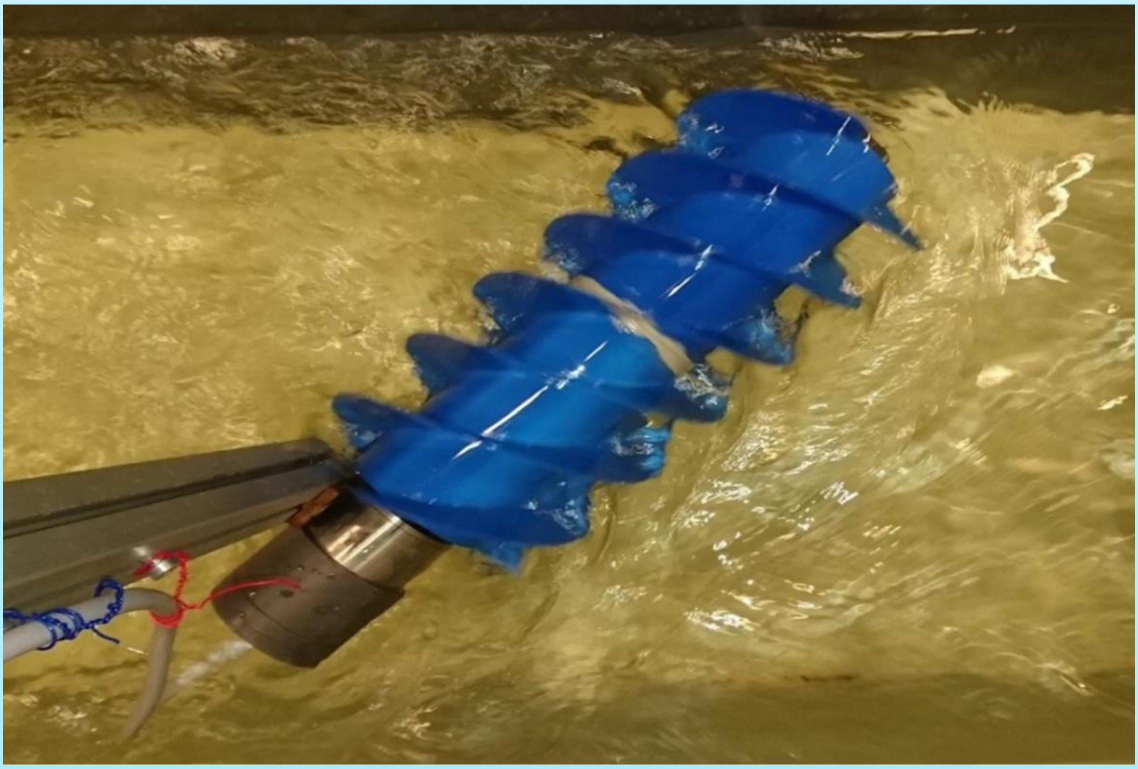
Université Hamma Lakhder d'EL-OUED

Faculté de technologie
Département de Génie des Procédés ET Industries Pétrochimiques. 2éme EM / LMD

Polycopié de la matière :

MECANIQUE DES FLUIDES

Cours



Fait par :

Mehayech abdelmalek

Chapitre 1 : généralité sur la Mécanique des Fluides

Chapitre 2 : Propriétés physiques des fluides

Chapitre 3 : Hydrostatique

Chapitre I : généralité sur la Mécanique des Fluides

1. Introduction

La mécanique des fluides est la science des lois de I ‘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 Computationnel Fluides 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.

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.

2. La mécanique des fluides :

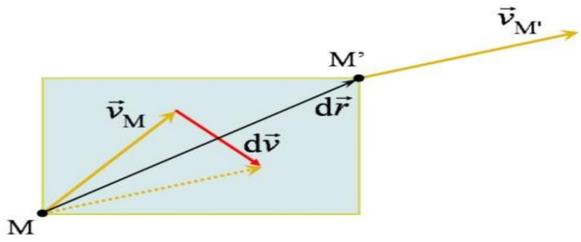
Une branche de la physique qui s’intéresse à la description de l’état du fluide (mouvement ou repos), Ce dernier se distingue par deux types :

- liquide
- Gaz

3. Description de mouvement de fluide:

La particule de fluide : est choisie comme entité élémentaire permettant une description complète d’écoulement, il s’agit paquet de molécule déplacé avec le fluide

- Pour l’étude de mouvement on introduit la position et la vitesse

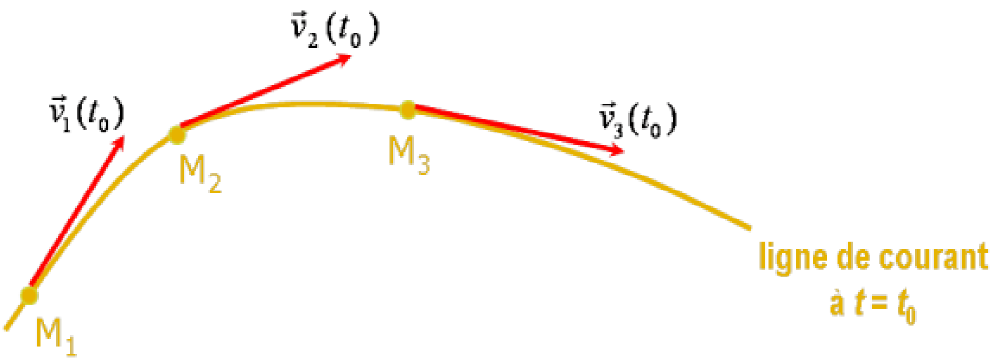


Approche Lagrangienne	Approche Eulérienne
Description Lagrangienne	Description Eulérienne
Le point suivi est mobile	Le point est fixe
On suit la position de mouvement et trajectoire	On s'intéresse champ de vitesse et ligne de courant
x(t) y(t) z(t)	$V_x = V(x, y, z)$ $V_x = V(x, y, z)$ $V_x = V(x, y, z),$

4. Ligne de courant et trajectoire

a. Ligne de courant

Une courbe tangente en chaque point à la vectrice vitesse $\vec{V}$ locale affecté à ce point



- L'équation des lignes de courant se déduit directement de cette définition en écrivant qu'un petit déplacement dx sur la ligne de courant est colinéaire à la vectrice vitesse:

$$\vec{V} \wedge \overrightarrow{dx} = 0$$

- En explicitant cette relation, on obtient:

$$\begin{cases} V_y dz - V_z dy = 0 \\ V_z dx - V_x dz = 0 \\ V_x dy - V_y d_x = 0 \end{cases}$$

- Les lignes de courant sont donc les intégrales du système différentiel :

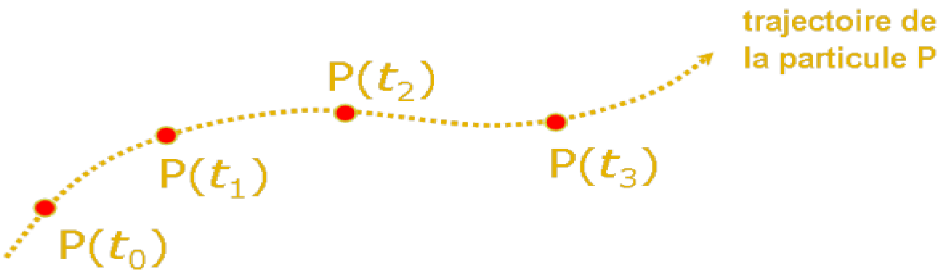
$$\frac{\mathbf{dx}}{\mathbf{V_x}} = \frac{\mathbf{dy}}{\mathbf{V_y}} = \frac{\mathbf{dz}}{\mathbf{V_z}}$$

- Dans lequel t a la valeur fixée (et joue donc le rôle d'un paramètre).

➢ **Contrairement aux trajectoires, les lignes de courant ne peuvent pas se couper. Elles ne sont pas définies à un point d'arrêt $\vec{V} = \vec{0}$.**

b. Trajectoire

La trajectoire d'une particule **M** représentée par des lignes que cette particule suit pendant son mouvement



- Pour déterminer l'équation de la trajectoire, Il suffit de résoudre les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_x = \frac{dx}{dt} \\ V_y = \frac{dy}{dt} \\ V_z = \frac{dz}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \int_{x_0}^{x} dx = \int_{t_0}^{t} V_x dt \\ \int_{y_0}^{y} dx = \int_{t_0}^{t} V_y dt \\ \int_{z_0}^{z} dx = \int_{t_0}^{t} V_z dt \end{cases}$$

5. Dérivée particulaire

Une de ces grandeurs est le champ de vitesse. Il s'agit d'une fonction vectorielle de la position et du temps avec les composantes **u, v** et **w**. Dans un système Eulérien, la formulation du vecteur de vitesse en coordonnées cartésiennes est définie comme :

$$\vec{V} = u(x,y,z,t)\vec{\imath} + v(x,y,z,t)\vec{\jmath} + w(x,y,z,t)\vec{k}$$

➢ La dérivée totale par rapport au temps du vecteur de vitesse est le vecteur d'accélération$\vec{a}$.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d[u(x,y,z,t)]}{dx}\vec{\imath} + \frac{d[v(x,y,z,t)]}{dx}\vec{\jmath} + \frac{d[w(x,y,z,t)]}{dx}\vec{k} +$$

➢ Pour la composante de vitesse u, on peut écrire :

$$\frac{d[u(x,y,z,t)]}{dx} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t}\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t}\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t}\frac{\partial z}{\partial t}$$

$$= \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{t}} + (\vec{\boldsymbol{V}}.\boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u}$$

- De même pour les composantes v et w, on a :

$$\frac{d[v(x,y,z,t)]}{dx} = \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{t}} + (\vec{\boldsymbol{V}}.\boldsymbol{\nabla})\,\boldsymbol{v}$$

$$\frac{d[w(x,y,z,t)]}{dx} = \frac{\partial \boldsymbol{w}}{\partial \boldsymbol{t}} + (\vec{\boldsymbol{V}}.\boldsymbol{\nabla})\,\boldsymbol{w}$$

- Sommons les trois termes précédents, on écrit :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{t}} + \left(\boldsymbol{u}\frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{x}} + \boldsymbol{v}\frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{y}} + \boldsymbol{w}\frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{z}}\right) = \frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{t}} + (\vec{\boldsymbol{V}}.\boldsymbol{\nabla})\vec{\boldsymbol{V}}$$

- Ou,

$$\vec{\boldsymbol{V}} = \boldsymbol{u}\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}} + \boldsymbol{v}\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{y}} + \boldsymbol{w}\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{z}} \qquad \textbf{Et} \qquad \boldsymbol{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}}\vec{\boldsymbol{\imath}} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{y}}\vec{\boldsymbol{\jmath}} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{z}}\vec{\boldsymbol{k}}$$

- Il vient donc :

$$a_x = \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{t}} + \boldsymbol{u}\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{x}} + \boldsymbol{v}\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{y}} + \boldsymbol{w}\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{z}}$$

$$a_y = \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{t}} + \boldsymbol{u}\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{x}} + \boldsymbol{v}\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{y}} + \boldsymbol{w}\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{z}}$$

$$a_y = \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{t}} + \boldsymbol{u}\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{x}} + \boldsymbol{v}\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{y}} + \boldsymbol{w}\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial \boldsymbol{z}}$$

- Dans l’équation ci-dessus$\frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{t}}$**,** est appelée « accélération locale » ce terme traduit la non permanence de l'écoulement, il est nul pour un écoulement permanent. La deuxième partie, $\boldsymbol{u}\frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{x}} + \boldsymbol{v}\frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{y}} + \boldsymbol{w}\frac{\partial \vec{\boldsymbol{V}}}{\partial \boldsymbol{z}}$ est appelée l’accélération convective. Ce terme traduit le non uniformité de l'écoulement.
- La dérivée temporelle totale $\frac{d\vec{V}}{dt}$ est appelée « dérivée matérielle où particulaire ». Ce concept peut être appliqué sur n’importe quelle grandeur (vecteur ou scalaire).

6. Configuration d’écoulement

Un système d’écoulement d’eau souterraine peut être représenté par un ensemble de surfaces équipotentielles auxquelles correspondent des lignes d’écoulement leur étant orthogonales. Lorsqu’une coupe transversale significative l’ensemble de lignes équipotentielles et de lignes d’écoulement y étant représenté constitue un réseau d’écoulement. La construction de réseaux d’écoulement représente l’un des outils analytiques les plus puissants pour l’analyse de l’écoulement de l’eau souterraine.

- **Profile de vitesse**

- On appelle configuration découle un ensemble de ligne courant, il existe plusieurs configuration
  - **Ecoulement unidirectionnelle**

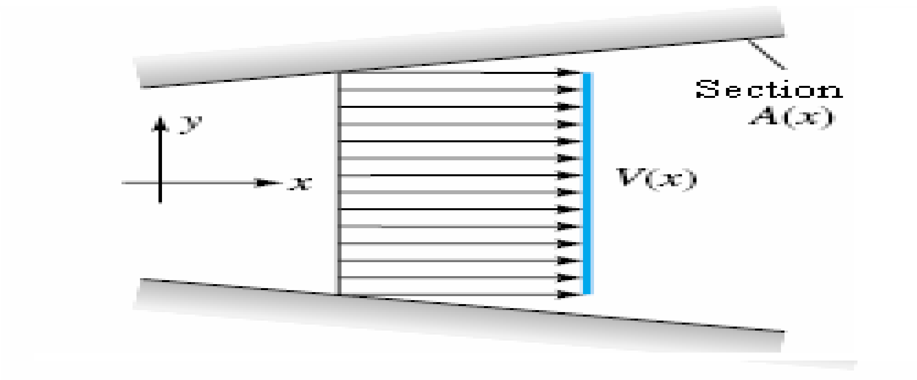
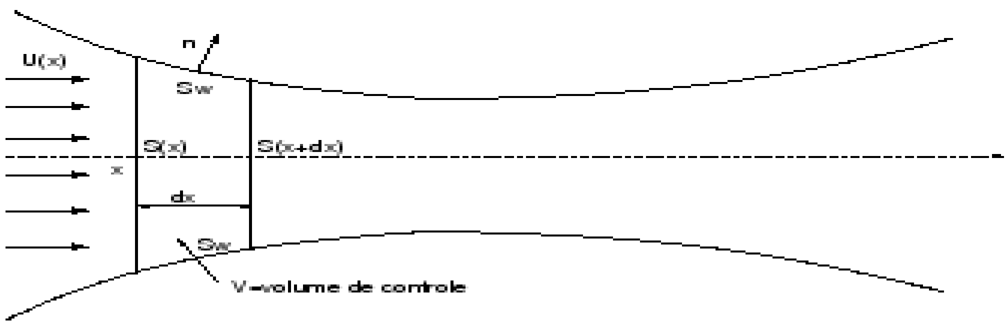


Figure : Ecoulement unidirectionnelle

L'écoulement unidirectionnel toute les point de vecteur vitesse est parallèle à une direction fixe (o x).

$$\vec{V}\begin{cases} V_x = V_x(x,y,z,t) \\ V_y = 0 \\ V_z = 0 \end{cases}$$

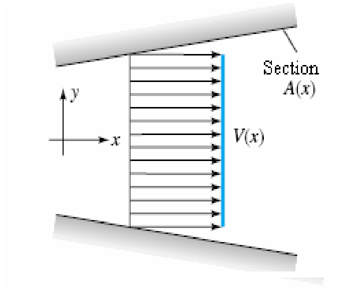
  - **Ecoulement convergent-divergent**
- Dans cette configuration toutes les lignes de courant convergent vers un même point à gouache alors quelles divergent à droit, une telle configuration est imposé par la forme des parois qui canalisent l'écoulement s'appelé convergent-divergent entre les 2.



  - **Ecoulement avec recirculations**

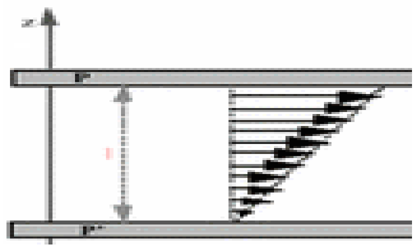
- On appelle écoulement avec recirculation un écoulement ou il existe des zone tourne en rond ; c'est les zone notes

- Profile de vitesse d’un écoulement unidirectionnel dans ce cas on peut avoir 3 profile de vitesse schématique sur les figure suivantes
  - **Profile vitesse uniforme**



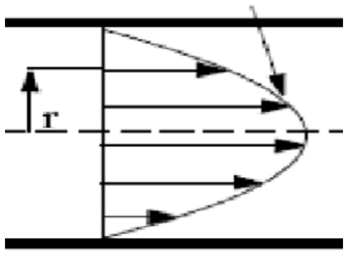
- ✓ $\forall y$
- ✓ $V_x = cste$
- ✓ $V_x \neq f(y)$

  - **Profile de vitesse linaire**
- ✓ $V_x = f(y)$
- ✓ $V_x \neq cste$
- ✓ $V_x = ay + b$



  - **Profile de vitesse parabolique**

$V_x = ay^2 + by + c$



7. Rappels mathématique

a. Analyse vectorielle et élément de calcule indiciel

6.1.2. Champs scalaires et vectoriels

- **Scalaire**

Le scalaire est une quantité qui peut être exprimée par un nombre unique représentant sa grandeur. Exemple : masse, pression, densité et température.

- **Champ scalaire**

Si à chaque point d'un domaine, une fonction scalaire a une valeur définie, le domaine est appelé un champ scalaire. Exemple : Distribution de pression, distribution de température dans une ailette.

- **Vecteur**

Le vecteur est une quantité, qui est spécifiée à la fois par la magnitude et la direction. Exemple : Force, Vitesse et Déplacement.

- **Champ de vecteur**

Si à chaque point d'un domaine, une fonction vectorielle a une valeur définie, le domaine est appelée un champ vectoriel. Exemple : champ de vitesse d'un fluide en écoulement.

- **Champ d'écoulement**

Le domaine dans lequel les paramètres d'écoulement, c'est-à-dire la vitesse, la pression, etc., sont définis à chaque point et à chaque instant est appelée un champ d'écoulement. Ainsi, un champ d'écoulement serait spécifié par les vitesses à différents points de la région à des moments différents

- **Les opérateurs mathématiques**

Opérateur	**Notation**	**Notation**
Gradient	Le gradient est un opérateur qui s'applique sur toute fonction scalaire, ou champ scalaire, continue et dérivable et donne à un vecteur.	$\overrightarrow{\mathbf{grad}}\,\mathbf{V} = \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)\vec{\imath} + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)\vec{\jmath} + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)\vec{k}$
Divergent	Le divergence s'applique sur un champ scalaire et donne un scalaire	$div\,\vec{V} = \left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial V_z}{\partial z}\right)$
Rotationnel	le rotationnel s'applique sur un vecteur est donne un vecteur	$\overrightarrow{rot}\,\vec{V} = \vec{r}\wedge\vec{V} = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ V_x & V_y & V_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix}$
Laplace	Le Laplace scalaire s'applique sur un champ scalaire est donne un scalaire	$\Delta V = \vec{\nabla}^2 V = \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right)$
Laplace vectoriel	Le Laplace vecteur s'applique sur un vecteur est donne un vecteur	$\vec{\Delta}\,\vec{V} = \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}\right)\vec{i} + \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2}\right)\vec{j} + (\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2})\vec{k}$

$\vec{\imath}, \vec{\jmath}\ et\ \vec{k}$ **Des vecteurs unitaires d'une base orthonormée directe**

ATTENTION : Le vecteur nabla n'est défini qu'en coordonnées cartésiennes

6.2. élément de calcule indiciel

- Nous utilisons par la suite des symboles mathématiques: coordonnées, composantes de vecteurs et tenseurs, éléments de matrice, etc., dont le nombre, dans chaque catégorie, est grand ou indéterminé. Pour distinguer les divers symboles d'une catégorie nous employons des indices. Par exemple, au lieu des variables traditionnelles x, y, z nous utiliserons éventuellement les grandeurs équation (comme nous l'avons déjà fait en algèbre linéaire). Cette notation devient indispensable lorsque nous avons des variables en nombre indéterminé.
- Ainsi, si nous avons n variables, nous les noterons : x, y, z ....
- Nous utilisons également des indices supérieurs, selon les besoins; par exemple, x, y, z. Afin d'éviter toute confusion avec l'écriture des puissances, la quantité x_i à la puissance p sera écrite$(x_i)_P$. Lorsque le contexte écarte tout risque d'ambiguïté, l'utilisation des parenthèses n'est cependant pas fondamentalement nécessaire.
- En calcul tensoriel il existe une convention de sommation qui consiste à utiliser le fait que l'indice répété, ici l'indice i, va devenir lui-même l'indication de la sommation. Nous écrivons alors, avec cette convention

$$\sum_{i=1}^{n} x^i\, y^i = x^i y^i = x^1 y^1 + x^2 y^2 + \cdots + x^n y^n$$

- Nous écrirons (remarquez bien comment s'écrivent les composants de la matrice associée) :

$$a_{ij} x_j = b_i$$

- en spécifiant que c'est pour : n=3
- Nous voyons sur cet exemple, combien la convention de sommation permet une écriture condensée et donc puissante
- La convention de sommation s'étend à tous les symboles mathématiques comportant des indices répétés. Ainsi la décomposition d'un$\vec{x}$ vecteur equation sur une base$(\overrightarrow{e_1}, \overrightarrow{e_2}, \overrightarrow{e_3}$ s'écrit pour n=3 dès lors :

$$\vec{x} = x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2 + x_3 \vec{e}_3 = x_n \vec{e}_n$$

Chapitre II : Propriétés physiques des fluides

1. Introduction

- ❖ 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. Les forces de cohésion entres particules élémentaires sont
- ❖ très faibles de sorte que le fluide est un corps sans forme propre qui prend la forme du récipient qui le contient, par exemple: les métaux en fusion sont des fluides qui permettent par moulage d'obtenir des pièces brutes de formes complexes.
- ❖ On insiste sur le fait qu'un fluide est supposé être un milieu continu : même si l'on choisit un très petit élément de volume, il sera toujours beaucoup plus grand que la dimension des molécules qui le constitue. Par exemple, une gouttelette de brouillard, aussi petite soit-elle à notre échelle, est toujours immense à l'échelle moléculaire. Elle sera toujours considérée comme un milieu continu. Parmi les fluides, on fait souvent la distinction entre liquides et gaz.
- ❖ Les fluides peuvent aussi se classer en deux familles relativement par leur viscosité. La viscosité est une de leur caractéristique physico-chimique qui sera définie dans la suite du cours et qui définit le frottement interne des fluides. Les fluides peuvent être classés en deux grande familles : La famille des fluides "newtoniens" (comme l'eau, l'air et la plupart des gaz) et celle des fluides "non newtoniens" (quasiment tout le reste... le sang, les gels, les boues, les pâtes, les suspensions, les émulsions...). Les fluides "newtoniens" ont une viscosité constante ou qui ne peut varier qu'en fonction de la température. La deuxième famille est constituée par les fluides "non newtoniens" qui ont la particularité d'avoir leur viscosité qui varie en fonction de la vitesse et des contraintes qu'ils subissent lorsque ceux-ci s'écoulent.

2. La masse volumique

- Est défini comme étant le rapport entre la masse du fluide est son volume.

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

Avec : m : la masse de fluide en kg

V : volume de fluide en m^3

- La masse volumique d'un fluide dépend des variables d'état (P et V).
- Étant donné la pression $P = P(x, y, z, t)$
- Et la température $T = T(x, y, z, t)$

- On déduit que : $\rho = \rho(x, y, z, t)$
    - **Cas particulier** : masse volumique de l'aire (ATMOSPHERIQUE)
    - **Hypothèse :** l'aire suppose se comporte sensiblement comme un gaz parfait

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ ....(1)}$$

Gaz parfait : $PV = nRT$

$$V = \frac{nRT}{P} \text{..(2)}$$

- Injecte équation (1) dans (2)
  $\boldsymbol{\rho = \frac{mP}{nRT} = \frac{MP}{RT}}$ Cette équation pour un gaz parfait
- Avec : P=P_a=1atm= 1,013 bar
- M : la masse molaire
- R =8,31 J/mol. K
- N (newton)=kg. m/ S^2 / Pascal= kg/m.S^{-2}

2.1. Poids volumique$\boldsymbol{\omega}$

$$\boldsymbol{\omega = \frac{mg}{V}}$$

- **Avec :**
  ω : Poids volumique en $(\frac{N}{m^3})$
  g : Accélération de la pesanteur en$(\frac{m^2}{s})$

2.2. La densité (d)

- Dans le cas des liquides en prendre l'eau comme fluide référence, Dans le cas des gaz on prendre l'aire comme fluide référence.
  $d = \frac{\textbf{masse volumique du fluide}}{\textbf{masse volumique d'unfluide référence}} = \frac{\boldsymbol{\rho}}{\boldsymbol{\rho_{réf}}}$

3. Compressibilité d'un fluide

- la Compressibilité et l'aptitude d'un fluide de voir son volume diminue sous l'effet d'une pression.

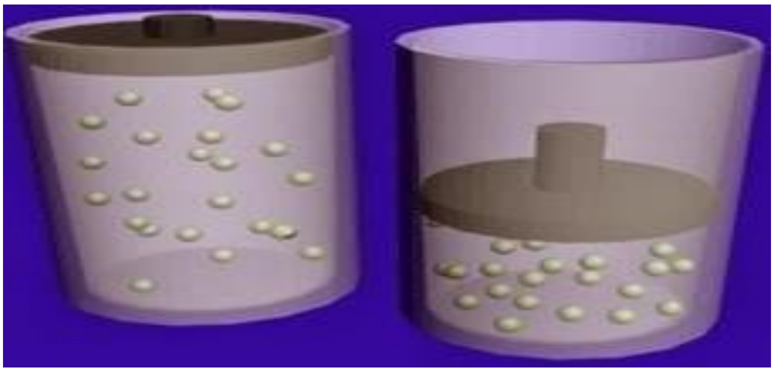


Figure : Compressibilité d'un gaz et d'un liquide

- **Le coefficient de compressibilité est** : $\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{dP} = -\frac{dV}{dp*V}$
- la Compressibilité notée x dépend des variable d'état, pour défini rigoureusement une compressibilité d'un fluide, on doit pression les conditions de la compression : on définit alors :
- **la Compressibilité isotherme :** notée X_T**,** elle est défini par l'équation suivante :

$$\mathbf{X_T = \frac{1}{\rho}(\frac{\partial \rho}{\partial P})_T}$$

- $X_T = \frac{1}{\rho}(\frac{\partial \rho}{\partial P})_T = \frac{RT}{PM} \cdot \frac{M}{RT} = \frac{1}{P}$

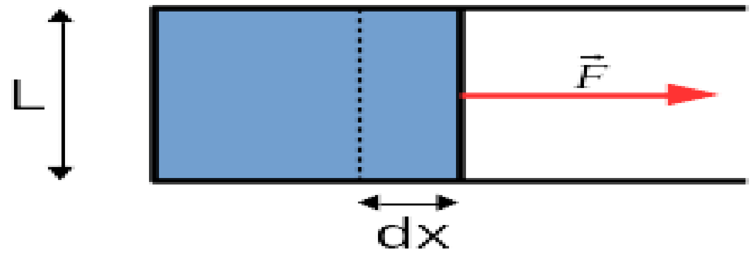
- car maintenant ρ et P dépende d'une seule variable seulement (T) alors :

$$\mathbf{X_T = \frac{1}{P}} \qquad (Pa^{-1})$$

4. Tension superficielle

- Notée par γ, elle n'est pas une propriété physique d'un fluide **mais une propriété des interfaces (surface qui séparé un fluide d'un autre).**
- Elle définit comme suit : $\boldsymbol{\gamma = \frac{F}{2l}}$
- Avec :

  F : force verticale, **l** : longueur
- La travée qu'il faut fournie pour arracher les molécules de l'intérieur de l'interface vers l'extérieur



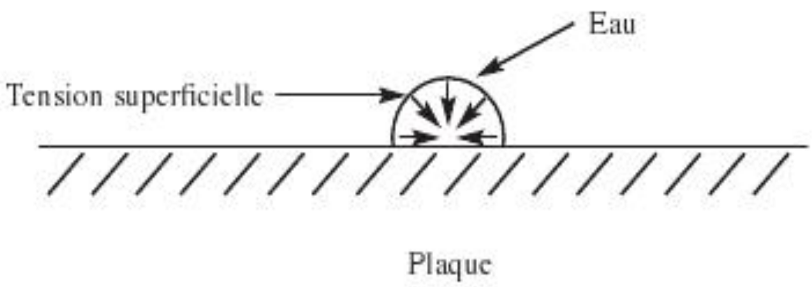


Figure : Tension superficielle d'un goute

- En générale, on observe cette Tension superficielle : **tube capillaire**

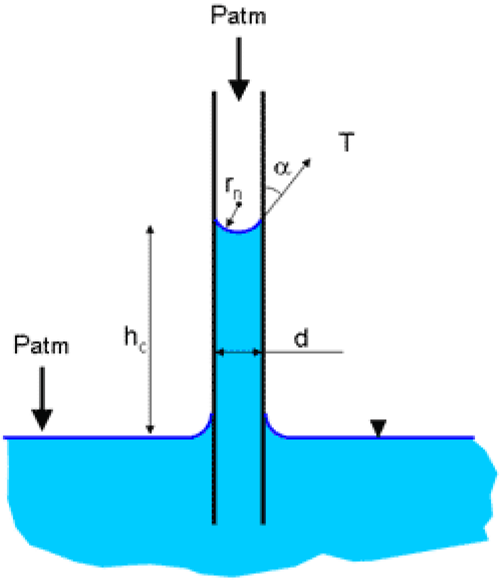


Figure : tube capillaire

- **angle de mouillage α :** c'est l'angle entre la paroi du capillaire et tangente du massique au niveau de la paroi.
  - ✓ α=0 ⇒ **mouillage parfait**
  - ✓ α=90° ⇒ **mouillage nulle**

- angle de mouillage dépend donc de l'interface fluide. Relation entre le rayon du capillaire et le rayon de massique :

$$\cos(\alpha) = \frac{r}{R}$$

- Pour l'équilibre, les forces de tension superficielle, Laplace propose l'équation suivante :

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r}$$

- Avec :
- ΔP : déférence de pression entre l'intérieur et l'extérieur
- R : rayon de tube
- γ : tension superficielle
- L'unité de : γ= Pa. m =N. m^{-1}

5. La viscosité

- 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.
- L'unité de base de la viscosité est le pascal-seconde (Pa· s). La viscosité d'un fluide vaut 1 (Pa· s) si une force de 1 N est requise pour déplacer un plan de 1 m^2 du fluide quand le changement de vitesse entre les couches adjacentes du fluide est de 1 m/s sur 1 m. On utilise également une unité mille fois plus petite, appelée le centpoise (CP). Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de cette unité, disons que la viscosité de l'eau à 20ºC est d'environ 1 CP.

5.1. La 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 deΔz. 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 soitΔv, à leur surface S et inversement proportionnelle à Δz: Le facteur de proportionnalité µ est le coefficient de viscosité dynamique du fluide

$$F = \mu\, s\, \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta \mathbf{z}}$$

- **Avec :**
- F : force de glissement entre les couches en (N)

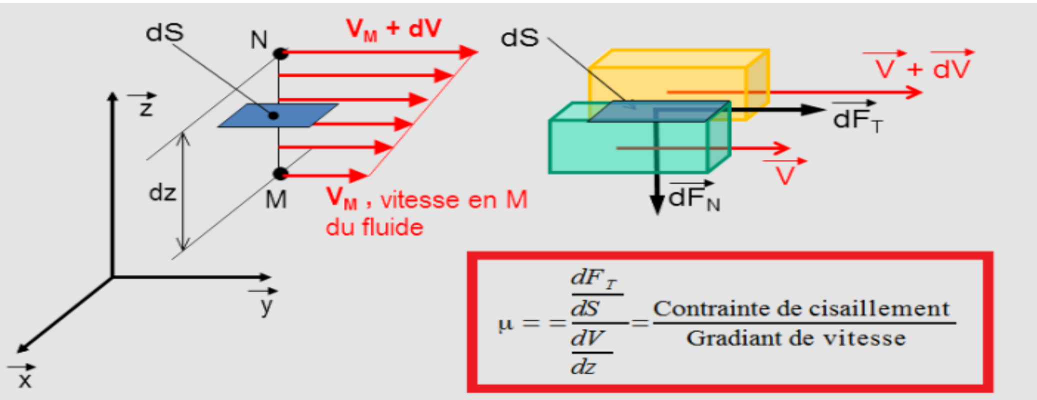


Figure : viscosité dynamique d'un fluide

- : de viscosité dynamique
- s : surface de contact entre deux couches en (m^2)
- Δv : Écart de vitesse entre deux couches en (m/s)
- Δz : Distance entre deux couches en (m).

- ✓ **Remarque1** : **le fluide est dit parfait si on néglige les forces de frottement** $\mu = 0$
- ✓ **Liquide** $\Rightarrow$ $\boldsymbol{T} \uparrow$ $\boldsymbol{\mu} \downarrow$
- ✓ **Gaz** $\Rightarrow$ $\boldsymbol{T} \uparrow$ $\boldsymbol{\mu} \uparrow$

5.2. Viscosité cinématique : $\boldsymbol{\nu = \frac{\mu}{\rho}}$

- L'unité de la viscosité cinématique est le (m^2 /s).

Remarque 2: (différence entre viscosité dynamique et viscosité cinématique) 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

Remarque 3: On utilise souvent le Stokes (St) comme unité de mesure de la viscosité cinématique. 1 St = 10-4 m^2 /s

6. Fluide incompressible ou compressible

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

6.2. 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.

7. Fluide parfait et fluide réel

7.1. Fluide parfait :
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

7.2. 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.

8. Condition aux limites :

Pour pouvoir déduire le champ de vitesse de l'équation différentielle d'Euler, il faut préciser comment se comporte $\vec{V}$ au voisinage des parois la condition d'imperméabilité de ces dernières donnes :

$$\vec{V}_{fluide}.\vec{n} = \vec{V}_{paroi}.\vec{n}$$

Ou $\vec{n}$ est vecteur normal à la paroi, celle-ci se déplaçant à la vitesse$\vec{V}_{paroi}$. Pour mémoire, mentionnons que dans le cas d'un fluide visqueux les conditions aux limites sont plus contraignantes :

$$\vec{V}_{fluide} = \vec{V}_{paroi}$$

9. Dimensions, unités et système international

9.1. Dimensions, unités et système international

- Les grandeurs physiques qui décrivent un phénomène physique sont caractérisées par leurs dimensions. Une grandeur peut avoir la dimension d'une longueur, d'une énergie, d'une masse, d'une vitesse, etc… La notion de dimension est très générale et ne suppose aucun choix particulier d'unité. Le système international noté SI ou MKSA pour Mètre Kilogramme Seconde Ampère, compte sept unités de base (voir le tableau 1) censées quantifier des grandeurs physiques indépendantes. Chaque unité à un symbole.
- La dimension est la grandeur physique associée à une grandeur physique indépendamment de l'unité utilisée pour la mesure de la grandeur. Ainsi :
  - ➢ la dimension, longueur sera notée (L) et son unité (m)
  - ➢ la dimension, masse sera notée (M) et son unité (kg) ;
  - ➢ la dimension, temps sera notée (T) et son unité (s).
- On dit que deux grandeurs physiques sont homogènes si elles ont la même dimension. Il ne faut pas confondre dimension et unité. En effet, une grandeur physique a une et une seule dimension, en revanche elle peut être exprimée dans plusieurs systèmes d'unités différentes.

Grandeur physique	Dimension	Unité SI
Longueur	**L**	**M**
Masse	**M**	**Kg**
Temps	**T**	**S**
Courant électrique	**I**	**A**

Température	$\boldsymbol{\theta}$	**K**
Quantité de matière	**N**	**Mol**
Intensité lumineuse	**J**	**La candela (cd)**

Tab1 : Les unités de base du système SI

9.2. Les dimensions de référence

Il est important de savoir combien de dimensions de référence sont nécessaires pour décrire les variables. Comme nous l'avons vu dans le §3.2. F, L et T semblent constituer un ensemble commode de dimensions de base pour la caractérisation de grandeurs mécaniques. Cependant, il n'y a vraiment rien de "fondamental" à propos de cet ensemble, et comme mentionné précédemment, M, L et T conviendraient également. En réalité, tout ensemble de quantités mesurables peut être utilisé comme dimensions de base à condition que la combinaison sélectionnée puisse être utilisée pour décrire toutes les quantités secondaires. Cependant, l'utilisation de FLT ou MLT comme dimensions de base est la plus simple, et ces dimensions peuvent être utilisées pour décrire des phénomènes de mécanique des fluides. Dans la table 2 ci-dessous, on présente les dimensions (en MLT et en FLT) et les unités SI de certaines grandeurs physiques courantes en mécanique des fluides :

Grandeur physique	**Dimension**		**Unité SI**
	MLT	**FLT**	
Vitesse	LT^{-1}	LT^{-1}	**m/s**
Accélération	LT^{-2}	LT^{-2}	**m/s²**
Force	MLT^{-2}	MLT^{-2}	**N où kg .m/s²**
Energie/Travail	$ML^{2}T^{-2}$	$ML^{2}T^{-2}$	**N.m où J où kg.m²/s²**
Puissance	$ML^{2}T^{-2}$	$ML^{2}T^{-2}$	**W, J/s, N. m/s, kgm^2 /s^3**
Pression (contrainte)	$ML^{-1}T^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$	**Pascal, P, N/m^2 , kg/m/s^2**
Masse volumique	ML^{-3}	ML^{-3}	**kg/m^3**
Poids spécifique	$ML^{-2}T^{-2}$	$ML^{-2}T^{-2}$	**N/m^3, kg/m^2 s ^{2}**
Tension de surface	MT^{-2}	MT^{-2}	**N/m, kg/s^2**
Viscosité dynamique	$ML^{-1}T^{-1}$	$ML^{-1}T^{-1}$	**N .s/m^2**
Débit volumique	$L^{3}T^{-1}$	$L^{3}T^{-1}$	**m^3 /s**

Table 3.2 Les dimensions (en MLT et en FLT) et les unités SI de certaines grandeurs physiques courantes en mécanique des fluides

9.3. Systèmes d'unités: En plus de la description qualitative des différentes grandeurs d'intérêt, il est généralement nécessaire de disposer d'une mesure quantitative d'une grandeur donnée. Par exemple, si nous mesurons la largeur d'une classe de cours et disons que sa largeur est de 6 unités, l'énoncé n'a aucun sens jusqu'à ce que l'unité de longueur soit bien définie. Si nous indiquons que l'unité de longueur est un mètre et définissons le mètre comme une longueur standard, un système d'unités de longueur est bien établi et une valeur numérique peut être donnée à la largeur de la classe. En plus de la longueur, une unité doit être établie pour chacune des grandeurs de base restantes (force, masse, température, …). Plusieurs systèmes d'unités sont utilisés, nous considérerons trois principaux systèmes couramment utilisés en ingénierie