

MECANIQUE DES FLUIDES

La mécanique des fluides fait partie de la science qui étudie les milieux continus. Cette partie de la science étudie le comportement des liquides et des gaz au repos (hydrostatique) et en mouvement (dynamique des fluides). La modélisation mathématique des phénomènes empiriques fait appel à des nombres sans dimensions.

INTRODUCTION

La mécanique des fluides est la science des lois de l'écoulement des fluides. Elle est la base du dimensionnement des conduites de fluides et des mécanismes de transfert des fluides. C'est une branche de la physique qui étudie les écoulements de fluides c'est-à-dire des liquides et des gaz lorsque ceux-ci subissent des forces ou des contraintes. Elle 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 :

l'hydraulique, l'hydrodynamique, l'aérodynamique, ... 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 très puissants : les supercalculateurs.

Les applications de la mécanique des fluides

Ingénierie : La mécanique des fluides fait partie des sciences de l'ingénieur qui pourra évaluer, prédire ou expliquer le comportement d'un fluide dans un circuit ou dans un environnement en fonction des conditions de fonctionnement.

Il pourra calculer un appareil et dimensionner un équipement (calcul d'une pompe ou d'un venturi par exemple).

Domaines : La mécanique des fluides a de nombreuses applications dans divers domaines comme l'ingénierie navale, l'aéronautique, mais aussi la météorologie, la climatologie ou encore l'océanographie.

Cela concerne donc tous les domaines industriels et scientifiques où on utilise de l'eau, un liquide organique quelconque ou un gaz. On peut imaginer facilement l'énorme étendue des secteurs utilisant la mécanique des fluides.

Ainsi, des secteurs comme les centrales nucléaires, les industries chimiques et alimentaires, l'aéronautique, la géologie, la météorologie, etc. vont faire appel à la mécanique des fluides.

LES ETATS DE LA MATIERE

Les trois états de la matière que nous rencontrons habituellement sont les états solide, liquide et gazeux (nous ne parlons pas ici des plasmas, et des cristaux liquides...).

C'est au niveau atomique qu'il faut chercher la différence de comportement entre eux, plus précisément sur les liaisons interatomiques.

De façon général, les atomes (ou molécules) d'un corps à une certaine température possèdent une agitation thermique (plus ou moins forte pour une température plus ou moins élevée).

Cette agitation a pour effet d'éloigner ces atomes les uns des autres :

- dans l'état solide, l'effet d'agitation thermique est négligeable parce que les atomes, du fait de liaisons rigides entre eux, vibrent dans leur ensemble (c'est la totalité du cristal qui absorbe cette énergie). Le solide possède un ordre à longue distance, c'est à dire que chaque atome est lié rigidement à ses plus proches voisins, mais aussi avec ceux plus éloignés, et ceux encore plus éloignés ...etc....

- dans l'état gazeux par contre, les atomes n'ont quasiment aucune interaction les uns avec les autres, et l'agitation thermique introduit un désordre total (un atome subit de la part des autres atomes du gaz, dans les conditions usuelles, un nombre de chocs de l'ordre d milliard par seconde !). Le gaz ne possède absolument aucun ordre, chaque atome est totalement indépendant vis à vis des autres

- dans l'état liquide, la situation est plus délicate à décrire, ce n'est ni un désordre total, ni un ordre absolu. Chaque atome garde ses plus proches voisins, mais bouge par rapport aux autres. Il en résulte un ordre à courte portée.

L'expérience courante confirme bien qu'il est très facile de modifier la forme d'un gaz ou d'un liquide (forces interatomiques très faibles et faibles), mais, généralement, pour un solide l'effort à fournir est beaucoup plus important (forces interatomiques fortes).

1. Notion de fluide

Solide, fluide ... la distinction semble naturelle. Elle définit différents états de la matière, de l'organisation régulière et stable des atomes (qui caractérise les solides), à l'agitation libre des molécules (qui caractérise les gaz).

Pour le mécanicien, un solide a une forme propre. Il peut être considéré comme indéformable, S'il est déformable, alors sa déformation finale est constante dans un champ de sollicitations constant (propriété utilisée en résistance des matériaux et en dimensionnement des structures où le solide est supposé élastique).

le fluide est un milieu continu (pas d'étude au niveau des atomes en mécanique des fluides).

Les fluides sont des substances capables de s'écouler et de prendre la forme du récipient qui les contient : ils continuent à se déformer, même sous sollicitations constantes.

La distinction est délicate pour certains matériaux (asphalte, argile, gélatine) ou à certaines températures (phénomène du fluage des solides).

On peut répartir les fluides en liquides et en gaz.

Les liquides occupent des volumes bien définis et présentent des surfaces libres. Ils sont quasi incompressibles.

Les gaz se dilatent jusqu'à occuper tout le volume offert. Ils sont très compressibles.

- Liquides et gaz

Les liquides et gaz habituellement étudiés sont isotropes, mobiles et visqueux. La propriété physique qui permet de faire la différence entre les deux est la compressibilité (la variation de volume du corps en réponse à une variation de pression).

- l'isotropie assure que les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.

- la mobilité fait qu'ils n'ont pas de forme propre et qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient.
- la viscosité caractérise le fait que tout changement de forme d'un fluide réel s'accompagne d'une résistance (frottements).

Les types de fluides et leurs propriétés

Compressibilité

La compressibilité d'un corps représente la variation de volume du corps en réponse à une variation de pression. Les liquides sont des fluides non compressibles, c'est-à-dire que leur volume ne change pas quelle que soit la force de la contrainte exercée alors que les gaz sont eux des fluides compressibles dont la pression varie de façon inversement proportionnelle au volume.

On définit le module de compressibilité à température constante χ_T à partir de la variation relative de volume et de la variation de pression : elle **s'exprime en Pa⁻¹**.

$$\chi_T = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p}$$

Propriétés physiques

Les principales propriétés physiques des fluides sont la masse volumique ou masse par unité de volume et la viscosité qui mesure la résistance du fluide au changement de forme.

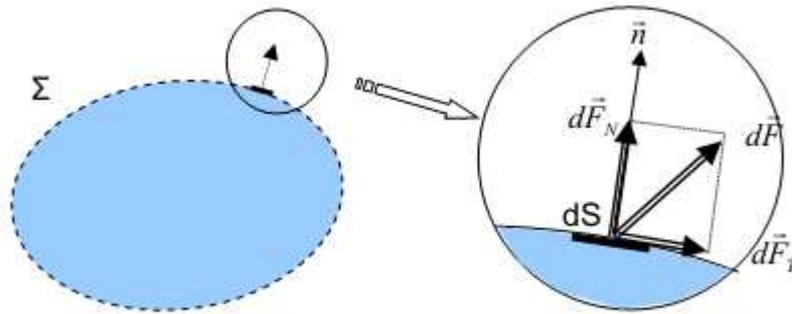
Fluides newtoniens et non newtoniens

Les fluides sont classés selon la variation de leur viscosité en fonction de la contrainte exercée à une température donnée. On parle de fluide newtonien lorsque la viscosité reste constante quand la contrainte varie, l'eau est un fluide newtonien. En revanche, le fluide est non newtonien si la viscosité varie lorsque la contrainte varie, la pâte de dentifrice, la boue liquide ou le yaourt sont des fluides non newtoniens.

Les fluides peuvent être classés en fluides parfaits (sans frottement), fluides réels (avec frottement), fluides incompressibles (liquides) et fluides compressibles (gaz).

Fluide parfait

Soit un système fluide, c'est-à-dire un volume délimité par une surface fermée S fictive ou non.



Considérons $d\vec{F}$ la force d'interaction au niveau de la surface élémentaire dS de normale \vec{n} entre le fluide et le milieu extérieur. On peut toujours décomposer $d\vec{F}$ en deux composantes:

- une composante $d\vec{F}_T$ tangentielle à dS .
- une composante $d\vec{F}_N$ normale à dS .

En mécanique des fluides, un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de frottement. C'est à dire quand la composante $d\vec{F}_T$ est nulle. Autrement dit, la force $d\vec{F}$ est normale à l'élément de surface dS .

2.2 Fluide réel

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. Ce phénomène de frottement visqueux apparaît lors du mouvement du fluide.

C'est uniquement au repos, qu'on admettra que le fluide réel se comporte comme un fluide parfait, et on suppose que les forces de contact sont perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquels elles s'exercent. La statique des fluides réels se confond avec la statique des fluides parfaits.

2.3 Fluide 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.)

2.4 Fluide compressible

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.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

- 1- La masse volumique : c'est le rapport entre une masse « m » de matière homogène et le volume V occupé par cette masse:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ en } kg.m^{-3}$$

2- Poids volumique

ϖ : Poids volumique en (N/m³).

m : masse en (kg),

g : accélération de la pesanteur en (m/s²),

V : volume en (m³).

$$\varpi = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g$$

3- Densité

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

Dans le cas des liquides on prendra l'eau comme fluide de référence. Dans le cas des gaz on prendra l'air comme fluide de référence.

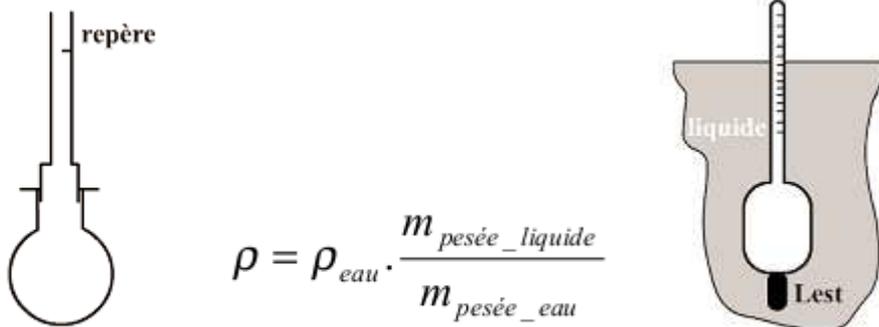
e- Mesures de ρ et d

• pour les liquides :

1- *La méthode du flacon* : on utilise un flacon à col effilé, appelé pycnomètre constitué d'un ballon de verre et de son bouchon de forme particulière.

On maintient le flacon à la température voulue, on le remplit du liquide étudié jusqu'au repère et on le pèse, on recommence avec de l'eau (ou le liquide choisi pour référence).

Le rapport des masses obtenues donne le rapport des masses volumiques, on en déduit celle cherchée... Les deux pesées étant faites à même température,

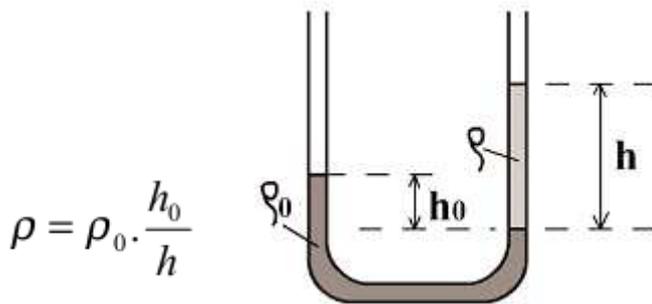


2- *La méthode du densimètre (ou aréomètre)* : un tube en verre, chargé dans sa partie inférieure est placé dans le liquide étudié ; généralement il flotte (sinon, on choisit un autre aréomètre) laissant dépasser hors du liquide une partie de sa tige cylindrique. Plus la longueur émergente est importante, plus la masse volumique est élevée. Il suffit d'étalonner et de graduer la tige à partir de liquides connus. Ces appareils sont très précis.

Un densimètre est un flotteur dont le volume immergé dépend de la masse volumique (ou de la densité par rapport à l'eau) du liquide dans lequel il est plongé. Son principe de fonctionnement est donc lié à la poussée d'Archimède. Il est composé d'une partie renflée et lestée pour flotter verticalement, surmontée d'une tige cylindrique graduée et qui émerge toujours partiellement du liquide.

Plus le liquide est dense, moins le densimètre s'enfonce. Dans l'eau pure l'indication du densimètre sera 1 (la densité est un rapport) ou 1000kg/m³.

3- La méthode du tube en U : (cf chap. Statique des fluides) : On verse les deux liquides dans un tube en U et on a :



Lorsque le fluide garde une masse volumique constante, on dit que le fluide est incompressible. Dans le cas contraire, on parle de fluide compressible. Les liquides peuvent être considérés, dans une large mesure, comme incompressibles. Ce n'est pas le cas pour les gaz.

$\rho = C^{te}$ pour un fluide incompressible

4. Viscosité

La viscosité se définit comme la résistance opposée par le fluide à sa mise en mouvement.

C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit sa capacité à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. C'est à dire, les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. Elle peut être mesurée par un viscosimètre à chute de bille, dans lequel en mesure le temps écoulé pour la chute d'une bille dans le fluide. Elle peut également être mesurée par un récipient dont le fond comporte un orifice de taille standardisée. La vitesse à laquelle le fluide s'écoule par cet orifice permet de déterminer la viscosité du fluide.

La viscosité est déterminée par la capacité d'entraînement que possède une couche en mouvement sur les autres couches adjacentes.

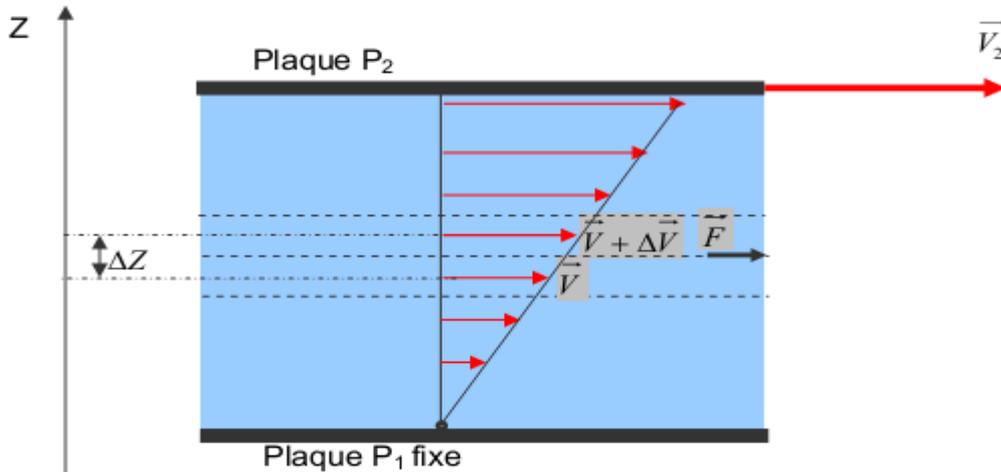
Par exemple, si on considère un fluide visqueux placé entre deux plaques P1 et P2, tel que la plaque P1 est fixe et la plaque P2 est animée d'une vitesse V2.

L'expérience décrite ci-après illustre le phénomène physique.

Soit un volume de fluide contenu entre une paroi fixe horizontale et une paroi mobile parallèle, de surface A, soumise à une force F qui l'entraîne à vitesse constante v.

h note la distance entre les parois.

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse. Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance Z. On distingue la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.



Viscosité dynamique

La viscosité dynamique exprime la proportionnalité entre la force qu'il faut exercer sur une plaque lorsqu'elle est plongée dans un courant et la variation de vitesse des veines de fluide entre les 2 faces de la plaque. . . Elle est exprimée par un coefficient représentant la contrainte de cisaillement nécessaire pour produire un gradient de vitesse d'écoulement d'une unité dans la matière.

Considérons deux couches de fluide adjacentes distantes de Δz . La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit Δv , à leur surface S et inversement proportionnelle à Δz : Le facteur de proportionnalité μ est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

$$F = \mu S \cdot \frac{\Delta V}{\Delta Z} \quad * \quad \mu = \frac{\tau_{xy}}{\frac{dv}{dy}}$$

L'unité de la viscosité dynamique est le poiseuille : Pascal seconde Pa.s

En un point $M(x, y)$, la viscosité dynamique (ou absolue) se définit comme le rapport du cisaillement dans le plan (x, y) au gradient de la vitesse.

où :

F : force de glissement entre les couches en (N),

μ : Viscosité dynamique en (kg/m.s),

S : surface de contact entre deux couches en (m²),

Δv : Écart de vitesse entre deux couches en (m/s),

Δz : Distance entre deux couches en (m).

Pour un fluide parfait, on a : $\mu = 0$, pour un fluide newtonien, $\mu = \text{constante}$.

La viscosité varie avec la température et avec la pression.

Viscosité cinématique

La viscosité cinématique est le quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide. Elle représente la capacité de rétention des particules du fluide et quantifie sa capacité à s'épancher.

La viscosité cinématique caractérise le temps d'écoulement d'un liquide. Par contre, la viscosité dynamique correspond à la réalité physique du comportement d'un fluide soumis à une sollicitation (effort). En d'autre terme, cette dernière exprime la « rigidité » d'un fluide à une vitesse de déformation en cisaillement. L'unité de la viscosité cinématique est le (m²/s).

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

Lorsque la température augmente, la viscosité d'un fluide décroît car sa densité diminue.

$$\nu_{\text{eau}} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Facteurs influençant la viscosité

- influence de la température : la viscosité est très sensible à la température. Quand il y a élévation de température la viscosité diminue pour les liquides, et augmente pour les gaz.

Il existe des relations empiriques qui tentent de modéliser cette influence.

- influence de la pression :

la viscosité ne varie quasiment pas avec la pression. Cette influence peut être négligée pour les liquides en-dessous de 40 bars, et en-dessous de 20 bars pour les gaz.

e- Mesure de la viscosité

Il existe de nombreux dispositifs possibles. Citons les plus utilisés.

viscosimètre de Poiseuille : il utilise la loi de Poiseuille. On fait passer le liquide à étudier dans un tube capillaire parfaitement calibré (rayon compris entre 0,01 mm et 0,5 mm), et on mesure le débit en chronométrant le temps nécessaire à l'écoulement d'un certain volume.

- avec un liquide de référence (eau à une température précise par ex.) :

$$Q_{V0} = \frac{\text{volume}}{t_0} = \frac{\pi \cdot r^4}{8\eta \cdot L} \Delta p_0 \quad \text{où } \Delta p_0 = k \cdot \rho_0$$

• avec le liquide à étudier :

$$Q_V = \frac{\text{volume}}{t} = \frac{\pi \cdot r^4}{8\eta \cdot L} \Delta p \quad \text{où } \Delta p = k \cdot \rho$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{t}{t_0}$$

Le rapport des deux débits donne l'équation :

La mesure est relative à la connaissance d'une viscosité pour un liquide (eau par ex.)

viscosimètre à chute de bille (ou viscosimètre d'Hoepler)

on laisse tomber une bille sphérique dans un tube renfermant le liquide à étudier. Si la bille est convenablement choisie (bon rayon R, bonne masse volumique bille ρ ...) alors, la vitesse « V » de chute entre deux repères devient rapidement constante du fait des forces de viscosité. Dans ces conditions on montre que (loi de Stokes) :

$$\eta = \frac{2 \cdot R^2}{9 \cdot V} \cdot g \cdot (\rho_{\text{bille}} - \rho_{\text{liquide}})$$

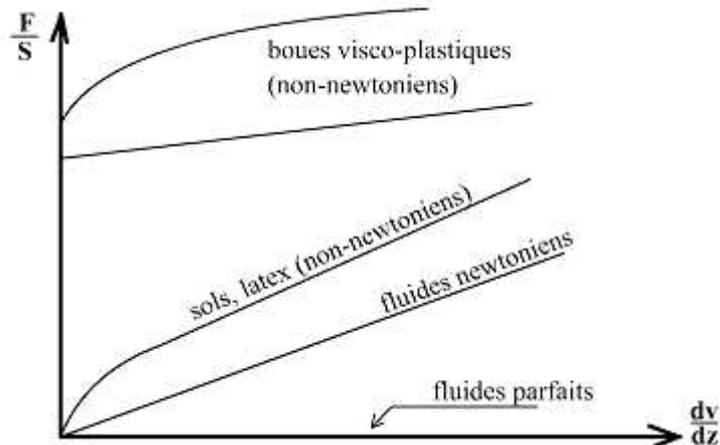
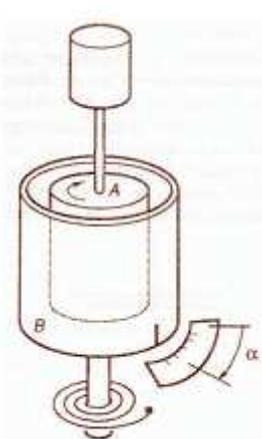
Par chronométrage on mesure aisément la vitesse V (qui doit impérativement être constante entre les deux repères distant de L !) : $V = L/C$

La mesure est ici absolue.

viscosimètre rotatif

ces viscosimètres peuvent avoir des conceptions différentes, mais il repose sur le même principe : on fait tourner le rotor (très fin) d'un moteur dans une couche du liquide à étudier, et on mesure le couple de freinage exercé par ce liquide.....

Le moteur entraîne le cylindre A . Entre le cylindre et le vase B, on a placé le liquide à étudier. Les forces de viscosité provoquent une rotation du vase. Le ressort de torsion permet de mesurer le couple ainsi transmis au vase.



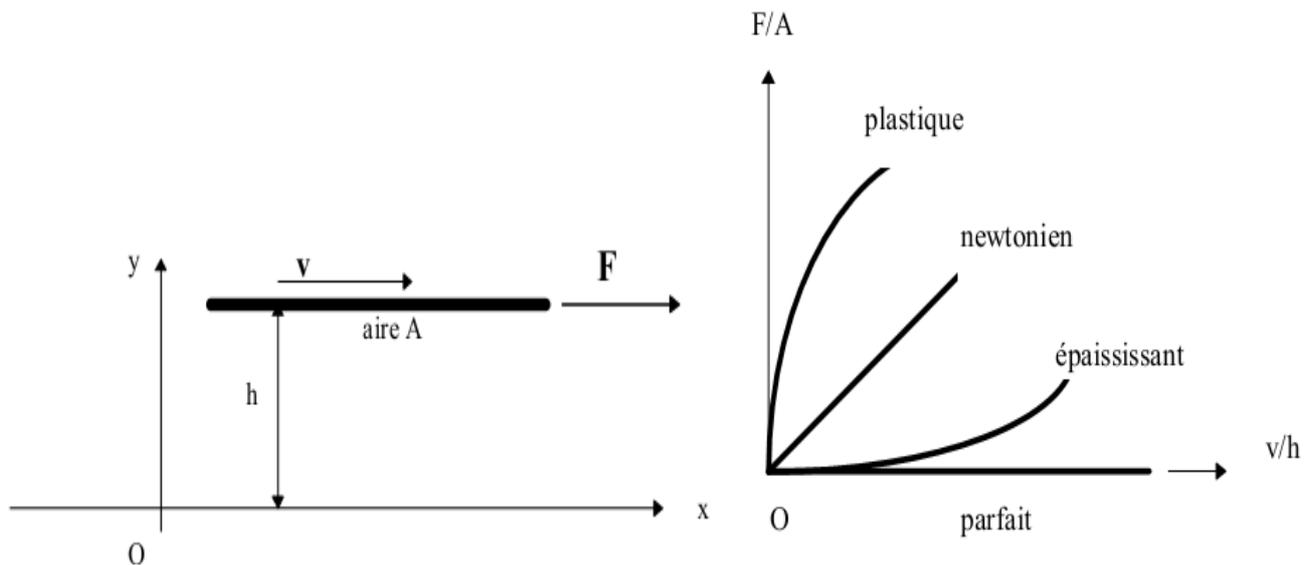
f- une nouvelle distinction pour les fluides

La viscosité permet à nouveau d'introduire différents types de fluides.

- 1- les fluides parfaits : ce sont les fluides qui ont une viscosité nulle
- 2- les fluides newtoniens : ce sont les fluides dont la viscosité répond à la définition ci-dessus. Il s'agit des gaz et des liquides purs comme l'eau, les alcools et la glycérine
- 3- - les fluides non-newtoniens : ces fluides ont une viscosité très complexe, qui ne répond pas à la relation de linéarité ci-dessus. Ce sont les argiles, les latex, les boues....

Application :

Soit un volume de fluide contenu entre une paroi fixe horizontale et une paroi mobile parallèle, de surface A, soumise à une force F qui l'entraîne à vitesse constante v. h note la distance entre les parois.



En étudiant le rapport entre F/A (homogène à une contrainte) et v/h (homogène au gradient de la vitesse), on met en évidence plusieurs types de comportement : fluide parfait, fluide newtonien, fluide épaississant, fluide plastique.

Applications

- 1)- Déterminer le poids volumique de l'essence sachant que sa densité $d=0,7$.

$$\overline{\omega} = d \cdot \rho \cdot g \text{ A.N. } \overline{\omega} = 0,7 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 6867 \text{ N/m}^3$$

- 2)- Calculer le poids P_0 d'un volume $V=3$ litres d'huile d'olive ayant une densité $d=0,918$.

$$P_0 = d \cdot \rho \cdot V \cdot g \text{ A.N. } P_0 = 0,918 \cdot 1000 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 = 27 \text{ N}$$

- 3)- Quelle est l'influence de la température sur la viscosité ?

Si la température augmente la viscosité diminue, et inversement.

- 4)- La viscosité cinématique est proportionnelle au temps mis par une bille sphérique en chute pour descendre au fond d'un tube contenant un fluide de viscosité inconnue.

Les grands principes de la mécanique des fluides

Régimes d'écoulement

Un écoulement est caractérisé par son régime. Il est laminaire lorsqu'à un instant "t", tous les vecteurs de vitesse du fluide sont parallèles et égaux. Le régime est turbulent dans le cas contraire (vecteurs vitesses de direction et de normes différents).

Le nombre de Reynolds qui définit un régime d'écoulement varie de façon inversement proportionnelle à la viscosité et proportionnelle au diamètre de la section du tube où a lieu l'écoulement.

Loi de Bernoulli

Pour un fluide parfait (force de frottement sur les parois nulles) dans un tube de petite section, il y a conservation de l'énergie en tout point du tube.

Cette loi explique que, dans le cas d'une restriction dans un tube, pour maintenir un débit constant, c'est la vitesse qui augmente au niveau de la restriction.