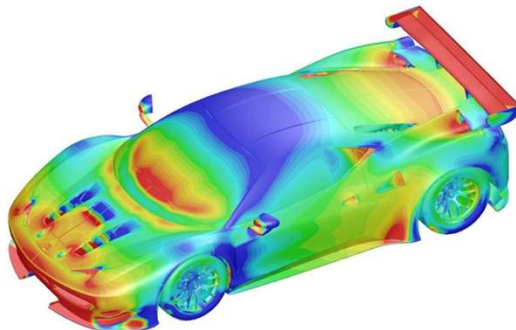
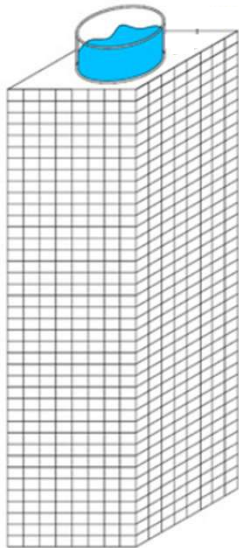
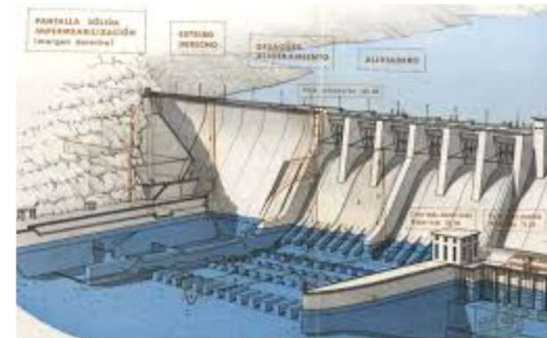


Mécanique des fluides

La mécanique des fluides est la branche de la physique qui étudie le comportement des fluides — liquides ou gaz — au repos ou en mouvement, sous l'influence de forces internes (pression, viscosité) et des forces externes.

Elle cherche à établir les lois gouvernant les écoulements, à prédire les champs de vitesse et de pression.

Elle permet aux ingénieurs de concevoir, de dimensionner et de prédire le comportement des systèmes mettant en jeu des fluides, dans des domaines tels que l'hydraulique, le génie civil, l'automobile, l'aéronautique, l'industrie ...



Mécanique des fluides (suite)

Les problématiques traitées par la mécanique des fluides sont souvent complexes à cause de l'intervention simultanément des phénomènes variés:

Écoulement permanent, non permanent, 1D, 2D, 3D, compressible incompressible, mono phasique, multiphasique, transfert de matière, de chaleur, à faible ou à grande vitesse, milieu ouvert ou poreux,

Le recours à des hypothèse permet de simplifier le problème à traiter.

Programme de mécanique des fluides

Chapitre 1: Propriétés des fluides

Chapitre 2 : Statique des fluides

Chapitre 3: Dynamique des fluides parfaits

Chapitre 4: Dynamique des fluides réels

Chapitre 1 : Propriétés des fluides

1. Définition d'un fluide

2. Fluide parfait et fluide réel

3. Caractéristiques physiques d'un fluide

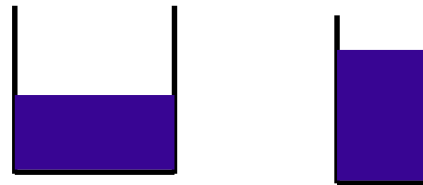
1. Définition d'un fluide

Un fluide est un milieu continu, déformable, qui peut s'écouler. Les forces de cohésion entre ses particules élémentaires sont faibles.

Parmi les fluides, on distingue deux grandes catégories : les liquides et les gaz.

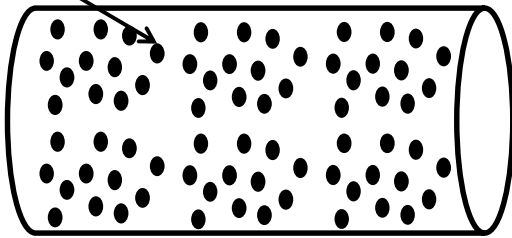


Déformation sous l'effet d'un cisaillement



Changement de forme

Molécule



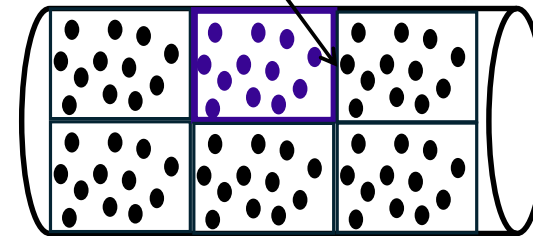
Approche microscopique

$$\lambda \leq D \quad (l = 10^{-7} m \text{ pour les gaz})$$

Mécanique statistique, dynamique
moléculaire, microhydrodynamique



Particule fluide $(P, \vec{V}, T, \rho, \dots)$



Approche macroscopique

$$\lambda \ll D$$

Mécanique des fluides

$$\left\{ \begin{array}{l} P = f(x, y, z, t) \\ \vec{V} = f(x, y, z, t) \\ \dots\dots\dots \end{array} \right.$$

2. Fluide parfait et fluide réel

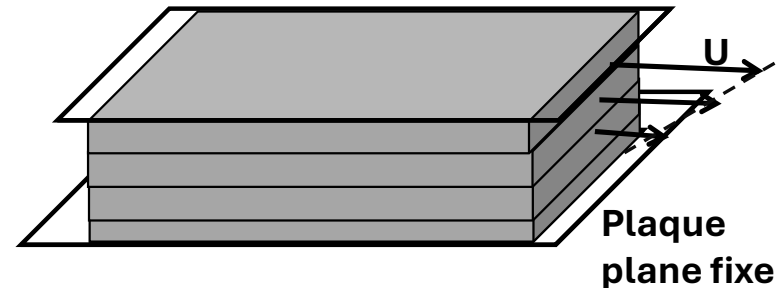
Plaque plane mobile



Fluide parfait (concept théorique)

- Le fluide garde sa vitesse initiale
- Résistance interne nulle (Viscosité nulle – vitesse constante)
- Absence d'adhérence

Plaque plane mobile



Fluide réel

- Mise en mouvement du fluide (écoulement) ou variation de la vitesse
- Présence des forces de résistance internes (Viscosité du fluide – Variation de vitesse)
- Déformation des particules fluides
- Présence d'adhérence

Un fluide parfait est un concept théorique en mécanique des fluides qui simplifie l'étude des écoulements.

Dans un fluide réel les forces tangentielles de frottement interne qui s'opposent au glissement relatif des couches fluides sont prises en considération dans le mouvement du fluide (écoulement).

3. Caractéristiques physiques d'un fluide

3.1 Masse volumique, densité, poids spécifique et volume spécifique

La masse volumique d'un fluide est la masse de l'unité de volume de ce fluide. Elle s'exprime par la formule suivante :

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

ρ : la masse volumique du fluide en kg/m³

M : la masse du fluide en kg

V : le Volume du fluide en m³

La masse volumique des fluides dépend de la température.

Les gaz ont une masse volumique très faible comparativement à celle des liquides.

La masse volumique de l'air est égale à 1.225 kg/m³ au niveau de la mer puis elle diminue avec l'altitude.

3.1 Masse volumique, densité, poids spécifique et volume spécifique (suite)

La **densité** d'un fluide est égale au rapport de la masse volumique de ce fluide à celle du fluide de référence. Pour les liquides, la masse volumique de l'eau est utilisée comme masse volumique de référence et pour les gaz on utilise la masse volumique de l'air.

$$\delta = \frac{\rho_{fluide}}{\rho_{eau}}$$

δ est la densité du fluide,

ρ_{fluide} est la masse volumique du fluide,

ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau (de référence) prise égale à 1000kg/m³ (T = 4°C qui est la température à laquelle l'eau atteint sa densité maximale).

Pour les gaz, la masse volumique de l'air de référence est généralement prise comme 1,225 kg/m³ à une température de 15°C et sous une pression atmosphérique standard de 101,325 kPa (ou 1 atm).

3.1 Masse volumique, densité, poids spécifique et volume spécifique (suite)

Le poids spécifique d'un fluide, ω , est défini par le rapport du poids du volume de fluide au volume du fluide.

$$\omega = \frac{mg}{v} = \rho g$$

ω est le poids volumique (kg.m-2.s-2),

g est l'accélération de pesanteur.

Le volume spécifique d'un fluide est le volume qu'occupe une unité de masse de ce fluide. Il est l'inverse de la masse volumique.

$$\bar{\rho} = \frac{V}{M} = \rho^{-1}$$

Où $\bar{\rho}$ est le volume spécifique (m³/kg),

V est volume du fluide (m³)

M (kg) est la masse du fluide.

3.2 Compressibilité

C'est la propriété d'un fluide de pouvoir changer de volume sous l'action d'une variation de pression. Elle est définie par le coefficient de compressibilité qui est la variation relative du volume rapporté à la différence de pression.

Soit un volume de fluide V soumis à une différence de pression dP . Cette différence de pression entraîne une variation de volume dV .

Le coefficient de compressibilité K est donné par l'expression :

$$K = - \frac{(dV/V)}{dP}$$

Le signe (-) est ajouté pour obtenir un coefficient de compressibilité positif.

K : coefficient de compressibilité (m^2/N ou Pa^{-1})

V : volume de fluide (m^3)

dV : Variation de volume

dP : différence de pression (Pa)

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 considérés comme des fluides compressibles (l'air, l'hydrogène, le méthane à l'état gazeux,)

3.2 Compressibilité (suite)

En tenant compte de la formule de la masse volumique, le coefficient de compressibilité K s'écrit encore :

$$K = \frac{(d\rho/\rho)}{dP}$$

Le module d'élasticité est défini comme l'inverse du coefficient de compressibilité :

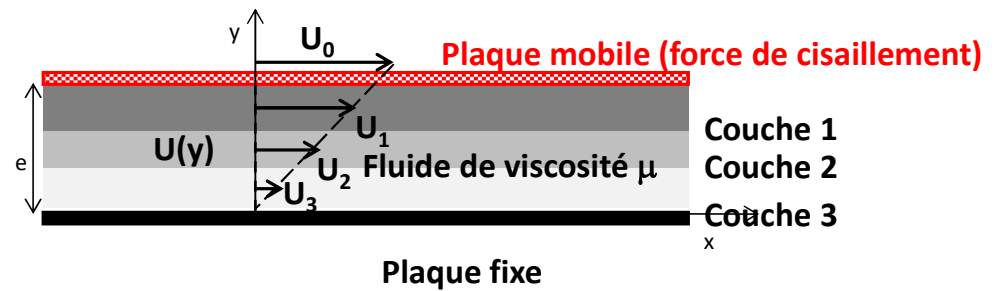
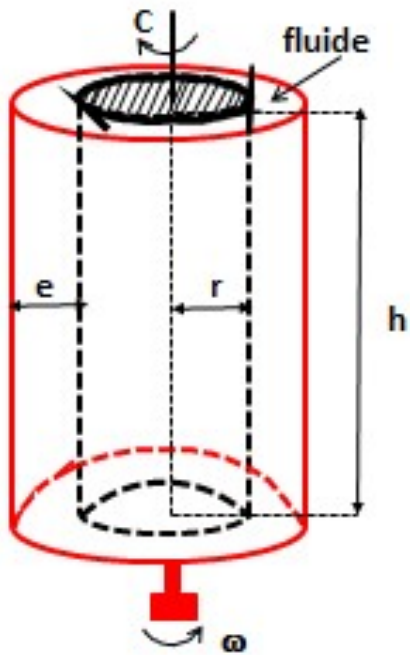
$$E = \frac{1}{K}$$

Quelques ordres de grandeur du coefficient de compressibilité K .

Fluide	K (Pa ⁻¹)
Eau	$\approx 4.1 \cdot 10^{-10}$
Air	$\approx 10^{-5}$

3.2 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.



3.2 Viscosité (suite)

Sur la plaque fixe s'applique une **force de frottement F** parallèle à ox due à la présence du fluide.

$$F = \mu \frac{U_0}{e} S$$

S est la surface de la plaque fixe,

e est la distance entre les deux plaques.

μ est un coefficient de proportionnalité et s'appelle **la viscosité dynamique**.

La viscosité cinématique, ν , est égale au rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide.

$$\nu = \mu / \rho$$

Unités de la viscosité

	Dimensions	S.I	C.G.S
Viscosité dynamique	$M.L^{-1}.T^{-1}$	Poiseuille (Pl) ($Kg.m^{-1}.s^{-1}$)	Poise (Po) = $gr.cm^{-1}.s^{-1}$
Viscosité cinématique	$L^2.T^{-1}$	$m^2.s^{-1}$	Stokes (St) = $cm^2.s^{-1}$

Valeurs de la viscosité dynamique et de la viscosité cinématique de l'eau et de l'air à 20°C.

Fluide	eau	air
μ (Pa)	10^{-3}	$18 \cdot 10^{-6}$
ν (m ² /s)	10^{-6}	$15 \cdot 10^{-6}$
T(°C)	20	20

Comportement rhéologique des fluides

Dans la formule de F, U_0/e représente le gradient de vitesse suivant l'axe oy. Le rapport de la force de frottement à la surface de la plaque s'appelle **la contrainte de cisaillement (tangentielle) visqueuse τ** .

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{dU}{dy}$$

1 : **fluide newtonien** : la contrainte de cisaillement est linéaire en fonction de du/dy . $\tau = \mu \frac{dU}{dy}$

2 : **Fluide parfait** : la contrainte de viscosité est nulle ($\mu=0$).

3 : **Solide parfait** : les contraintes visqueuses sont toujours nulles ($du/dy=0$).

4 : **Fluide Bingham** (Yaourt, Mayonnaise, boues de forage...) $\tau = \tau_0 + \mu \frac{dU}{dy}$

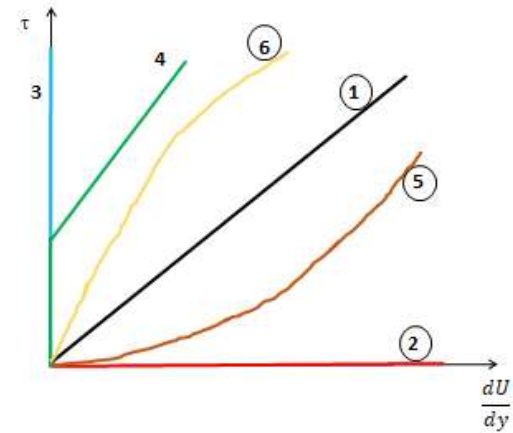
Le fluide se comporte comme un solide parfait si la contrainte visqueuse τ est inférieure à une valeur seuil τ_0 et comme un fluide newtonien si elle est supérieure à τ_0 .

5 et 6 : **Le modèle d'Ostwald** (Loi de puissance) (5 et 6) $\tau = K \left(\frac{dU}{dy} \right)^n = K \left(\frac{dU}{dy} \right)^{n-1} \frac{dU}{dy} = \mu_{eff} \frac{dU}{dy}$

$$\text{Avec } \mu_{eff} = K \left(\frac{dU}{dy} \right)^{n-1}$$

5 : $n > 1$ Fluide **dilatant** (Dentifrice)

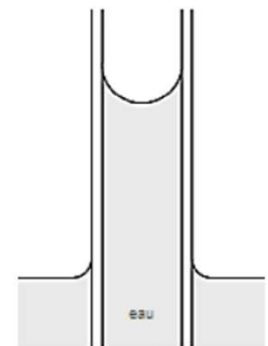
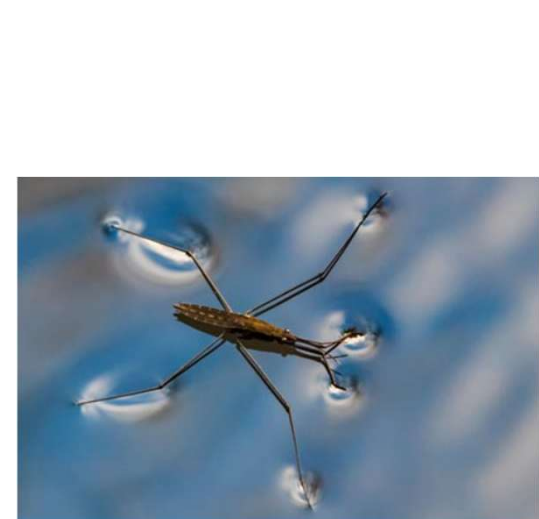
6 : $n < 1$ Fluide **pseudo-plastiques** (Le ketchup)



3.3 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 des liaisons entre les molécules à la surface d'un liquide et qui en augmente localement la cohésion.

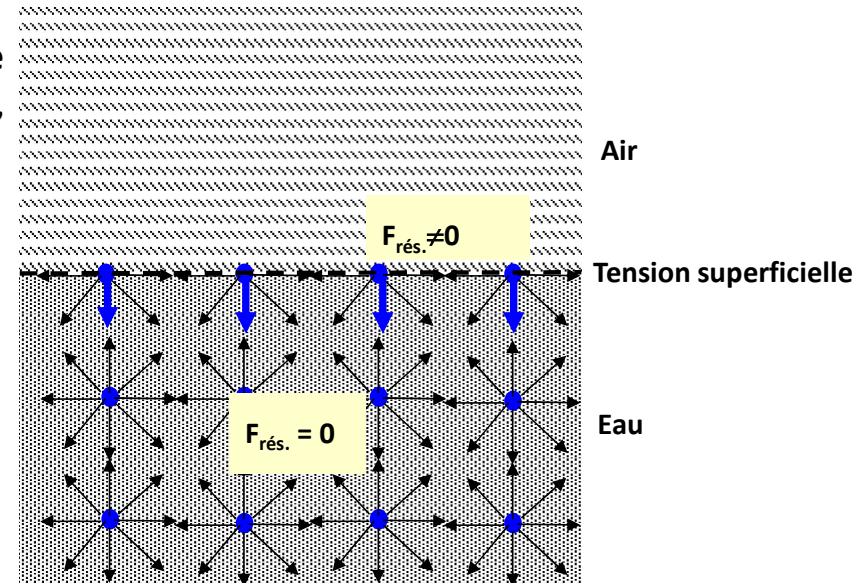
Cet effet permet par exemple aux insectes de marcher sur l'eau, à un objet léger de se maintenir à la surface d'un liquide, à la rosée de ne pas s'étaler sur les pétales de fleurs, et explique la capillarité.



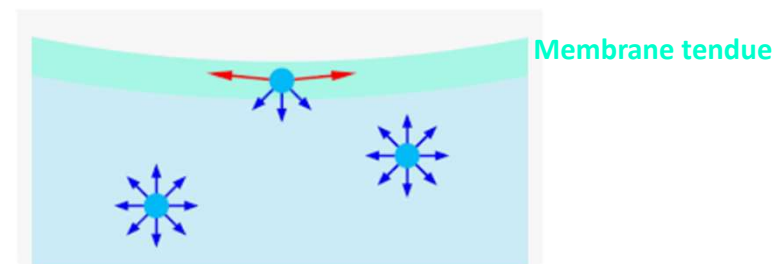
3.3 Tension superficielle (suite)

Au sein du liquide (eau) au repos, chaque molécule est soumise à l'attraction des molécules voisines. La résultante de ces forces, dirigées dans toutes les directions, est nulle.

A la surface de séparation entre le liquide et le gaz (air) qui le surmonte, les forces de cohésion ne présentent plus cette symétrie moyenne : chaque molécule subit de la part des molécules placées à l'intérieur du liquide, des forces d'attraction dont la résultante, normale à la surface est dirigée vers l'intérieur du fluide, n'est compensée par aucune autre force.

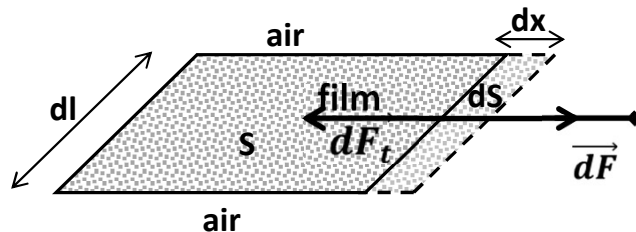


L'ensemble des molécules de surface se comportent donc comme une membrane tendue sur les autres molécules.



3.3 Tension superficielle (suite)

La tension superficielle est définie par la force de traction par unité de longueur agissant sur un élément de surface situé dans un plan tangent à la surface et qui s'oppose à la dilatation de celle-ci.



Soit un film d'un liquide de forme rectangulaire (figure). Pour augmenter la surface du film liquide de dS il faut exercer une force extérieure

$$dF = dF_t = \sigma \cdot dl$$

σ est la tension superficielle. Son unité dans le système SI est [N/m]. Il a été observé expérimentalement que la tension superficielle σ diminue quand la température augmente.

3.3 Tension superficielle (suite)

Quelques valeurs de σ pour certaines interfaces liquide-air.

Interface	Eau/air	Eau/air	Mercure/air
$\sigma(\text{N/m})$	0.076	0.073	0.48
$T(^{\circ}\text{C})$	0	20	15

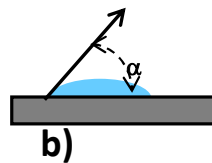
Angle de raccordement

Si l'on dépose une goutte d'un liquide sur une paroi solide plane et horizontale, on constate que ce liquide s'étale plus ou moins suivant sa mouillabilité. On distingue différents cas selon l'angle de raccordement α que fait la tangente de la surface de la goutte avec la surface solide.



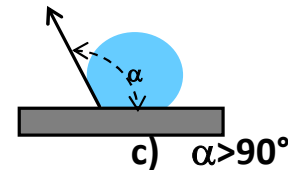
$\alpha=0^{\circ}$

a) mouillage parfait



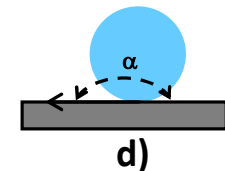
$\alpha < 90^{\circ}$ (alcool, eau)

b) liquide mouillant



(mercure)

c) liquide non mouillant



$\alpha=180^{\circ}$

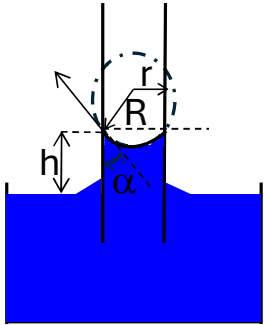
d) mouillage nul

L'angle de raccordement entre une paroi solide et un liquide ne dépend pas de la position de la paroi. Au contact d'une paroi verticale plongeant dans un liquide on retrouve les cas de mouillage précédents.

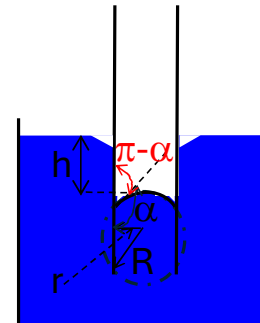
3.4 Capillarité

Si un tube capillaire de section petite (autour 3 mm) est plongé dans un liquide on observe les phénomènes suivants :

- Ascension capillaire pour le liquide mouillant (eau/verre) : le liquide s'élève dans le tube.



- Dépression capillaire pour le liquide non mouillant (mercure/verre) : le liquide descend dans le tube.



Loi de Jurin :
$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho g r}$$