MECANIQUE DES FLUIDES

MF 1 : INTRODUCTION A LA MECANIQUE DES FLUIDES

1. Débits et lois de conservation.

1.1. *Description eulérienne d'un écoulement.*

- Echelle mésoscopique
- Particule de fluide
- Champ eulérien des vitesses $\vec{v}(\vec{r},t)$
- Lignes de courant, tube de courant
- Accélération d'une particule de fluide : dérivée particulaire du champ des vitesses $\vec{v}(\vec{r},t)$.
- Champ de masse volumique $\mu(\vec{r},t)$

1.2. *Débit de masse et vecteur densité de courant de masse*

- Vecteur densité de courant de masse $\vec{j}_m = \mu\vec{v}$
- Débit de masse à travers une surface orientée

1.3. *Bilan de masse ou conservation de la masse.*

- Notion de surface de contrôle
- Equation globale de conservation de la masse (cas stationnaire)
- Equation locale de conservation de la masse (cas 1D)
- Opérateur divergence et flux d'un champ de vecteurs
- Equation locale de conservation de la masse (cas 3D)

1.4. *Ecoulements stationnaires*

- Débit de masse conservatif : débit constant le long d'un tube de courant.
- Loi des nœuds des plombiers
- Lecture d'une carte de lignes de courant.

1.5. *Ecoulements incompressibles et homogènes*

- Condition locale : $\mathrm{div}\vec{v} = 0$
- Sens physique de $\mathrm{div}\vec{v}$
- Débit de volume.
- Débit de volume conservatif. Loi des nœuds.

CAPACITES EXIGIBLES :

- Définir la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.
- Distinguer vitesse microscopique et vitesse mésoscopique.
- Définir une ligne de courant, un tube de courant.
- Associer la dérivée particulaire du vecteur vitesse à l'accélération de la particule de fluide qui passe en un point.
- Citer et utiliser l'expression de l'accélération avec le terme convectif sous la forme $(\vec{v}.\overrightarrow{\mathrm{grad}})\vec{v}$.
- Citer des ordres de grandeur des masses volumiques de l'eau et de l'air dans les conditions usuelles.
- Définir le débit massique et l'écrire comme le flux du vecteur $\mu\vec{v}$ à travers une surface orientée.
- Écrire les équations bilans, globale ou locale, traduisant la conservation de la masse.

- Définir un écoulement stationnaire et les notions de ligne de courant et de tube de courant de masse.
- Exploiter la conservation du débit massique.
- A partir d'une carte de champ des vitesses en régime stationnaire, décrire qualitativement le champ des accélérations.
- Définir un écoulement incompressible et homogène par un champ de masse volumique constant et uniforme. Relier cette propriété à la conservation du volume pour un système fermé.
- Définir le débit volumique et l'écrire comme le flux de $\vec{v}$ à travers une surface orientée.
- Justifier la conservation du débit volumique le long d'un tube de courant indéformable.

2. Rappels de statique des fluides

2.1. *Pression dans un fluide*

- Contrainte normale de pression
- Equivalent volumique des forces de pression subies par une particule de fluide

2.2. *Equation locale de la statique des fluides*

2.3. *Pression et pesanteur terrestre*

- cas d'un liquide
- cas de l'atmosphère isotherme

3. Transport de quantité de mouvement par diffusion : viscosité.

3.1. *Contrainte de cisaillement dans un fluide newtonien : viscosité dynamique.*

- Contrainte visqueuse pour un fluide newtonien
- Ordres de grandeur de viscosité dynamique
- Condition d'adhérence sur une interface fluide – solide

3.2. *Nombre de Reynolds : compétition diffusion – convection de quantité de mouvement*

- Equation de diffusion de la quantité de mouvement (exemple de l'écoulement plan de Couette)
- Première approche du nombre de Reynolds : à partir des temps caractéristiques.
- Deuxième approche du nombre de Reynolds : à partir des flux surfaciques.

CAPACITES EXIGIBLES :

- Identifier la force de pression comme étant une action normale à la surface.
- Utiliser l'équivalent volumique des actions de pression $-\overrightarrow{\mathrm{grad}}\, P$.
- Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans les cas d'un fluide incompressible et de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait.
- Relier l'expression de la force surfacique de viscosité au profil de vitesse dans le cas d'un écoulement parallèle.
- Exprimer la dimension du coefficient de viscosité dynamique. Citer l'ordre de grandeur de la viscosité de l'eau.
- Citer la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide.

- Décrire qualitativement les deux modes de transfert de quantité de mouvement : convection et diffusion.
- Interpréter le nombre de Reynolds comme le rapport d'un temps caractéristique de diffusion de quantité de mouvement sur un temps caractéristique de convection.

MF 2 : ECOULEMENTS INTERNES ET EXTERNES

1. Ecoulement interne, incompressible et homogène dans une conduite cylindrique

1.1. *Ecoulements laminaires et turbulents*
- Expérience de Reynolds
- Nombres de Reynolds caractéristiques et régimes d'écoulement
- Profils des vitesses
- Ecoulements similaires et nombre de Reynolds

1.2. *Vitesse débitante*

1.3. *Chute de pression dans une conduite horizontale dans le cas d'un écoulement rampant*
- Loi de Hagen – Poiseuille
- Résistance hydraulique

1.4. *Chute de pression dans une conduite horizontale en régime quelconque*
- Coefficient de friction
- Diagramme de Moody

2. Ecoulement externe, incompressible et homogène autour d'un obstacle

2.1. *Comportement d'un écoulement autour d'un obstacle en fonction du nombre de Reynolds. Notion de couche limite.*
- Allure des lignes de courant autour d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds
- Couche limite
- Epaisseur de la couche limite en fonction du nombre de Reynolds

2.2. *Force de traînée subie par une sphère en mouvement rectiligne uniforme*
- Coefficient de traînée C_x
- Graphe $\log(C_x) = f(\log(\mathrm{Re}))$
- Traînée visqueuse linéaire (ou de Stokes) pour $\mathrm{Re} < 1$
- Traînée convective quadratique pour $\mathrm{Re} > 1000$
- Crise de traînée et recollement de la couche limite
- Quelques C_x de la vie quotidienne

2.3. *Forces de traînée et de portance subies par une aile d'avion*
- Un peu de vocabulaire technique
- Définitions des forces de traînée et de portance
- Coefficients C_x et C_z : définition et évolution en fonction de l'angle d'incidence.
- Quelques enseignements pratiques

CAPACITES EXIGIBLES :

- Décrire les différents régimes d'écoulement (laminaire et turbulent).

- Evaluer le nombre de Reynolds et l'utiliser pour caractériser le régime d'écoulement.
- Relier le débit volumique à la vitesse débitante.
- Dans le cas d'un écoulement à bas nombre de Reynolds, établir la loi de Hagen-Poiseuille et en déduire la résistance hydraulique.
- Exploiter le graphe de la chute de pression en fonction du nombre de Reynolds, pour un régime d'écoulement quelconque.
- Exploiter un paramétrage adimensionné permettant de transposer des résultats expérimentaux ou numériques sur des systèmes similaires réalisés à des échelles différentes.
- Associer une gamme de nombre de Reynolds à un modèle de traînée linéaire ou un modèle quadratique.
- Pour les écoulements à grand nombre de Reynolds décrire qualitativement la notion de couche limite.
- Définir et orienter les forces de portance et de traînée.
- Exploiter les graphes de C_x et C_z en fonction de l'angle d'incidence.

MF 3 : BILANS MACROSCOPIQUES D'ENERGIE

1. Système ouvert, système fermé.

2. Bilans thermodynamiques

2.1. *Expression du 1er principe pour un écoulement stationnaire*

2.2. *Expression du 2nd principe pour un écoulement stationnaire*

2.3. *Diagramme* $(\log p, h)$ *d'un fluide*

- Lecture du diagramme
- Exploitation pour une machine thermique en régime stationnaire

2.4. *Exemple : étude d'une installation de production d'électricité.*

3. Modèle de l'écoulement parfait. Relation de Bernoulli

3.1. *Modèle de l'écoulement parfait*

3.2. *Relation de Bernoulli pour un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène*

- 1ère démonstration : via un bilan d'enthalpie.
- 2e démonstration : via un bilan d'énergie mécanique.

3.3. *Applications de la relation de Bernoulli*

- Un résultat utile : champ de pression sur une section d'un écoulement unidirectionnel.
- Effet Venturi ; exemples.
- Condition de validité de l'incompressibilité d'un écoulement.

4. Bilans macroscopiques d'énergie mécanique

4.1. *Condition de validité et prise en compte d'un élément actif*

4.2. *Exemple : fonctionnement des pompes du jet d'eau de Genève.*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Énoncer et exploiter les principes de la thermodynamique pour une transformation élémentaire.
- Utiliser avec rigueur les notations d et δ en leur attachant une signification.
- À partir d'une surface de contrôle ouverte vis-à-vis des échanges, définir un système fermé approprié pour réaliser un bilan de grandeur extensive.
- Exprimer les principes de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire en vue de l'étude d'une machine thermique sous la forme :
  $\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_u + q$; $\Delta s = s_e + s_c$.
- Utiliser le modèle de l'écoulement parfait pour un écoulement à haut Reynolds en dehors de la couche limite.
- Énoncer et appliquer la relation de Bernoulli à un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène.
- Décrire l'effet Venturi.
- Effectuer un bilan d'énergie sur une installation industrielle : pompe ou turbine.
- Utiliser le fait admis que la puissance des actions intérieures est nulle pour un écoulement parfait et incompressible.

MF 4 : BILANS DE QUANTITE DE MOUVEMENT ET DE MOMENT CINETIQUE

1. Bilan de quantité de mouvement

1.1. *Loi de la quantité de mouvement pour un système fermé*

1.2. *Exemple 1 : tir vertical d'Ariane 5.*

1.3. *Exemple 2 : rendement d'une éolienne.*

2. Bilan de moment cinétique

2.1. *Loi du moment cinétique pour un système fermé en rotation autour d'un axe fixe*

2.2. *Fonctionnement d'une turbine Pelton*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Faire l'inventaire des forces extérieures.
- Effectuer un bilan de quantité de mouvement.
- Effectuer un bilan de moment cinétique.