

**FACULTÉ DES ARTS ET DES SCIENCES  
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE  
HIVER 2023**

**PLAN DE COURS**

---

**Sigle du cours:** PHY 3140

**Titre du cours:** Hydrodynamique

**Nombre de crédits:** 3

**Professeur:** Paul Charbonneau

**Contact:** B-3013 Campus MIL; paulchar@astro.umontreal.ca

---

### **Description et buts du cours**

Ce cours est offert aux étudiant(e)s de troisième année inscrit(e)s au premier cycle en physique (incluant les programmes bidisciplinaires mathématique+physique et physique+informatique). Le cours PHY-2345, *Outils théoriques de la Physique*, est pré-requis, mais les étudiant(e)s de deuxième ou troisième année ayant un baggage mathématique équivalent (e.g., bidisciplinaire Math-Physique) sont autorisé(e)s à s'inscrire.

Le cours vise à introduire les bases expérimentales, physiques, et mathématiques de l'hydrodynamique, et est divisé en trois sections. La première, couvrant un peu plus de la moitié du cours, développe les concepts de base de l'hydrodynamique classique. La seconde regroupe quelques applications d'intérêt en géophysique et sciences atmosphériques/océaniques. La troisième est une brève introduction à la turbulence, un des phénomènes hydrodynamiques aussi mal compris qu'important dans une variété d'applications contemporaines.

### **Horaire des cours, Hiver 2023**

- Lundi 9:30-11:20, B-2416, Campus MIL
- Mercredi 9:30-10:20, B-2416, Campus MIL

### **Manuel de cours et ouvrages de référence**

Il ne semble pas exister de manuel de cours détaillant adéquatement la matière couverte dans ce cours. Des notes en format pdf couvrant l'ensemble de la matière seront disponibles via la page Web du cours (voir ci-dessous). Il est cependant **obligatoire** de se procurer l'ouvrage suivant, en complément aux notes de cours:

M. Van Dyke, *An Album of Fluid Motion*, Parabolic Press (1982).

Une version pdf est disponible gratuitement sur le Web. L'un ou l'autre des manuels suivants pourrait également servir de complément utile aux notes de cours, et/ou comme ouvrage de référence:

M. Rieutord, *Une introduction à la dynamique des fluides* (2ème éd.), de boeck (2014) [recommandé]

D. J. Tritton, *Physical Fluid Dynamics* (2ème éd.), Oxford University Press (1988) [recommandé]

## Évaluation

- Examen partiel, couvrant matière à date, 40% de la note finale;
- Deux rapports de projets “hydrodynamique dans la cuisine” (sur un choix de quatre), 10% de la note finale chacun;
- Examen final, “take-home” de 48 heures, couvrant l’ensemble de la matière, 40% de la note finale.

## Page Web

La page Web suivante inclut un horaire détaillé de chaque cours, et donne accès à des copies du matériel didactique supplémentaire présenté en classe (images, animations, etc);

<http://www.astro.umontreal.ca/~paulchar/phy3140/phy3140.html>

---

## MATIÈRE COUVERTE

### PREMIÈRE PARTIE: NOTIONS FONDAMENTALES

#### 1. Qu’est-ce qu’un fluide?

- 1.1 Le concept du milieu continu
- 1.2 Le trio solide-liquide-gaz
- 1.3 Une question de stress
- 1.4 Représentation des écoulements
- 1.5 Le fluide parfait

#### 2. Formulation mathématique de l’hydrodynamique

- 2.1 Survol historique
- 2.2 Le théorème de Pascal
- 2.3 L’équilibre hydrostatique
- 2.4 Le paradoxe hydrostatique
- 2.5 La conservation de la masse
- 2.6 L’opérateur  $D/Dt$
- 2.7 L’équation d’Euler
- 2.8 La conservation de l’énergie
- 2.9 La vorticité et sa conservation

#### 3. Écoulements incompressibles et irrotationnels

- 3.1 Le principe de Bernoulli
- 3.2 Les écoulements potentiels
- 3.3 Écoulement autour d’un cylindre
- 3.4 Le paradoxe de D’Alembert
- 3.5 Les forces de trainée et de portance.

#### 4. Écoulements compressibles

- 4.1 Le nombre de Mach

- 4.2 La compressibilité
- 4.3 Le principe de Bernoulli pour un écoulement compressible
- 4.4 L'écoulement dans une tuyère
- 4.5 Atmosphères en équilibre hydrostatique

## **5. Conduction, diffusion et mélange**

- 5.1 Conduction et diffusion thermique
- 5.2 Diffusion de la chaleur
- 5.3 Mélange hydrodynamique
- 5.4 Mélange dans un écoulement fermé

## **6. Viscosité et couches limites**

- 6.1 Origine microscopique de la viscosité
- 6.2 Les équations de Navier-Stokes
- 6.3 Le stress visqueux
- 6.4 Conditions limites pour un écoulement visqueux
- 6.5 Le nombre de Reynolds et le principe de similarité
- 6.6 Viscosité et conservation de l'énergie
- 6.7 Viscosité et vorticité
- 6.8 La Loi de Hagen-Poiseuille
- 6.9 La Loi de Stokes
- 6.10 Couche limite visqueuse

## **DEUXIÈME PARTIE: APPLICATIONS**

### **7. Écoulements géophysiques**

- 7.1 La force de Coriolis en hydrodynamique
- 7.2 L'équilibre géostrophique
- 7.3 Les ondes de Rossby
- 7.4 Le théorème de Taylor-Proudman
- 7.5 La couche d'Ekman océanique

### **8. Du volcan au vortex**

- 8.1 Les lignes de vorticité
- 8.2 Amplification de la vorticité
- 8.3 L'analogie magnétostatique
- 8.4 Interaction des lignes de vorticité
- 8.5 L'effet Magnus
- 8.6 Les anneaux de vorticité
- 8.7 Retour à l'Etna

### **9. De la vague au tsunami**

- 9.1 La vague en toute généralité
- 9.2 Vagues en eau très profonde
- 9.3 Vagues en eau moins profonde
- 9.4 Vagues en eau peu profonde

- 9.3 Énergétique et déferlement
- 9.4 Effet de la tension superficielle
- 9.5 Le phénomène tsunami

## **TROISIÈME PARTIE: LA TURBULENCE**

### **10. Instabilités hydrodynamiques**

- 10.1 La notion d'instabilité
- 10.2 Analyse via la théorie des perturbations
- 10.3 Instabilité de Rayleigh-Taylor
- 10.4 Instabilité de Kelvin-Helmholtz
- 10.5 Instabilité de Taylor-Couette

### **11. Convection thermique**

- 11.1 La dilatation thermique
- 11.2 Les expériences de Bénard
- 11.3 L'approximation de Boussinesq
- 11.4 Convection en milieu stratifié par la gravité
- 11.5 Stabilité hydrodynamique et écoulements naturels

### **12. Transition vers la turbulence**

- 12.1 Instabilités et écoulements turbulents
- 12.2 Tourbillons et turbulence
- 12.3 L'approche de Landau
- 12.4 Cascade turbulente et dissipation de l'énergie
- 12.5 Les lois de Kolmogorov

### **13. Description statistique des écoulements turbulents**

- 13.1 Forme statistique des équations de Navier-Stokes
- 13.2 Les contraintes de Reynolds
- 13.3 Le problème de la fermeture
- 13.4 La viscosité turbulente
- 13.5 La longueur de mélange
- 13.6 La couche limite turbulente

### **14. Turbulence, chaos et prédictivité**

- 14.1 Une variation sur le modèle de Lorenz
- 14.2 Solutions stationnaires et stabilité
- 14.3 Solutions non-stationnaires
- 14.4 L'effet papillon