

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 et variées, 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 et les 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 newtoniens 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 677 a pour but de :

- analyser des problèmes d'hydrodynamique en choisissant différentes méthodes de solution: analyse dimensionnelle, 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 677, et pour atteindre les objectifs généraux, l'étudiant devra être capable de:

- expliquer des concepts de base de l'hydrodynamique tels 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 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).
- identifier différents domaines de recherche reliés à l'hydrodynamique tels la turbulence et le chaos.
- identifier différents champs d'application de l'hydrodynamique en physique et en ingénierie, puis décrire certaines activités spécifiques à différents domaines.
- appliquer ses connaissances de la physique à la solution de problèmes rencontrés dans ces champs ou domaines.
- analyser des comportements physiques particuliers à ces champs ou domaines en termes de notions fondamentales de l'hydrodynamique.
- si le temps le permet, manipuler l'analyse complexe pour la solution de problèmes d'écoulement bi-dimensionnels 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.

Le plan de la matière précis est le suivant :

Entre parenthèses on trouve les notions qui seront peut-être omises.

1. **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 ;

2. **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 ; équations cinétiques heuristiques ; (l'exemple de l'équation de transfert du rayonnement et fonction de distribution des photons ;) démonstration du théorème de Liouville en variables canoniques ;
3. **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 ; grandeurs macroscopiques et fonctions de distributions en régime hydrodynamique ; grandeurs macroscopiques pour le fluide global ; forme conservative des équations de l'hydrodynamique ; (transport photonique de la chaleur ;) relation flux/gradient ; la viscosité ;
4. **Les équations de l'hydrodynamique** : équations de conservation scalaires - du nombre de particules, de la masse, de la charge ; vitesse et flux de diffusion ; conservation de la quantité de mouvement pour une espèce particulaire et ensuite pour le fluide global ; pression inter-particulaire ; tenseur flux d'impulsion ; pression du gaz parfait ; retour sur le tenseur des contraintes ; approches eulérienne et lagrangienne ; dérivée en suivant le mouvement ; cas incompressible et équation de Navier-Stokes ; vitesse du son ; équation de conservation de l'énergie interne et cinétique pour une espèce particulaire et ensuite pour le fluide global ; prise en compte des énergies gravitationnelle et électromagnétique ;
5. **Description hydrodynamique du vent solaire** : connexion couronne/vent solaire ; couronne statique isotherme ; couronne statique conductive ; le vent isotherme à symétrie sphérique ; perte de masse par vent solaire, théorie de Parker simplifiée ;
6. **La turbulence** : turbulence et nécessité d'une description statistique ; homogénéité, stationnarité ou isotropie statistique ; transport turbulent ; tenseur de corrélation des vitesses ; symétrie de parité et hélicité cinétique d'un écoulement ; spectres de puissance ; spectre des vitesses ; le cas des milieux incompressibles ; des relations exactes en turbulence incompressible : évolution de l'énergie moyenne par gramme, 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 ;
7. **Discontinuités et ondes de choc** : raidissement des profils d'ondes non-linéaires ; l'onde simple non-linéaire ; déferlement de l'onde simple ; chocs et solitons ; chocs développés ; 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 ; l'exemple des ondes de choc des restes de supernovae : phases d'expansion libre, de Sedov – adiabatique -, puis radiative ; phase chasse neige ;

Et, peut-être si le temps le permet :

8. **Introduction à la magnétohydrodynamique (MHD)** : l'hydrodynamique des fluides conducteurs de l'électricité ; la loi d'Ohm en MHD ; la MHD non-relativiste ; pression et

tension magnétiques ; contraintes de Maxwell et flux de Poynting ; évolution du champ magnétique en MHD ; la MHD parfaite ; nombre de Reynolds magnétique ; théorème du gel ; le problème dynamo et les champs magnétiques de la Terre et du Soleil ; magnétohydrostatique et champ *force-free* ; équation de Grad-Shafranoff ; petits mouvements et ondes MHD : linéarisation des équations de la MHD parfaite ; modes normaux et stabilité ; modes MHD d'un milieu uniforme ; relations de dispersion ; les modes d'Alfvén torsionnels, lents et rapides ;

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. Une heure par semaine sera consacrée à la correction des devoirs et/ou à la résolution de problèmes (cette heure sera donnée par le professeur).

ÉVALUATION

Moyens d'évaluation	<ul style="list-style-type: none"> • 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) • 1 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
Types de question	<ul style="list-style-type: none"> • Problèmes à résoudre • Questions de compréhension
Pondération	<ul style="list-style-type: none"> • Devoirs : 30% • Intra : 30% • Final : 40%

BIBLIOGRAPHIE

Des notes de cours seront disponibles au service de photocopie de la Faculté des sciences. Ces notes sont essentielles pour suivre le cours.

Aucun livre n'est obligatoire pour suivre le cours. Plusieurs ouvrages de consultation seront conseillés durant la session en fonction des besoins des étudiants.