UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté des sciences
Département de physique

PLAN DE COURS
Trimestre d'hiver

MÉCANIQUE DES FLUIDES

PHQ 578

COURS	
Titre :	Mécanique des fluides
Sigle :	PHQ 578
Crédits :	3 (3 1 5)
WWW :	Consultez Moodle
Travaux dirigés :	1 heure/semaine
Travail personnel :	5 heures/semaine
Session :	6

PROFESSEUR
Nom : Yves Grosdidier (chargé de cours à forfait)
Bureau : D2-1070
Téléphone : (819) 821-8000 poste 62056
Jours de disponibilité : habituellement de 9h30 à 15h30, Courriel : en tout temps
Courriel : Yves.Grosdidier@USherbrooke.ca

PLACE DU COURS DANS LE PROGRAMME
Type de cours : optionnel
Préalable : MAT 298 (Calcul vectoriel)

DESCRIPTION DU COURS

MISE EN CONTEXTE DU COURS

L'hydrodynamique est l'étude des comportements des fluides aux grandes longueurs d'onde (en un sens que nous préciserons et qui est relié au *nombre de Knudsen*). Cette branche de la physique est importante pour plusieurs raisons. Premièrement, les applications en ingénierie, nombreuses, dépendent de façon critique des principes que l'on y retrouve. Deuxièmement, la dynamique des fluides a de nombreuses applications dans d'autres branches de la physique, et même d'autres domaines de la science, incluant l'astrophysique, la météorologie, l'océanographie et la physiologie : ondes solitaires dans des canaux, tourbillons dans l'hélium liquide, oscillations sismiques du soleil, la tache rouge de Jupiter, circulation du sang. Voilà autant de sujets qui ont

occupé les chercheurs (physiciens et mathématiciens) durant les dernières décennies. Troisièmement, alors que les sujets généralement traités en physique font appel à des processus linéaires, la dynamique des fluides nous amène très naturellement dans le domaine non-linéaire, ce qui rend nécessaire l'introduction de nouveaux concepts et méthodes.

Les principes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement sont au cœur de la dynamique des fluides. Il s'agit d'appliquer ces principes énoncés pour des systèmes composés de particules discrètes à des fluides qui sont virtuellement continus (on passera d'un régime dit *cinétique* à un régime *hydrodynamique*). Dans ce régime, les lois de conservation déterminent la forme des équations à l'échelle macroscopique. On y rencontre des notions telles que la pression, la viscosité, la densité, la vitesse, etc. Par extension, toute la physique des milieux continus, incluant les corps élastiques (déformation des matériaux, tectonique des plaques, etc.), peut être considérée comme la limite hydrodynamique d'équations de conservation microscopiques.

Ce cours constitue également une activité d'intégration et c'est pourquoi il nécessite plusieurs prérequis en liaison directe avec la mécanique, les phénomènes ondulatoires, la thermodynamique statistique. Bien souvent, pour trouver des solutions réalistes, il est nécessaire d'utiliser l'ordinateur et les méthodes de simulation, mais dans ce cours nous nous efforcerons d'exhiber des solutions analytiques aussi souvent que possible.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Le cours PHQ 578 a pour but de :

- analyser des problèmes d'hydrodynamique en choisissant différentes méthodes de solution: analyse dimensionnelle, analyse en ordres de grandeurs, solutions d'équations aux dérivées partielles, méthodes numériques, etc. ;

- connaître différents aspects de la physique des phénomènes non linéaires et chaotiques ;

- rendre les étudiants aptes à analyser des problèmes faisant appel à plusieurs notions d'ondes, de mécanique et de physique statistique.

CONTENU DU COURS

À la fin du cours PHQ 578, et pour atteindre les objectifs généraux, l'étudiant devra être capable de:

- expliquer des concepts de base de l'hydrodynamique tels que la viscosité, la pression, les termes de convection, l'équation de Navier-Stokes, ainsi que la signification de certains nombres sans dimension tels le nombre de Knudsen, Reynolds, de Mach, etc.

- déduire le rôle des lois de l'hydrodynamique dans des situations concrètes reliées, par exemple, à l'écoulement des fluides autour d'objets divers.

- discuter de l'origine microscopique des lois de l'hydrodynamique et du rôle fondamental des lois de conservation dans ce domaine (approche cinétique).

- si le temps le permet, manipuler l'analyse complexe pour la solution de problèmes

d'écoulement bidimensionnels simples.

- expliquer des notions élémentaires sur les solitons, la turbulence et le chaos.

- analyser et résoudre des problèmes d'hydrodynamique en choisissant parmi plusieurs méthodes de solution, incluant l'analyse dimensionnelle, l'analyse complexe, le calcul différentiel et intégral, les méthodes numériques.

- discuter des solutions numériques ou analytiques d'un problème d'hydrodynamique.

Les concepts étudiés dans ce cours sont les suivants :

1. **Les équations de l'hydrodynamique** : équations de conservation scalaires - du nombre de particules, de la masse ; conservation de la quantité de mouvement pour le fluide global; tenseur des contraintes ; formule de Cauchy ; tenseur flux d'impulsion ; pression du gaz parfait ; approches eulérienne et lagrangienne ; dérivée en suivant le mouvement ; hydrostatique du fluide parfait ; équation de Bernoulli ; effet Magnus ; fonction de courant et potentiel des vitesses ; écoulement potentiel ; viscosité ; cas incompressible et équation de Navier-Stokes ; vitesse du son ; équation de conservation de l'énergie interne et cinétique pour le fluide global ; (* prise en compte des énergies gravitationnelle et électromagnétique) ;

2. **Discontinuités, ondes de choc, instabilités** : raidissement non-linéaire des profils d'ondes; l'onde simple non-linéaire ; déferlement de l'onde simple ; chocs et solitons ; relations de Rankine-Hugoniot ; chocs simples, détonations et autres types de discontinuités (relations de saut, discontinuités de contact) ; traversée du choc et second principe de la thermodynamique ; invariants de Riemann ; tube de choc; instabilités de Rayleigh-Taylor, de Kelvin-Helmholtz, de Rayleigh-Bénard ;

3. **La turbulence** : turbulence et nécessité d'une description statistique ; homogénéité, stationnarité ou isotropie statistique ; transport turbulent ; spectres de puissance ; spectre des vitesses ; le cas des milieux incompressibles ; des relations exactes en turbulence incompressible : évolution de l'énergie moyenne par unité de masse, évolution de l'enstrophie ; dynamique de Fourier de l'équation de Navier-Stokes ; dynamique de couplage de modes ; la cascade de Kolmogoroff ; échelle de dissipation ;

4. **Fonctions de distribution :** la grande fonction de distribution ; fonctions de distributions réduites à un corps, à deux corps; moyennes de grandeurs mono- et bi-particulaires ; flux de grandeurs mono-particulaires scalaires et vectorielles; tenseurs ; algèbre et analyse tensorielles ; tenseur des contraintes ;

5. **Équations cinétiques :** notion d'équation cinétique ; *hiérarchie BBGKY* ; équation de Liouville ; théorème de Jeans et solutions stationnaires de l'équation de Liouville ; fermeture de la hiérarchie BBGKY ; équation de Vlassov ; l'intégrale de collision ; théorème flux-divergence dans l'espace à 6 dimensions ; démonstration du théorème de Liouville en variables canoniques ;

6. **Le régime hydrodynamique et les phénomènes de transport** : libres parcours petits et équilibre thermodynamique local ; le projet hydrodynamique et le nombre de Knudsen ;

distorsions par rapport aux fonctions de distribution d'équilibre induites par les gradients ; approximation de diffusion ; grandeurs macroscopiques et fonctions de distributions en régime hydrodynamique ; grandeurs macroscopiques pour le fluide global ; forme conservative des équations de l'hydrodynamique ; relation flux/gradient ; la viscosité.

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE

Le cours consistera en exposés magistraux dans lesquels nous ferons une grande place aux questions des étudiants, à la résolution de problèmes et parfois aux illustrations de la théorie par des démonstrations physiques (essentiellement des simulations à l'aide du logiciel ZEUS-3D) ou encore des vidéos. En moyenne, une heure par semaine sera consacrée à la résolution de problèmes.

ÉVALUATION

Moyens d'évaluation	• 4 ou 5 devoirs (la date de remise de chacun de ces devoirs sera décidée tout au long de la session, en accord avec les étudiant(e)s). • Un examen de mi-session à la date fixée par la Faculté des sciences • 1 examen final à la date fixée par la Faculté des sciences • À la fin de la session, **une bonification à la hausse de la cote finale** est possible, en fonction de votre participation, des questions posées en cours ou hors du cours, et de manière générale si vous démontrez approfondir la matière durant la session, notamment en étudiant en détail les notes de cours et les exercices faits en classe.
Types de question	• Problèmes à résoudre • Questions de compréhension
Pondération	• Devoirs : 15% • Intra : 35% • Final : 50%

BIBLIOGRAPHIE

Des notes de cours sont disponibles au service de photocopie PHOTADME de la Faculté de droit. Ces notes sont essentielles pour suivre le cours. Aucun autre livre n'est obligatoire pour suivre le cours. Plusieurs ouvrages de consultation seront conseillés durant la session en fonction des besoins des étudiants.