

TF01 : Mécanique des Fluides

Responsable : Marc Bonis

Université de Technologie de Compiègne,
Laboratoire Roberval, Département Génie des Systèmes Mécaniques

Février 2009



Objectif de ce cours

Objectifs :

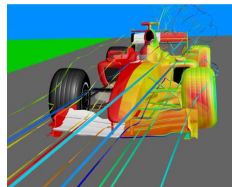
Acquérir les connaissances de base pour être capable d'analyser et /ou concevoir des systèmes mécaniques complexes mettant en jeu la mécanique des fluides.



(a) Emersonprocess



(b) Originalpropshop



(c) Fluent

Comment s'y prendre ?

Pour résoudre un problème complexe observé (*Modèle physique*) impliquant la mécanique des fluides, il est nécessaire :

Les propriétés :

... d'identifier les fluides et leurs propriétés intrinsèques : gaz, liquide, masse volumique, viscosité...

Les phénomènes :

... de connaître les différents phénomènes qui y sont liés : diffusion, transport, turbulence...

⇒ *modèle mathématique* adapté à la complexité de l'étude :
résolution outils mathématiques classiques ou numériques (CFD).

Première partie

Propriétés physiques des fluides

Définir la mécanique des fluides

Définition :

La mécanique des fluides est l'étude du mouvement des fluides, des efforts au sein du fluide et en interaction avec des parois et des échanges ou transformations d'énergie mécanique et thermique dans le domaine étudié avec son environnement.

Apprentissage de la mécanique des fluides face à la CFD :

L'usage de la CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tend à devenir quasi-indispensable dans la boucle de conception d'un produit *complexe*. Le bon usage de cet *outil* requiert que l'ingénieur possède une bonne connaissance des bases de la mécanique des fluides.

Objectifs pour l'ingénieur

Le but de cette connaissance pour un ingénieur

- être capable d'appréhender (reconnaitre, prévoir) les phénomènes mis en jeu dans le fluide ou par l'action de ce dernier,
- être en mesure d'effectuer des calculs sur les écoulements pour pouvoir dimensionner les installations, produits industriels ou travaux publics d'aménagement et de prévoir les phénomènes naturels,
- posséder les connaissances nécessaires au bon usage (éventuel) des outils numériques de CFD (Fluent, CFX, StarCD...).

Définition :

Les fluides comprennent :

- les liquides,
- les gaz.

Un fluide est ...

un milieu matériel déformable avec la particularité de pouvoir s'écouler et de pouvoir subir de grandes variations de formes sous l'action de forces très faibles (pression, gravité, frottement...)

Fluide en mouvement = transport d'énergie par sa masse, sa vitesse, sa pression et sa température.

⇒ transport, stockage et conversion de l'énergie :

- dans la nature : météo, fleuves...
- dans le monde industriel : pompes, turbines, moteurs...

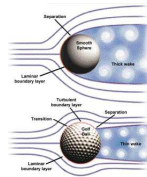
Caractère turbulent ⇒ retombées dans l'industrie.



(a) Ecluse (Falkirk)



(b) Ariane V



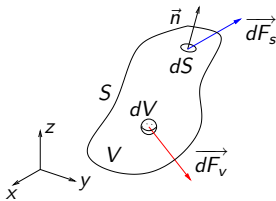
(c) Balle de golf



(d) Instabilité

Principes fondamentaux

On considère un volume V de fluide et de surface fermée S .



Les lois...

... qui régissent le mouvement et les forces agissant sur un fluide, se déduisent des principes fondamentaux de *conservation* de :

- la masse,
- la quantité ce mouvement (PFD) \Rightarrow **forces extérieures**,
- l'énergie (premier principe de la thermodynamique).

Forces de volume

Elles agissent à *distance* en tout point du domaine fluide et sont induites ou dérivent des champs : *de gravité, magnétiques, électrostatiques...*

$$\vec{F}_v = \iiint_V d\vec{F}_v = \iiint_V \rho \vec{f}_v dV.$$

Unités : $[\vec{F}_v(x, y, z, t)] = N$, $[\rho] = kg/m^3$, $[\vec{f}_v] = N/kg = m/s^2 !$

Ces forces sont dites *conservatives...*

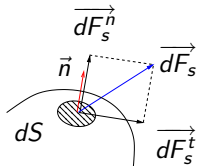
au sens où elles dérivent d'un potentiel ϕ (champs) tel que :

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}\phi.$$

Exemples de champs : potentiel électrique, de gravitation...

Forces de surface

Elles traduisent *l'action d'une partie du fluide sur une autre partie du fluide.*



Deux composantes :

- \vec{dF}_s^n : force normale élémentaire liée à la **pression**,
- \vec{dF}_s^t : force tangentielle élémentaire (ou de *cisaillement*) liée à la **viscosité**,

avec \vec{n}, \vec{t} les vecteurs normal et tangent à dS .

Force totale :

$$\vec{F}_s = \oiint \vec{dF}_s \quad \text{avec} \quad \vec{dF}_s = \vec{dF}_s^n + \vec{dF}_s^t.$$

Contrainte en un point

Le *mécanicien des fluides* privilégie à la notion de force...

... la notion de *contrainte* = *force exercée par unité de surface*.

- Contrainte normale σ : appelée *pression* et définie par :

$$d\vec{F}_s^n = -p\vec{n}dS = \sigma\vec{n}dS,$$

Signe '-' \leftrightarrow la pression p s'oppose à la normale.

- Contrainte tangentielle τ - Elle est définie par :

$$d\vec{F}_s^t = \tau\vec{t}dS.$$

Cette contrainte est directement liée à la viscosité du fluide.

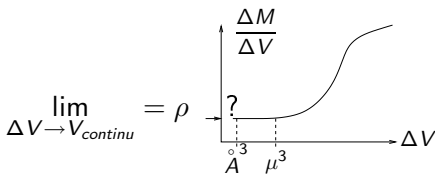
Ordre de grandeur : (niveau de la mer)

$$p_{atm} = 1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} \text{ et } 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \quad (1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}).$$

Définition et notion de continuité

Le rapport $\frac{\Delta M}{\Delta V}$ (kg/m^3),

avec ΔM la masse élémentaire du volume ΔV , est une mesure de la *masse volumique* du fluide : ρ est la limite pour $\Delta V \rightarrow V_{\text{continu}}$.



Hypothèse de continuité : milieu continu

A l'échelle des phénomènes observés, la nature discrète et moléculaire d'un fluide est ignorée : le fluide est assimilé à un *milieu continu*.

Intérêt : \Rightarrow écriture *mathématique* des principes fondamentaux !

Equation d'état

La masse volumique dépend de :

- la pression p ,
- la température T .

Important :

La loi $\rho(p, T)$ définit l'*équation d'état* du fluide.

Pour un gaz : $p = \rho \mathcal{R} T$ avec $\mathcal{R} = 286 \text{ J/kg/K}$ (gaz parfait)

Air : $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$ à $p = 10^5 \text{ Pa}$ et $T = 15^\circ \text{C}$.

Pour un liquide supposé incompressible : $\rho \approx \text{cste}$

Eau : $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Viscosité - Formule de Newton

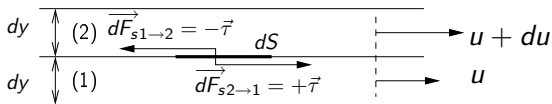
Définition :

La *viscosité* d'un fluide résulte des forces d'interaction entre les constituants d'un fluide en écoulement (molécules, particules...). Elle se traduit par des *forces de frottement* qui génèrent une résistance à l'écoulement et une *dissipation d'énergie*.

Dynamique et cinématique :

On définit deux viscosités :

- **dynamique** notée μ déterminée expérimentalement,
- **cinématique** notée ν et définie par $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.



Bilan des forces exercées sur dS :

- tranche (1) exerce sur (2) la force élémentaire $\vec{dF}_{s1 \rightarrow 2} = -\vec{\tau}$
- tranche (2) exerce sur (1) la force élémentaire $\vec{dF}_{s2 \rightarrow 1} = +\vec{\tau}$

Postulat de Newton :

la contrainte tangentielle τ est proportionnelle au taux de variation de la vitesse dans la direction perpendiculaire à l'écoulement :

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

Le coefficient μ est appelé *viscosité dynamique* (déterminée expérimentalement).

Unités et exemples de valeurs

τ est une *contrainte*, c'est-à-dire une *force par unité de surface* :

$$[\tau] = \frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m.s^2} \quad \text{avec} \quad N = kg.m/s^2 \quad \text{et} \quad [du/dy] = s^{-1}.$$

Soit : $[\mu] = kg/m/s = N/m^2.s = Pa.s = PI$ (Poiseuille)

Et : $[\nu] = m^2/s$ - ($1 cm^2/s = 1$ stokes (St) et $1 m^2/s = 10^4 St$)

Systèmes d'unités : SI ou MKS=[m|kg|s], CGS=[cm|gr|s]

Ordres de grandeur de μ à $20^\circ C$:

Air	0.018	$mPa.s$
Eau	1	$mPa.s$
Huile	10 – 40	$mPa.s$

$$(1 mPa.s = 10^{-3} Pa.s)$$

Variation de la viscosité avec la température

GAZ :

Forces de cohésion moléculaire négligeables *mais* dont l'intensité (via les chocs inter-molécules) augmente avec la température :

$$T \nearrow \Rightarrow \mu_{Gaz}(T) \nearrow$$

T (K)	100	200	300	400
$\mu_{air}(10^{-2} mPa.s)$	0.692	1.329	1.983	2.286

LIQUIDES :

Forces de cohésion moléculaire très fortes qui diminuent quand la température augmente :

$$T \nearrow \Rightarrow \mu_{Liq.}(T) \searrow$$

T (°C)	0	20	60	100
$\mu_{eau}(mPa.s)$	1.8	1	0.6	0.3

Fluides newtoniens et non newtoniens

Par définition :

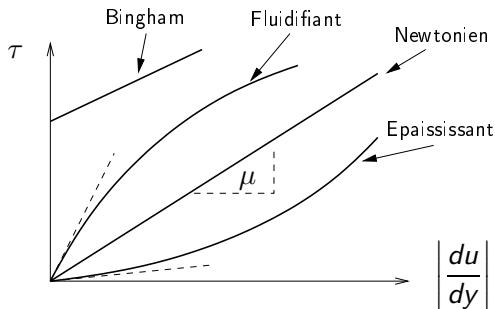
$$\mu = \frac{|\tau|}{|du/dy|}$$

Definition :

La loi de variation de μ avec $|du/dy|$ est appelée *loi de comportement*.

Si $\mu(p, T)$ ne dépend que de la pression et de la température, le fluide est dit *newtonien*.

Un fluide dont la viscosité dynamique dépend en plus de $|du/dy|$ et de ses dérivées est dit *non newtonien*. Leur étude fait l'objet de la *rhéologie*.



- Fluide de *Bingham* ou fluide à seuil de contrainte : dentifrice, ciment, sang...
- Comportement *fluidifiant* ou pseudo-plastique : polymères, sirops...
- Comportement *épaississant* ou dilatant : béton, suspension de grosses particules, sable mouillé...
- Fluide *newtonien* : eau, air.

Définition

Considérons un volume de fluide V à la pression p subissant une *variation de volume* dV sous l'action d'une *variation de pression* dp et à *température* T constante.

On définit le **coefficient de compressibilité** χ d'un liquide par :

$$\frac{dV}{V} = -\chi dp \quad \text{soit} \quad \chi = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T.$$

En considérant $V = 1/\rho$ (appelé *volume spécifique*) comme étant le volume occupé par 1 kg de fluide, on obtient :

$$\chi = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dp} \right)_T$$

Rmq. : le signe '-' (équ. du haut) traduit une diminution du volume résultant d'une augmentation de pression

Application pour les liquides

$$\underline{\text{Eau}} : \chi_{\text{eau}} = \frac{1}{2} 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$$

Exemple :

Calcul de la diminution de volume ΔV d'un volume V de 1 litre d'eau sous l'action d'une variation de pression $\Delta p = 20$ bars soit 2.10^6 Pa . En appliquant :

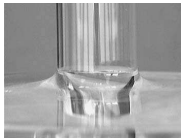
$$\frac{\Delta V}{V} = -\chi_{\text{eau}} \times \Delta P = -\frac{10^{-9}}{2} \times 2.10^6 = -\frac{1}{1000}$$

$$\text{Soit : } \Delta V = -1 \text{ cm}^3$$

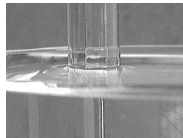
La vitesse de propagation c des ondes dans les fluides se calcule d'après : $c = \sqrt{K/\rho}$ où $K = 1/\chi$ est le module d'élasticité cubique du fluide.

Observations

Au contact d'une paroi, l'eau *monte*, tandis que le mercure *descend* en dessous de la *surface libre* moyenne.



(a) Eau courante



(b) Eau pure



(c) Tension



(d) Apesanteur

Cette propriété résulte de l'attraction mutuelle entre les molécules du liquide et les atomes de la paroi.

Tension superficielle σ = énergie nécessaire par unité de surface pour constituer la surface libre.