



# Faculté des sciences appliquées

**FSA****MECA2323 Aérodynamique des écoulements externes**

[30h+30h exercices] 5 crédits

Cette activité se déroule pendant le 2ème semestre

**Enseignant(s):** François Dupret, Grégoire Winckelmans  
**Langue d'enseignement :** français  
**Niveau :** cours de 2ème cycle

**Objectifs (en terme de compétences)**

Approfondir les connaissances de l'étudiant en mécanique des fluides orientée vers les écoulements externes : aérodynamique (hydrodynamique) en écoulements externes. La démarche suivie privilégie la compréhension physique des problèmes et phénomènes rencontrés ainsi que leur modélisation dans un formalisme mathématique adéquat. Il s'agit ici de développer le "savoir".

Développer l'aptitude de l'étudiant à utiliser les concepts et outils propres à l'aérodynamique (hydrodynamique) des écoulements externes pour comprendre des situations réelles complexes, pour les modéliser de façon simplifiée, mais suffisante, en utilisant un formalisme mathématique adéquat, et pour obtenir une solution physiquement acceptable.

Développer l'aptitude de l'étudiant à effectuer des travaux en dehors des séances dirigées (exercices et laboratoires) et à produire des rapports écrits concis et de qualité. Il s'agit ici de développer le "savoir faire".

**Objet de l'activité (principaux thèmes à aborder)**

Rappel des équations de conservation pour écoulements incompressibles et compressibles, analyse dimensionnelle (théorème de Vaschy-Buckingham) et applications. Formulation en tourbillon-vitesse des équations et résultats généraux : entropie, tube tourbillon (théorèmes de Kelvin et de Helmholtz), vitesse induite par le tourbillon (Biot-Savart) en 3-D et en 2-D, production (parois, terme baroclinique) et diffusion du tourbillon, reformulation de l'équation de Bernoulli. Ecoulement incompressible irrotationnel par région : feuilles tourbillons de paroi et de sillage, démarrage brusque d'un écoulement, aile d'envergure finie en régime permanent (modèle de Prandtl, aile optimale). Ecoulements compressibles : écoulements 2-D supersoniques permanents : petites perturbations et ondes acoustiques, méthode des caractéristiques, ondes de détente et ondes de choc, applications; écoulements 1-D non permanents : méthode des caractéristiques. Couche limite laminaire pour le cas avec vitesse variable (Falkner-Skan, Polhausen, Thwaites). Stabilité des écoulements (Orr-Sommerfeld), transition vers la turbulence. Couche limite turbulente : loi du "mur" et "loi logarithmique" (Prandtl, von Karman, Millikan), "loi du sillage" pour le cas avec vitesse variable et concept de couche limite turbulente "à l'équilibre" (Clauser, Coles). Modélisation de la turbulence : approche statistique (Reynolds) et équations moyennées, modèle de fermeture (algébriques, à une ou deux équations de conservation), exemples d'application.

## Résumé : Contenu et Méthodes

### 1. Théorie générale (5 hrs)

- Rappels généraux pour la formulation classique des équations de Navier-Stokes.
- Analyse dimensionnelle : démonstration du théorème de Vaschy-Buckingham; applications.
- Thermodynamique des écoulements compressibles.

### 2. Dynamique du tourbillon (8 hrs)

- Equations de conservation en formulation "tourbillon-vitesse" pour les écoulements incompressible et compressible.
- Résultats sur les équations de conservation et sur les bilans avec volume de contrôle.
- Tube tourbillon 3-D : théorèmes de Kelvin et de Helmholtz, applications.
- Vitesse induite par le tourbillon : loi de Biot-Savart; application au tube tourbillon 3-D et au tourbillon gaussien 2-D.
- Production du tourbillon : parois, terme baroclinique; diffusion du tourbillon; reformulation de l'équation de Bernoulli (incompressible et compressible).
- Ecoulements 2-D irrotationnels : feuille tourbillon de démarrage; Kutta-Joukowski; théorème de Blasius pour la portance et le moment.
- Modèle de Prandtl pour l'aile d'envergure finie : traînée induite et portance, applications (aile optimale elliptique et aile rectangulaire) et efficacité d'Oswald.

### 3. Ecoulements compressibles de fluide parfait (5 hrs)

- Ecoulements 2-D supersoniques permanents : concept de caractéristiques; petites perturbations et ondes acoustiques; méthode des caractéristiques; onde de détente isentropique (détente de Prandtl-Meyer); onde de compression non isentropique (onde de choc: choc droit et choc oblique); applications (par ex., au profil en "diamant"); calcul de la traînée d'onde.
- Ecoulement 1-D non-permanent (subsonique ou supersonique) : méthode des caractéristiques et invariants de Riemann pour le cas isentropique; application à la propagation d'un système : onde de choc et onde de détente.

### 4. Couche limite laminaire (4 hrs)

- Similitude pour le cas  $U_e \propto x^m$  : problème de Falkner-Skan.
- Méthode de Polhausen (basée sur l'équation intégrale de von Karman) pour le cas où  $U_e$  est général, et amélioration de Thwaites.

### 5. Stabilité hydrodynamique et transition (1 hr)

- Linéarisation en petites perturbations des équations de Navier-Stokes et stabilité des écoulements visqueux; simplification pour écoulements parallèles (équation de Orr-Sommerfeld): application à la couche limite et comparaison avec des résultats expérimentaux.
- "Route" vers le chaos et la turbulence : approche descriptive pour le cas de la transition de la couche limite.

### 6. Couche limite turbulente (5 hrs)

- Rappels, approche classique et résultats globaux obtenus à partir de l'équation intégrale de von Karman dans le cas  $U_e$  constant.
- Approche de von Karman et de Prandtl pour la viscosité de turbulence : "loi logarithmique" au sein de la "loi du mur"; argument unificateur de Millikan.
- Couche limite avec  $U_e$  général: données expérimentales et unification de Coles : "loi du mur" et "loi du sillage", profils de vitesse, méthode de calcul pour le développement de la couche limite.
- Similitude et concept de couche limite turbulente à l'équilibre avec  $U_e$  non constant : approche de Clauser et évidence expérimentale; unification de Coles et paramètres de similitude.

### 7. Modélisation de la turbulence (2 hrs)

- Approche statistique de Reynolds et équations moyennées.
- Modèles de fermeture basés sur l'analyse dimensionnelle : algébriques, à une équation de transport, à deux équations de transport (e.g., k-e, k-w) calibration et conditions aux limites requises; applications et comparaisons avec des résultats expérimentaux.

**Autres informations (Pré-requis, Evaluation, Support, ...)**

Prérequis :

Cours de mécanique des fluides et transferts I et II.

Travaux pratiques :

Les travaux pratiques seront en premier lieu constitués de séances d'exercices (environ 12 h. permettant de développer les applications abordées au cours théorique. En outre, il est prévu de demander aux étudiants d'effectuer des travaux (environ 8 h.) en dehors de ces séances d'exercices, ces travaux faisant l'objet de documents à remettre au(x) titulaire(s) du cours. Enfin, les étudiants doivent participer aux laboratoires (environ 8 h.) et faire pour chaque séance un rapport de leur travail, à remettre au(x) titulaire(s) du cours.

Références bibliographiques :

G. K. Batchelor, "An introduction to fluid dynamics", Cambridge University Press 1967 (reprinted paperback 1994).

F. M. White, "Viscous fluid flow" second edition, Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, Inc., 1991.

P. A. Thompson, "Compressible-fluid dynamics", advanced engineering series, Maple Press, 1984.

H. Lamb, "Hydrodynamics", sixth edition, Cambridge University Press 1932, Dover Publications (paperback).

L. Rosenhead, "Laminar boundary layers", Oxford University Press 1963, Dover Publications (paperback).

P. G. Drazin and W. H. Reid, "Hydrodynamic stability", Cambridge University Press 1985.

M. Van Dyke, "An album of fluid motion", The Parabolic Press, 1982.

H. Schlichting, "Boundary-layer theory", Mc Graw-Hill, NY, 1968.

Matière :

Mécanique des fluides et transferts (50.11).

**Autres crédits de l'activité dans les programmes**

<b>ELME22/E</b>	Deuxième année du programme conduisant au grade d'ingénieur civil électro-mécanicien (énergie)	(5 crédits)
<b>MECA22</b>	Deuxième année du programme conduisant au grade d'ingénieur civil mécanicien	(5 crédits)
<b>MECA23</b>	Troisième année du programme conduisant au grade d'ingénieur civil mécanicien	(5 crédits)