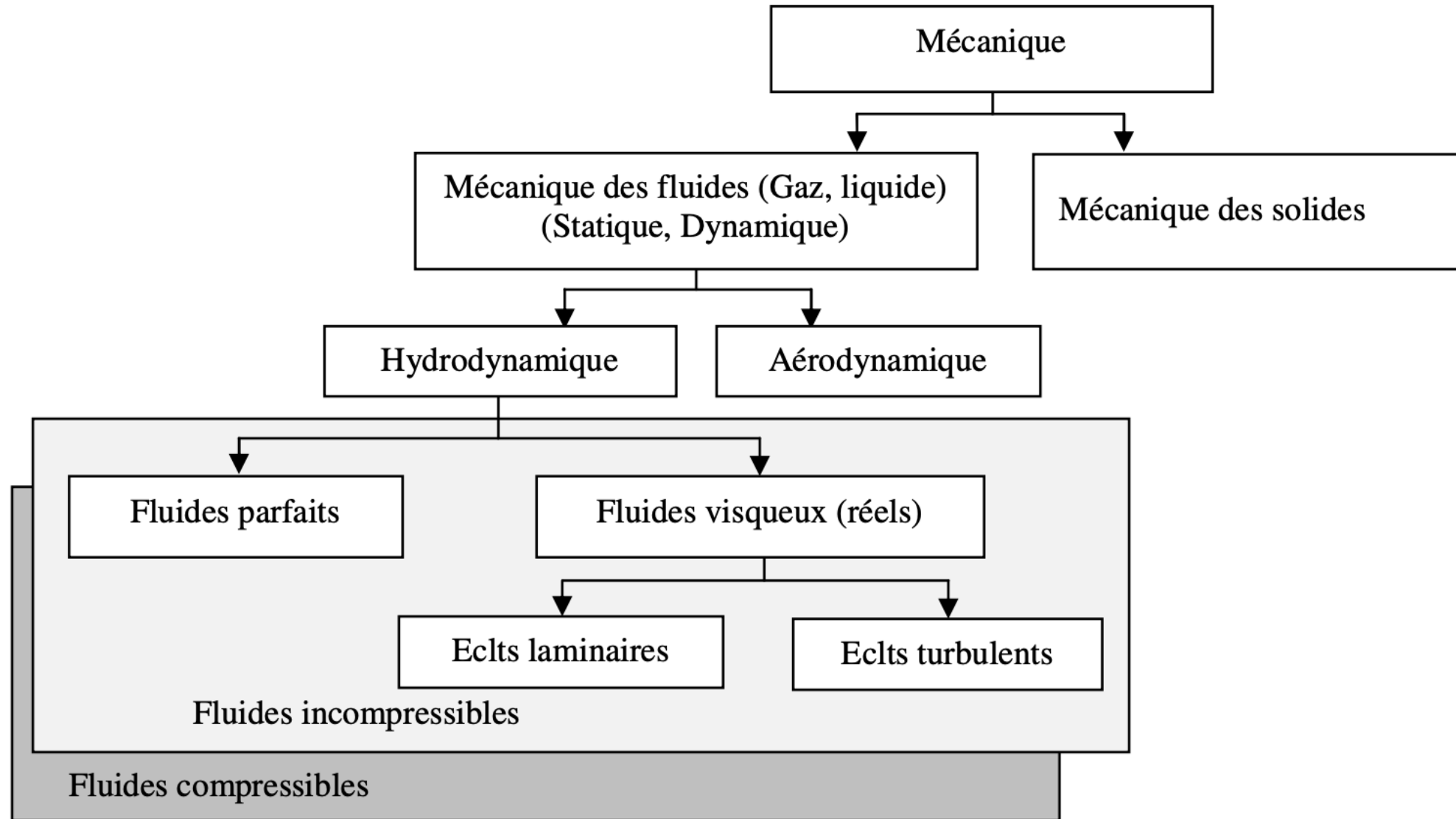
□ **La dynamique des fluides** qui étudie les fluides en mouvement. Comme autres branches de la mécanique des fluides.

On distingue également d'autres branches liées à la mécanique des fluides :

Le terme **hydrodynamique** s'applique à l'écoulement des liquides ou des gaz à faible vitesse. Dans ce cas, le gaz est considéré comme incompressible : sa masse volumique est constante.

L'aérodynamique, ou dynamique des gaz, s'intéresse au comportement des gaz lorsque les changements de vitesse et de pression sont trop importants pour pouvoir négliger la compressibilité des gaz.

Une nouvelle approche a vu le jour depuis quelques décennies: la mécanique des fluides numérique (**CFD** ou **Computational Fluid Dynamics** en anglais), qui simule l'écoulement des fluides en résolvant les équations qui les régissent à l'aide d'ordinateurs.



1.1 Définition physique d'un fluide

Un fluide peut être considéré comme étant une substance formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. C'est donc un milieu matériel **continu**, **déformable**, sans rigidité et qui **peut s'écouler**.

continu ; ses propriétés varient d'une façon continue, propriétés considérées comme caractéristiques non d'un point sans volume mais d'une particule, volume de fluide extrêmement petit autour d'un point géométrique ; par exemple, on affecte à chaque point P, pour chaque instant t, une masse volumique ρ représentative de la population des molécules intérieures au volume dV de la particule ;

déformable (il n'a pas de forme propre) ; les molécules peuvent facilement glisser les unes sur les autres ; cette mobilité fait que le fluide prendra la forme du récipient qui le contient ;

qui peut s'écouler ; mais tout fluide peut s'écouler plus ou moins facilement d'un récipient à un autre ou dans une conduite : des forces de frottements qui s'opposent au glissement des particules de fluide les unes contre les autres peuvent apparaître car tout fluide réel a une viscosité.

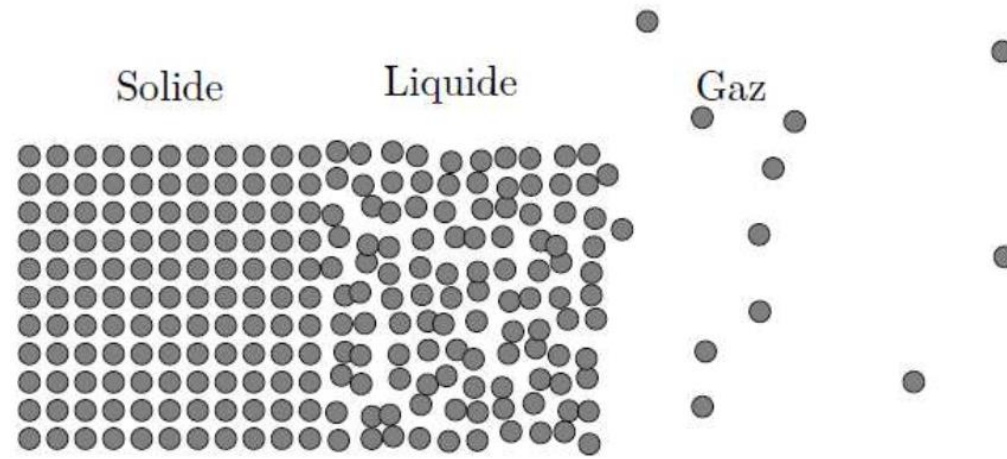
1.1.1 Etats de la matière

La matière est constituée d'atomes, de molécules ou des ions. Ces particules sont liées entre elles par des forces de liaison (liaisons covalentes, ioniques, métalliques, de Van der Waals ou d'hydrogène). Selon la grandeur de la force liant ces constituants entre eux, on distingue trois états de matière : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. En pratique, la notion de fluide regroupe les liquides et les gaz.

□ **L'état solide** (ordonné : ordre à grande échelle ou amorphe : pas d'ordre) : les atomes sont dans des positions fixes dans l'espace. Les forces d'interaction sont importantes. Les atomes ne peuvent donc que vibrer autour de leur position d'équilibre avec des faibles amplitudes.

□ **L'état gazeux** : les atomes sont dilués dans l'espace. Il n'y a pas de volume propre et la compression est possible. Les forces de cohésion sont faibles (les majoritaires étant les forces de répulsion). Le mouvement est possible et c'est un mouvement désordonné (Brownien) avec interactions par collisions.

□ **L'état liquide** : c'est l'état intermédiaire entre les deux précédents. Il peut donc être perçu comme un solide désordonné ou un gaz très dense. Les atomes sont proches les uns des autres et ont donc un volume propre. Un liquide est incompressible. Le mouvement est possible mais les forces d'attraction sont insuffisantes pour maintenir les atomes en place (mouvement de translation et de rotation). Un liquide peut s'écouler.

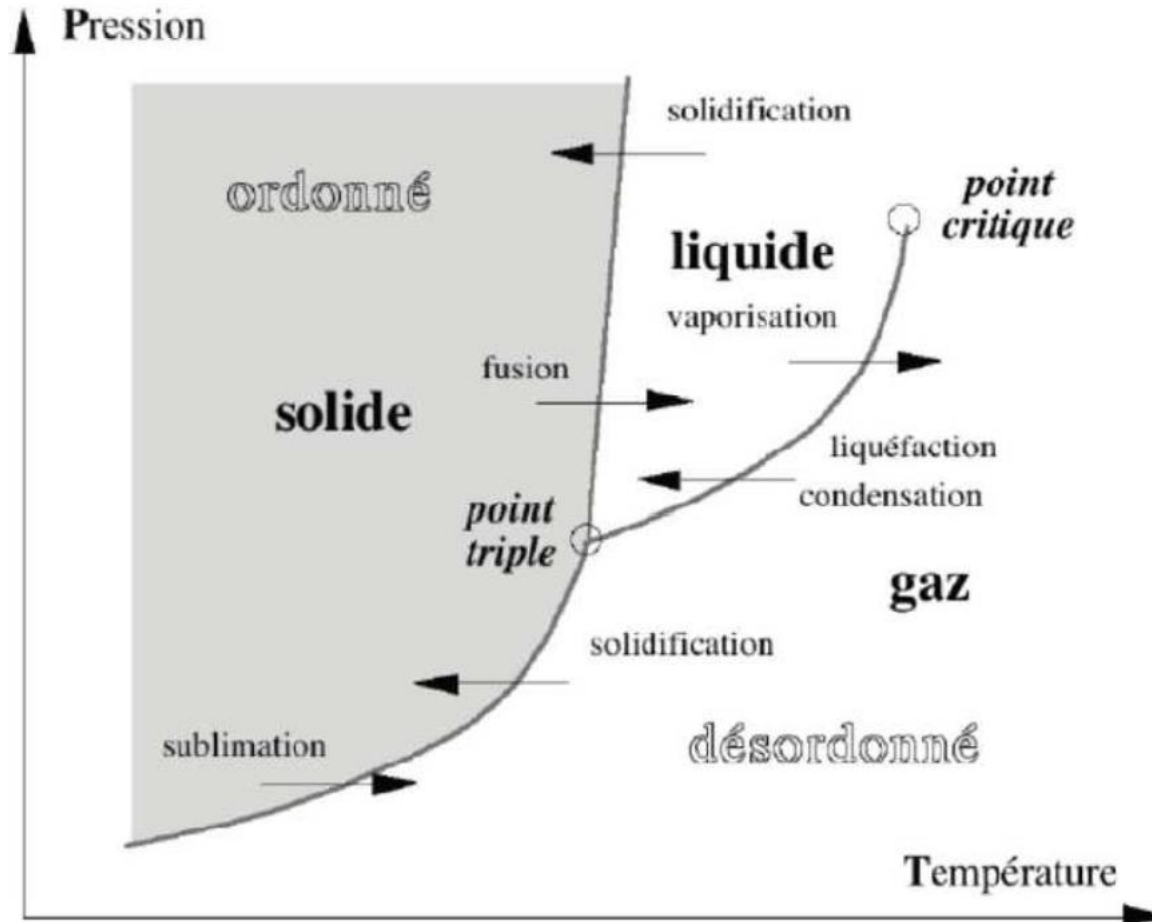


Le passage d'un état de la matière à un autre s'effectue par transition de phase lors d'un changement d'état thermodynamique provoqué par une modification de sa pression, de sa température et/ou de son volume. Les transformations de phase ou changements d'états sont :

- 1) Fusion : C'est la transformation de la matière de l'état solide à l'état liquide.
- 2) (Liquéfaction (condensation)) : C'est la transformation de l'état gazeux à l'état liquide.
- 3) Solidification (condensation ou déposition): C'est le passage de l'état gazeux à l'état solide
- 4) Gazéification (vaporisation) : C'est la transformation d'un liquide en vapeur.
- 5) Solidification : C'est l'inverse de la fusion .On l'appelle aussi congélation lorsque la
- 6) transformation se réalise à basses températures).

Sublimation : C'est le passage de l'état solide à l'état gazeux.

Les transformations 1, 4 et 6 se font avec absorption d'énergie par contre, les transformations 2,5 et 3 s'accompagnent d'un dégagement de chaleur.



L'eau, par exemple, à $T_0 = 273 \text{ } ^\circ \text{K}$ et $P_0 = 1 \text{ atm}$, se trouve sous 3 états (les 3 phases solide, liquide et gazeuse sont présentes). C'est le point triple de l'eau dans le diagramme (P, T) .

1.1.2 Matière divisée (Dispersion, suspensions, émulsions)

Un fluide n'est jamais à l'état purement liquide ou gazeux, sa composition est en réalité un mélange de différentes matières dont l'une d'entre elles est principale et contenant les autres qui peuvent être à des proportions différentes. Un fluide peut être à deux phases coexistant en équilibre thermodynamique ou en état pur en présence de particules en bulles de gaz, en gouttelettes ou en corps solides avec existence d'interfaces multiples entre la phase continue (liquide) et la phase dispersée (particules).

1.1.2.1 Dispersions :

Les dispersions sont des mélanges de particules très fines de taille inférieure à un μm . Ces particules sont souvent de forme colloïdale comme les argiles. Les dispersions ne sédimentent pas seules et ne peuvent pas être filtrées mais elles forment des mélanges chimiquement très sensibles à ce qui peut modifier la nature de leurs interactions. Une modification simple de propriété d'une solution peut affecter complètement le comportement inter-facial des particules, provoquant des variations brutales de comportement du mélange, par exemple, l'ajout de sel à un gel de cheveux peut le liquéfier.

1.1.2.2 Suspensions

Les suspensions sont des mélanges de particules fines ou grosses de tailles supérieures à $1\mu\text{m}$, généralement sans interaction entre elles. A l'inverse des dispersions, les suspensions sédimentent à des vitesses qui dépendent de la taille des particules et des conditions de dépôt et peuvent être filtrées mécaniquement. Les suspensions sont généralement peu sensibles aux variations chimiques du liquide. Le transport en suspension de particules fines (sable, limon, silt) peut se faire dans un cours d'eau.

1.1.2.3 Emulsions

Le mélange de deux substances liquides en gouttelettes forme une émulsion. La plupart des liquides sont non miscibles. Le lait ou la mayonnaise sont des exemples d'émulsion de globules de graisse dans une phase aqueuse. La stabilité des émulsions est un problème important (coalescence des gouttelettes, séparation des phases). Les mousses sont des cas particuliers d'émulsion où les gouttelettes sont des bulles de gaz. Les chutes d'eau dans les cascades et l'écume des vagues sont des émulsions d'air dans de l'eau. Le phénomène de cavitation dans les conduites peut mener à la formation d'émulsions.

1.2 Fluide parfait et fluide réel

Un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de frottement. Contrairement à un fluide parfait, qui n'est qu'un modèle pour simplifier les calculs, pratiquement inexistant dans la nature, dans un fluide réel les forces tangentielles de frottement interne qui s'opposent au glissement relatif des couches fluides sont prises en considération.

1.3 Fluide Compressible et incompressible

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

1.4 Les caractéristiques d'un fluide

Tous les fluides possèdent des caractéristiques permettant de décrire leurs conditions physiques dans un état donné. Parmi ces caractéristiques on a : la masse volumique, la densité et la compressibilité.

1.4.1 Masse volumique

La masse volumique ou masse spécifique est la masse de l'unité de volume du corps considéré. Si m est la masse d'un volume V de fluide, la masse volumique s'écrit :

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

Ordres de grandeur des masses volumiques (à 20 °C)

Eau (le standard liquide)	1 000 kg/m ³
Huile	914 kg/m ³
Mercure	13 400 kg/m ³
Air (le standard gazeux)	1,2 kg/m ³ $\ll \rho_{\text{eau}}$

Les liquides sont caractérisés par une masse volumique relativement importante ;
 $\rho_{\text{gaz}} \ll \rho_{\text{liquide}}$.

Pour les gaz, la masse volumique dépend de la température et de la pression. Pour un gaz parfait, l'équation d'état donne par :

$$\rho = \frac{P}{rT}$$

Où r est la constante massique des gaz parfaits $r = \frac{R}{M}$ avec $R = 8,314 \text{ J/mole } ^\circ\text{K}$ et M masse molaire du gaz.

1.4.2 Densité et poids spécifique

La densité d'un fluide est le rapport de la masse volumique à la masse volumique d'un fluide de référence. La densité est donc une grandeur adimensionnelle.

$$d = \frac{\text{masse volumique de fluide}}{\text{masse volumique d'un fluide de référence}} = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

- pour les gaz ρ_{ref} est celle de l'air à $T=0$ °C et à pression atmosphérique, $\rho_{ref} = 1,29349 \text{ Kg/m}^3$
- pour les liquides et les solides ρ_{ref} est celle de l'eau à $T=3,98$ °C et à pression atmosphérique, $\rho_{ref} = 1000 \text{ Kg/m}^3$

Le poids spécifique représente la force de gravité agissant sur la masse par unité de volume. il s'écrit :

$$\omega = \frac{m \cdot g}{V} \Rightarrow \omega = \rho \cdot g \text{ [N/m}^3\text{]}$$

avec g l'accélération de la gravité.

1.4.3 Compressibilité isotherme

La propriété physique qui permet de faire la différence entre un liquide et un gaz est la compressibilité. Un liquide est un fluide occupant un volume déterminé, ou du moins ce volume ne peut varier que très peu, et seulement sous l'action de fortes variations de pression ou de température. Un gaz, au contraire, occupe toujours le volume maximal qui lui est offert: c'est un fluide essentiellement compressible (ou expansible).

La compressibilité traduit la diminution de volume en réponse à un accroissement de pression. Pour quantifier cet effet on introduit le coefficient de compressibilité isotherme défini par :

$$E = - \frac{dP}{\left(\frac{dV}{V}\right)} = - \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P} \quad [Pa^{-1}] \quad (\text{à température constante})$$

Où $V = \frac{1}{\rho}$ est le volume massique [m^3/kg].

Remarque :

- Un accroissement de pression entraîne une diminution de volume, et inversement ; d'où la nécessité de mettre un signe moins devant le coefficient de compressibilité.
- Pour une masse donnée de fluide, on peut aussi écrire : $E = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T$
- Le coefficient de compressibilité est l'inverse du module d'élasticité isostatique du milieu, généralement noté χ , aussi appelé module de compressibilité. C'est une variable intensive toujours positive, le volume du corps ne pouvant que diminuer, lorsqu'on augmente la pression.

Ordres de grandeur des compressibilités à 20 °C

Eau	$4,1 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
Mercure	$4,4 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$
Air	$\approx 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$

Pour un liquide la compressibilité est très faible. A l'inverse, pour un gaz, la compressibilité est grande.

Pour les gaz parfaits, on déduit de l'équation d'état des gaz parfaits : $\chi = \frac{1}{P}$

1.5 Rhéologie d'un fluide

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

1.5.1 Viscosité des fluides

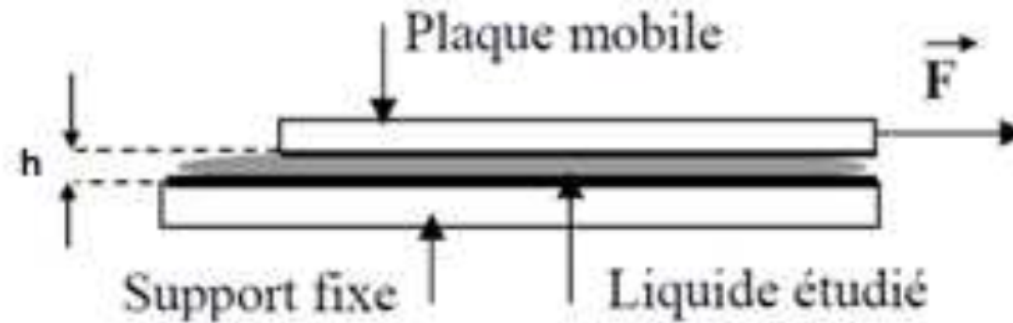
La viscosité se définit comme la résistance d'un fluide à sa mise en mouvement. Cette résistance est due principalement à l'interaction entre les molécules du fluide. Certains liquides coulent facilement, comme l'eau et l'alcool éthylique ; ils sont relativement peu visqueux. D'autre, par contre, comme les huiles épaisses, la glycérine et la mélasse, sont très visqueux et résistent d'avantage à l'écoulement. Dans le cas des gaz, la résistance à l'écoulement est particulièrement faible à cause de leur cohésion minime.

1.5.2 Expérience de base

L'expérience représentée ci-dessous peut être réalisée simplement en prenant du miel au de l'huile pour boîte de vitesse).

On met un fluide entre deux plaques (l'une fixe, l'autre mobile) et l'on étudie la force F qu'il faut appliquer pour déplacer la plaque mobile à une vitesse constante U .

On fait varier l'épaisseur e de liquide et aussi la surface S de la plaque mobile.



L'expérience montre que F est proportionnel à U et S , mais inversement proportionnel à l'épaisseur h du liquide.

1.5.3 Viscosité dynamique

Les observations qui découlent de l'expérience décrite ci-dessus peuvent être traduites par une expression mathématique de la forme suivante :

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{U}{h}$$

Le coefficient de proportionnalité μ qui apparaît dans cette relation est appelé coefficient de viscosité dynamique.

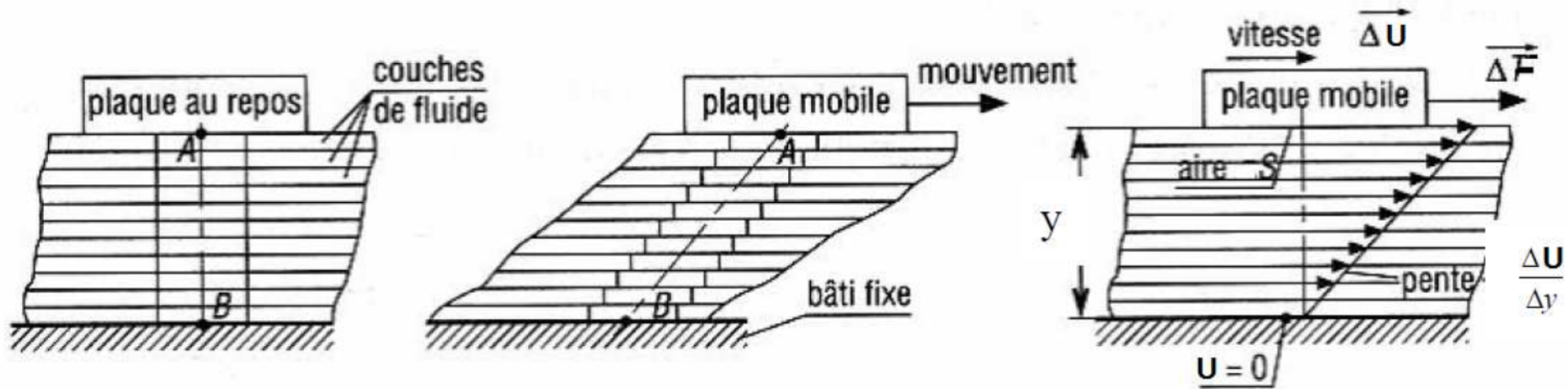
Dans le Système International, la viscosité dynamique, μ , a pour unité : [Kg/m.s] ou [Pa.s]. Dans le système CGS, l'unité est le poise [PI] où 1poise=1[g/cm.s].

Remarque :

En fait, lorsqu'un fluide s'écoule entre deux plaques ou dans un conduit, on peut modéliser la situation de la façon suivante : on imagine le liquide formé de couches très fines et parallèles d'épaisseur Δy (on prend un axe Oy perpendiculaire à la direction de la vitesse d'écoulement), entre deux couches successives il y a une différence de vitesse de déplacement notée ΔU . Une force ΔF dite de cisaillement est nécessaire pour maintenir cette différence de vitesse.

Remarque :

En fait, lorsqu'un fluide s'écoule entre deux plaques ou dans un conduit, on peut modéliser la situation de la façon suivante : on imagine le liquide formé de couches très fines et parallèles d'épaisseur Δy (on prend un axe Oy perpendiculaire à la direction de la vitesse d'écoulement), entre deux couches successives il y a une différence de vitesse de déplacement notée ΔU . Une force ΔF dite de cisaillement est nécessaire pour maintenir cette différence de vitesse.



On suppose que pour ce modèle on peut appliquer la même relation que celle tirée de l'expérience précédente :

$$\Delta F = \mu \cdot S \cdot \frac{\Delta U}{\Delta y}$$

$$\Delta F = \mu \cdot S \cdot \frac{\Delta U}{\Delta y}$$

Le rapport $\frac{\Delta U}{\Delta y}$ est la variation de vitesse perpendiculairement à la direction d'écoulement, on l'appelle aussi gradient de vitesse ou le taux de cisaillement.

Comme il est difficile de connaître la surface S qui subit la force de cisaillement, on préfère introduire la notion de contrainte de cisaillement τ en $[\text{N.m}^{-2}]$:

$$\tau = \frac{\Delta F}{A} \quad \text{donc} \quad \tau = \mu \cdot \frac{\Delta U}{\Delta y}$$

On rencontre parfois le terme de viscosité relative, μ_r : c'est un nombre sans dimension qui est définie par le rapport de la viscosité dynamique d'un fluide (viscosité absolue) à la viscosité d'un fluide de référence μ_0 :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

1.5.4 Viscosité cinématique

La viscosité cinématique, ν , est définie comme étant : la viscosité dynamique sur la masse volumique. Elle est exprimée comme suit :

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

La viscosité cinématique, ν , a pour unité dans le système SI : [m²/s] ; dans le système CGS, l'unité est le stokes ou 1 stokes = 1 [cm²/s].

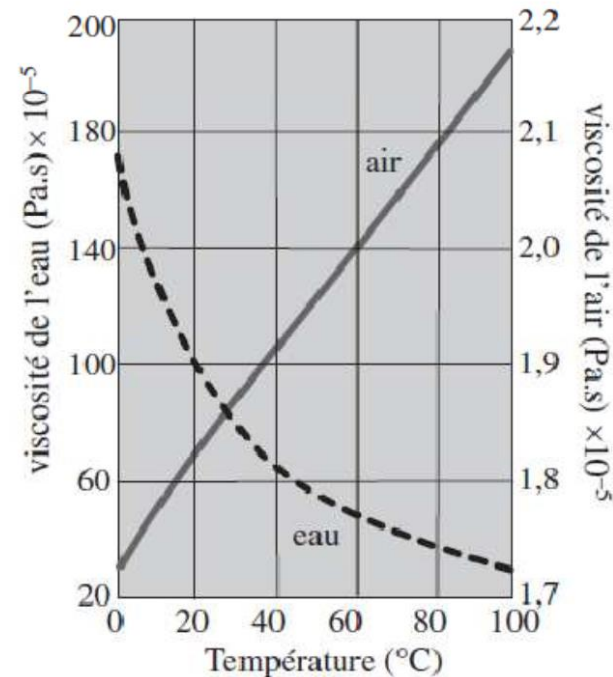
À titre d'exemple, les valeurs de viscosité dynamique et cinématique pour quelques fluides à la température ambiante (20 °C) sont :

fluide	viscosité dynamique μ [Pl]	viscosité cinématique ν [m ² /s]
glycérine	0,8	6,8 10 ⁻⁴
huile	0,3	4 10 ⁻⁴
alcool	1,2 10 ⁻³	2,2 10 ⁻⁶
eau	10 ⁻³	10 ⁻⁶
air	18 10 ⁻⁶	15 10 ⁻⁶

D'une manière générale, la viscosité dynamique μ des liquides est beaucoup plus grande que celle des gaz, mais leur viscosité cinématique ν peut être inférieure car les gaz ont une faible masse volumique.

1.5.5 Variation de la viscosité en fonction de la température

Dans le cas des gaz, une augmentation de la température entraîne un mouvement plus intense des molécules et accroît le mélange moléculaire et donc la viscosité augmente. Dans le cas d'un liquide, lorsque la température augmente les molécules se séparent entre elles, décroissant l'attraction entre elles et donc la viscosité diminue. La relation entre la température et la viscosité est par conséquent inversée pour un gaz et un liquide.



Variation de la viscosité en fonction de la température.

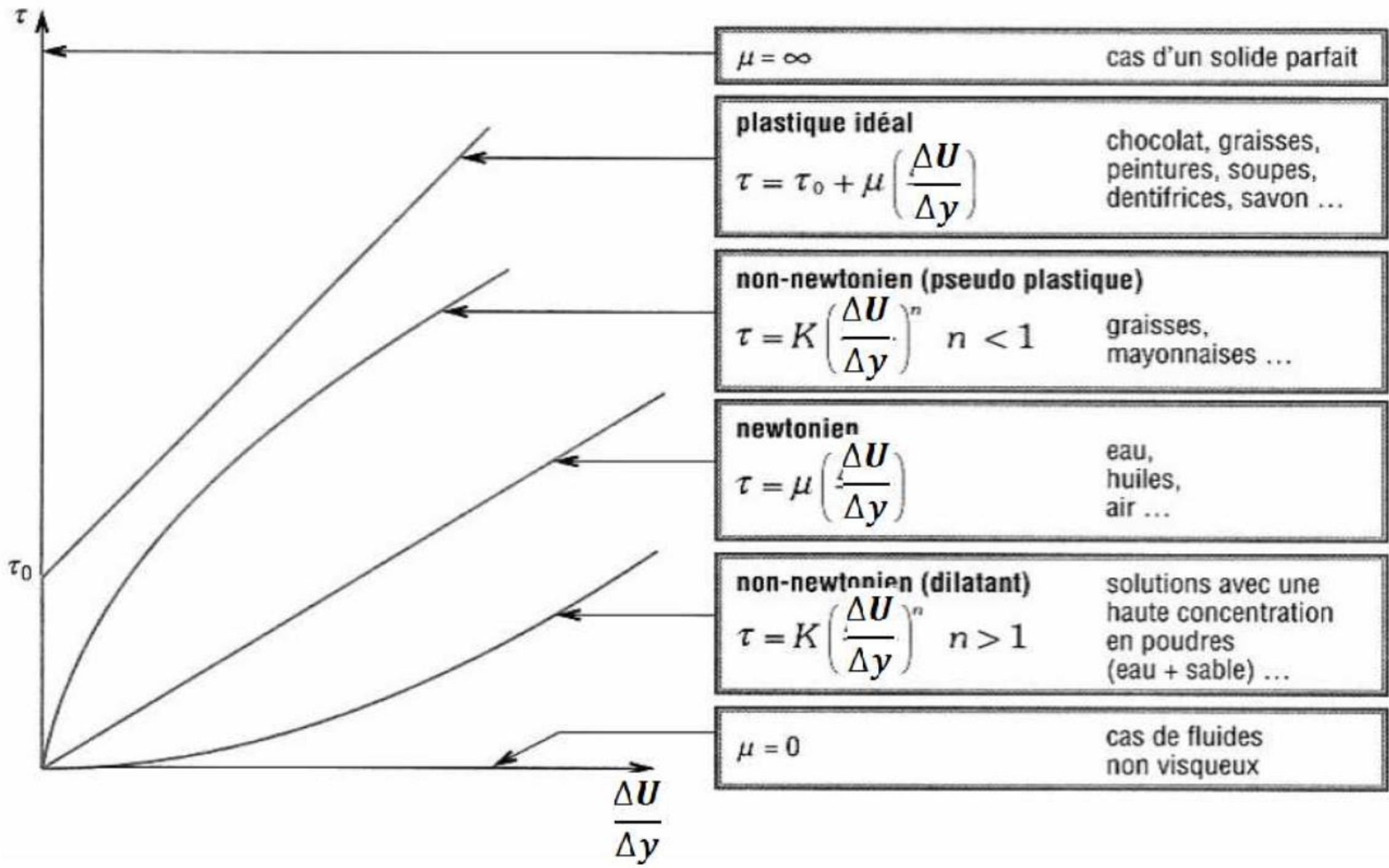
1.5.6 Les différents types de fluides

Les fluides peuvent être classés en trois grandes familles :

- les fluides viscoélastiques (par ex. : farines de blé, poudres diverses).
- les fluides dont les caractéristiques varient plus ou moins rapidement en fonction du temps (peintures, solution de plâtre...).
- les fluides dont les caractéristiques sont stables. Ces fluides peuvent présenter différents comportements caractérisés par la relation entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse $\frac{\Delta U}{\Delta y}$ comme l'indique le tableau ci-dessous :

Deux grandes familles de fluides :

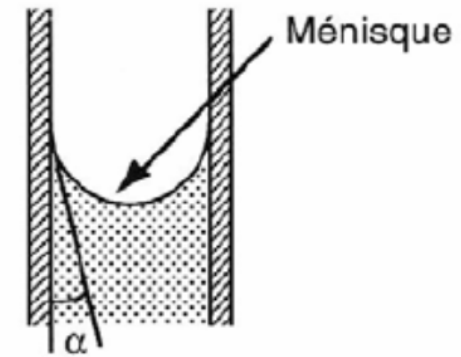
- les fluides newtoniens pour lesquels la viscosité μ ne dépend pas de la contrainte de cisaillement τ (ni du gradient de vitesse). Le graphe est donc une droite. C'est le cas des gaz, vapeurs, liquides purs, liquides de masse molaire faible, solutions peu concentrées...);
- les fluides non-newtoniens pour lesquels μ dépend de la contrainte de cisaillement τ . Le tableau ci-dessous montre la grande variété des réactions possibles. C'est le cas des polymères, des purées, des gels, des boues, des pâtes, du sang, des peintures...). L'étude des propriétés de ces fluides constitue le domaine de la rhéologie.



1.6 Tension de surface d'un fluide

1.6.1 Quelques observations simples

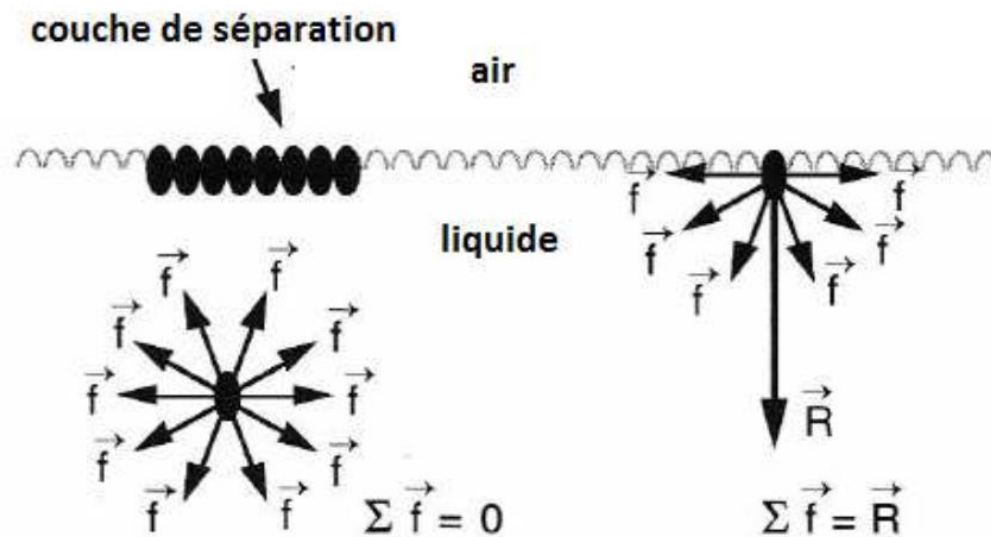
- La surface libre d'un liquide est plane et horizontale pourtant si l'on regarde la surface libre d'un liquide à l'intérieur d'un tube transparent (burette, tube à essai, pipette ...) on remarque la formation d'un "ménisque", le raccordement entre la surface libre air/liquide et la paroi ne se fait pas à angle droit.
- les bulles ou gouttes ont une forme sphérique ;
- film d'eau savonneuse qui se forme sur un anneau métallique trempé dans l'eau savonneuse ;
- on peut déposer à la surface de l'eau une aiguille ou une lame de rasoir sans qu'elle coule...
- la sève d'un arbre monte à des hauteurs considérables sans l'aide d'aucune pompe...



Toutes ces observations montrent que la surface de séparation entre deux fluides se comporte comme une sorte de membrane élastique.

1.6.2 Origine de la tension superficielle

Si l'on considère une molécule au sein d'un liquide, elle est soumise à des forces intermoléculaires d'attraction exercées par les molécules voisines. La résultante de ces forces est nulle en moyenne. Pour une molécule proche de la surface de séparation liquide/air, cette résultante n'est plus nulle (puisqu'il y a dissymétrie dans la répartition des molécules autour d'une molécule donnée) et elle est dirigée vers l'intérieur du liquide, perpendiculairement à la surface de séparation. On peut estimer que l'épaisseur de cette couche de séparation varie de 1 à 100 nm. Cette couche agit donc comme une membrane qui comprime en quelque sorte le liquide. La forme sphérique des gouttes et des bulles est expliquée par ces forces dont l'intensité est d'autant plus importante que le rayon de la sphère est petit.



1.6.3 Définition de la tension superficielle

Prenons l'exemple d'une bulle d'eau savonneuse, elle peut être comparée à un ballon en caoutchouc : pour augmenter sa taille, donc sa surface, il faut fournir un certain travail, une certaine énergie ΔW qui est proportionnelle à l'augmentation de la surface ΔS .

Le coefficient de proportionnalité est appelé tension superficielle et notée " σ ".

La définition de la tension superficielle est donc donnée par la relation :

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta S}$$

Pour simplifier encore, imaginons une surface rectangulaire (par exemple : membrane d'eau savonneuse limitée par un cadre en fil métallique de forme rectangulaire) dont l'un des côtés a une longueur L . Pour augmenter la surface de ΔS , il faut exercer sur ce côté L une force d'intensité F .

Le côté se déplaçant de Δx , la surface augmente de $\Delta S = L \Delta x$.

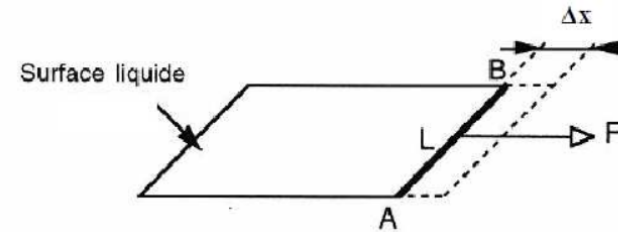
Le travail de la force \mathbf{F} est $\Delta W = F \Delta x$.

On peut donc écrire que :

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta S} = \frac{F \cdot \Delta X}{L \cdot \Delta X} = \frac{F}{L}$$

Situation simplifiée illustrant la définition de la tension superficielle :

$$\sigma = \frac{F}{L}$$



Unité de la tension superficielle :

La première formule de définition indique que la tension superficielle est donnée en J.m^{-2} , mais en pratique, c'est la deuxième formule qui sert de référence, l'unité de tension superficielle est donc officiellement le N.m^{-1} .

1.6.4 Conséquences de l'existence de la tension superficielle

1.6.4.1 Formation de bulles

Dans tous les cas de formation de bulles il faut que la pression à l'intérieur de la bulle soit plus grande que la pression à l'extérieur de la bulle. On peut démontrer que la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est donnée par la relation suivante :

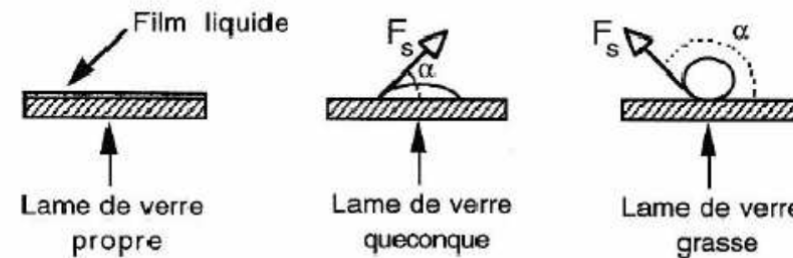
$$P_{int} - P_{ext} = \frac{2\sigma}{R} \quad (R = \text{rayon de la bulle en m})$$

1.6.4.2 Contact entre liquide et solide : angle de raccordement

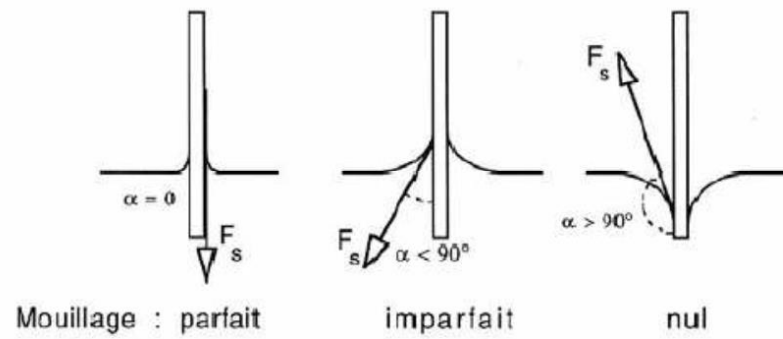
Lorsqu'on pose une goutte de liquide sur la surface d'un solide, on constate plusieurs situations :

- le liquide s'étale largement et forme une couche fine sur la surface, on dit que le liquide mouille parfaitement le solide.
- le liquide ne s'étale presque pas et il se forme un angle de raccordement θ entre la surface du solide et celle du liquide. On dit que le liquide mouille imparfaitement le solide.
- le liquide reste pratiquement en "bouille", l'angle de raccordement devient supérieur à 90° . On dit que le liquide ne mouille pas le solide

La formation d'un ménisque est la conséquence des deux dernières situations. Les figures ci-dessous illustrent les trois situations :



Mouillage parfait, imparfait et nul : pour des surfaces solides horizontales ou verticales (pour un liquide donné et une surface donnée, l'angle de raccordement est le même pour les deux orientations de la surface).

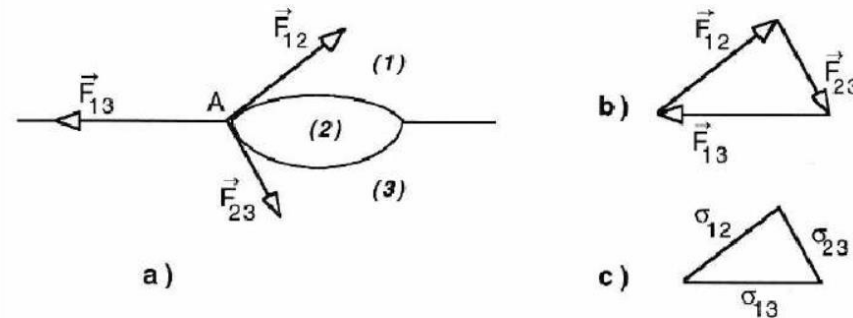


Remarque :

Lorsque plusieurs fluides sont en contact, comme le montre le schéma ci-dessous, le point A étant en équilibre, on peut dire que la somme vectorielle des forces en jeu est nulle.

C'est le cas par exemple d'une goutte d'huile (2) posée sur l'eau (3) avec de l'air (1) au-dessus.

On en déduit une relation entre les tensions superficielles ou interfaciales comme l'indique le schéma.



Si les valeurs des tensions superficielles ne permettent pas de faire cette construction, le liquide 2 ne formera pas une goutte mais s'étalera au maximum sur la surface du liquide 3 (benzène sur de l'eau par exemple).

1.6.4.3 Ascension d'un liquide dans un tube capillaire : LOI de JURIN

Lorsqu'on plonge un tube fin et ouvert dans un liquide, celui-ci "monte" dans le tube d'une certaine hauteur h . Il se forme également un ménisque. Au contact de la paroi, une force due à la tension superficielle s'exerce sur le liquide verticalement vers le haut. Cette force s'oppose au poids de la colonne de liquide au-dessus de la surface libre du liquide. Puisqu'il y a équilibre, on peut écrire la relation suivante :

$$2\pi r \cdot \sigma \cdot \cos\theta = \pi r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

Avec

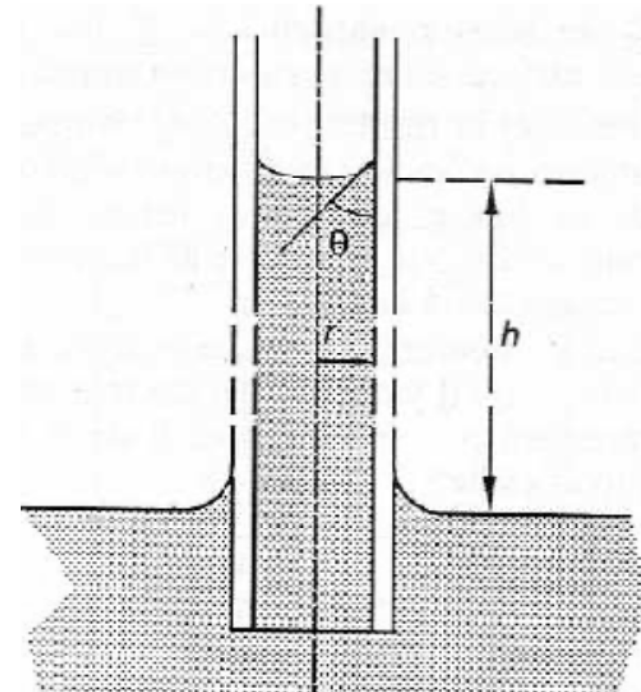
σ tension superficielle [N/m]

r rayon du capillaire [m]

ρ masse volumique [kg/m³]

θ angle de raccordement [rad]

h hauteur de l'ascension capillaire [m]



$$\text{donc } h = \frac{2.\sigma.\cos\theta}{r.\rho.g}$$

Cette relation est appelée Loi de Jurin.

Dans le cas où le liquide mouille parfaitement la paroi du capillaire, l'angle de raccordement est nul (c'est le cas de l'eau dans un capillaire en verre propre). La loi de Jurin est encore plus

simple :

$$h = \frac{2.\sigma}{r.\rho.g}$$

Donc l'ascension capillaire est d'autant plus importante que le tube est fin et que la masse volumique du liquide est faible.

Exercice 1:

Supposons qu'une personne flotte en eau douce avec 97,0% de son volume submergé. Quelle est la densité moyenne de la personne ?

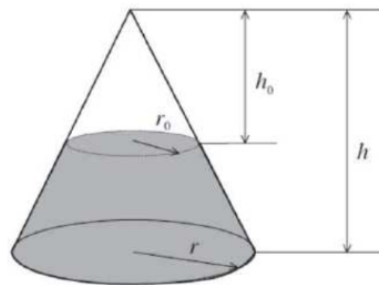
Exercice 2:

Un gros morceau d'acier solide d'une masse de $1,00 \times 10^7 \text{ kg}$ est complètement immergé dans l'eau.

1. Calculez la force de flottabilité (poussée d'Archimède) (ou F_b buoyant force en anglais) et comparez-la avec le poids de l'acier.
2. Calculez la force de flottabilité si cet acier était façonné en un bateau capable de déplacer $1,00 \times 10^5 \text{ m}^3$ d'eau. Ce bateau coulerait-il ou flotterait-il ?

Exercice 3:

Trouver la hauteur de la surface libre si 0.02 m^3 d'eau sont remplies dans un réservoir de forme conique de hauteur $h = 0.5 \text{ m}$ et de rayon à la base de $r = 0.25 \text{ m}$.

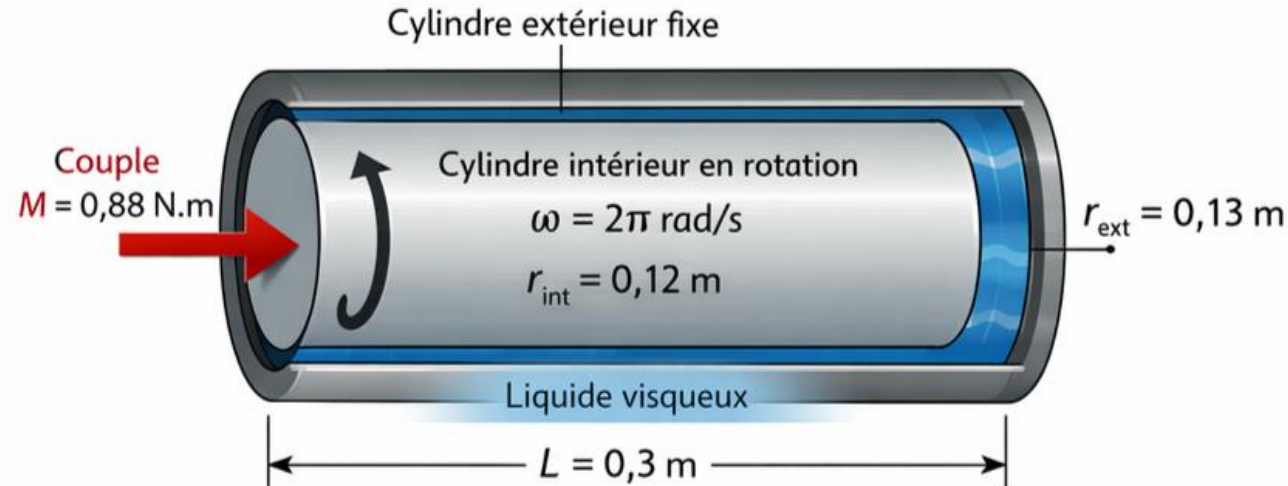


1. Combien de quantité d'eau supplémentaire est nécessaire pour remplir entièrement le réservoir?
2. Si ce réservoir contient 30,5 kg d'huile, quelle est la masse volumique de cette huile?

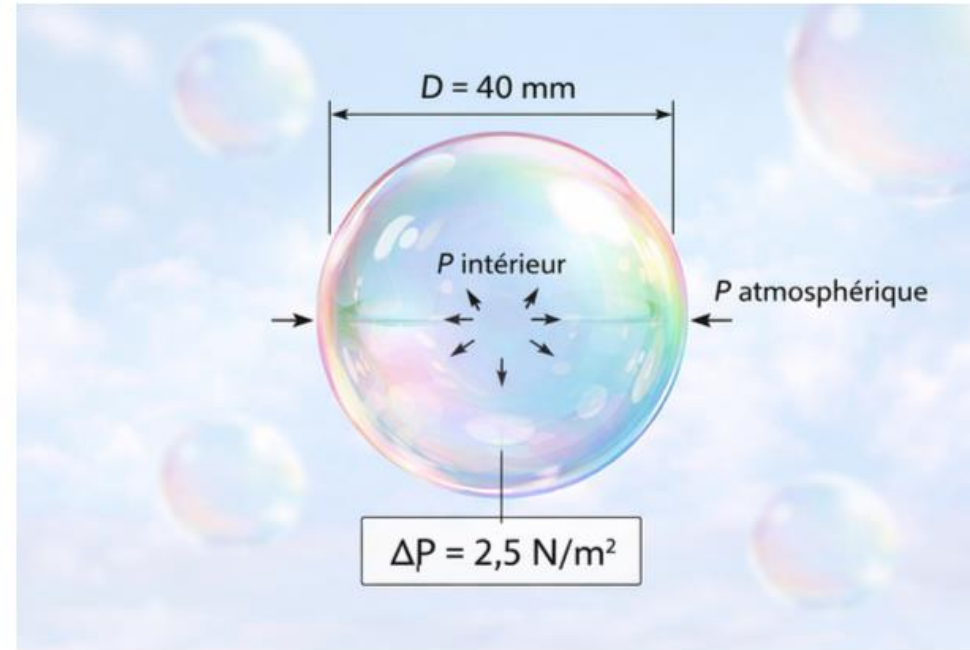
Exercice 4:

Un cylindre de rayon $r_{int} = 0,12m$ tourne dans un autre cylindre de rayon $r_{ext} = 0,13m$ qui lui est fixe. Les deux cylindres sont coaxiaux et de longueur $L = 0,3m$.

Déterminer la viscosité du liquide remplissant l'espace entre les cylindres si un couple de $0,88N.m$ est requis pour maintenir une vitesse angulaire de $\omega = 2\pi rad.s^{-1}$



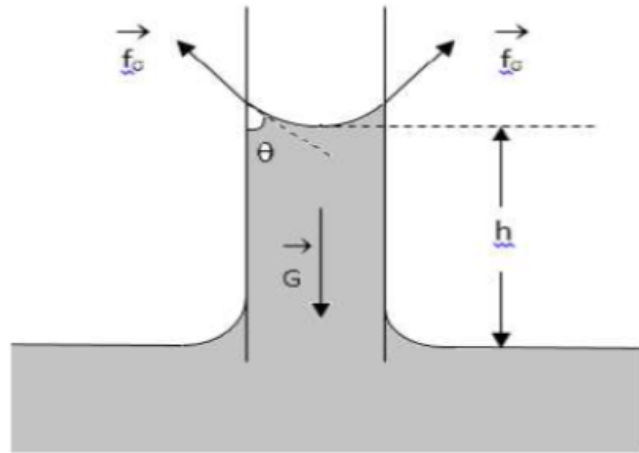
Exercice 5:



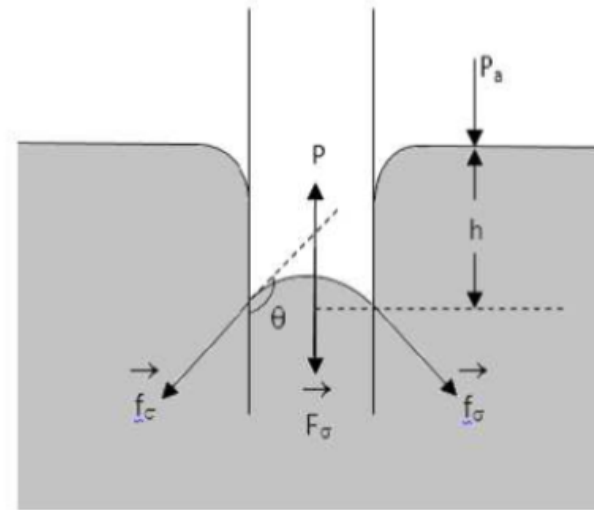
Trouver la tension superficielle d'une bulle de savon de 40 mm de diamètre quand la pression interne est de $2,5 \text{ N/m}^2$ plus grande que la pression atmosphérique.

Exercice 6:

Calculer la hauteur capillaire dans un tube de verre de $2,5\text{mm}$ de diamètre lorsqu'il est immergé verticalement dans : 1)- L'eau ; 2)- Mercure



Eau



Mercure

On prend : $s = 0,0725\text{N/m}$ pour l'eau et $s = 0,52\text{N/m}$ pour le mercure en contact avec l'air. La densité du mercure est égale à 13,6. L'angle de contact q de l'eau est égal à zéro et celui du mercure est égal à 130° . La gravité g est prise égale à $9,81\text{m/s}^2$

بالتوفيق