Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 3, Automne · 🧱 Calculateur intégré

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 10 unités et 6 travaux pratiques. Ce sont les vrais totaux, pas un programme plus long raccourci.

Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur une page de cours qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.

> Ceci est le plan d'un cours gratuit en autonomie rédigé par Saving Planets. Ce n'est pas un cours universitaire : il ne donne aucun crédit académique et aucun établissement n'y participe.
>
> Son contenu suit un cours de mécanique des fluides d'un semestre de troisième année. Il s'inspire des thèmes et du niveau de MIT 2.06 Fluid Dynamics et de MIT 1.060 Engineering Mechanics II (tous deux gratuits sur MIT OpenCourseWare), ainsi que de cours comme Purdue ME 309 et Georgia Tech CEE 3040, en s'appuyant sur le chapitre gratuit d'OpenStax University Physics consacré aux fluides et sur les simulations PhET, que nous citons lorsqu'ils sont utiles. Aucun de ces auteurs ou établissements n'approuve cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque module est relié à des applications réelles avec une source publique citée (hydroélectricité, stockage par pompage, énergies marines, fuites d'eau domestiques, circulation océanique et éoliennes), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et chaque TP dispose d'une simulation gratuite ou d'une version sûre à faire chez soi.
>
> Suivez-le dans l'ordre. Chaque unité comporte des objectifs, des notions clés, des équations, des exemples pas à pas, des exercices corrigés en détail, des erreurs fréquentes, des cartes mémoire et un quiz. Votre progression est enregistrée uniquement dans ce navigateur.

Comment ce cours aide à sauver la planète

L'eau et l'air en mouvement transportent l'essentiel de l'énergie renouvelable du monde : les rivières à travers les turbines hydroélectriques, le vent sur les pales des éoliennes, les marées et les vagues dans les dispositifs d'énergie marine. La mécanique des fluides détermine aussi l'énergie nécessaire pour pomper l'eau vers les villes et les exploitations agricoles, et la part perdue en fuites et en frottement.

Les courants océaniques transportent la chaleur autour de la planète et façonnent le climat. Chaque module se termine par une courte section sourcée. Les valeurs qui ne proviennent pas

d’une source sont signalées comme valeurs d’exemple.

Pour les enseignants

Vous pouvez enseigner ce cours, ou laisser un élève le faire seul. Il est gratuit. Saving Planets ne donne ni note ni crédit scolaire.

- Cette page est le cours entier : 10 unités et 6 travaux pratiques (ENGR 330).
- Prévoyez 15 semaines, environ 6 à 9 heures par semaine, y compris les semaines de travaux pratiques.
- Suivez le calendrier de 15 semaines. Lisez l’unité, faites les exercices sur papier, puis ouvrez la réponse. La semaine d’un TP, faites le TP ou la version à la maison.
- Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur la page qu’un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.
- Utilisez Imprimer cette page, ou téléchargez le guide d’étude PDF. La feuille de formules est vers la fin.
- Demandez : en quoi cette unité aide-t-elle les gens et la planète ? Chaque unité a un encadré vert avec un fait sourcé.
- Copiez le modèle de guide enseignant et écrivez le nom de votre classe, le temps dont vous disposez et les questions que vous poserez. Ouvrir le modèle de guide enseignant

Avant de commencer

Prérequis

- Analyse III : dérivées partielles, divergence et intégrales multiples.
- Équations différentielles : EDO du premier et du second ordre.
- Statique et dynamique : diagrammes du corps libre, lois de Newton et quantité de mouvement.
- La thermodynamique aide pour l’équation de l’énergie mais n’est pas obligatoire.

Comment étudier

- Commencez chaque problème par un schéma : volume de contrôle, ligne de courant ou diagramme du corps libre du fluide.
- Écrivez d’abord l’équation qui gouverne le problème en mots (masse, quantité de mouvement ou énergie), puis éliminez les termes que vous pouvez justifier.
- Travaillez en charges (mètres de fluide) pour les systèmes liquides ; elles facilitent la comparaison des pompes, conduites et turbines.
- Calculez le nombre de Reynolds avant de choisir une corrélation de frottement ou de traînée.
- Vérifiez les unités et les cas limites : un débit nul signifie une perte nulle ; doubler la vitesse quadruple à peu près les pertes turbulentes.

- Faites chaque exercice sur papier avant d’ouvrir la réponse, et refaites les quiz quelques jours plus tard.

Ce qu’il vous faut

- Un ordinateur ou une tablette pour les simulations gratuites PhET Density, Buoyancy, Under Pressure et Fluid Pressure and Flow.
- Une bouteille en plastique transparent, un clou ou une brochette, une règle et du ruban adhésif.
- Une balance de cuisine, un pichet gradué, un seau et un chronomètre.
- Un tuyau d’arrosage ou un robinet d’évier.
- Un tableur pour les TP sur les conduites et les pompes.

Programme suggéré sur 15 semaines

Environ 6 à 9 heures par semaine : lecture, exercices et, les semaines de TP, le TP.

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
1	Propriétés des fluides : masse volumique, viscosité et tension superficielle	Propriétés des fluides, viscosité, tension superficielle	OpenStax UP1 14.1, 14.7
2	Statique des fluides, manomètres et poussée d’Archimède	Hydrostatique et manomètres	UP1 14.2
3	Statique des fluides, manomètres et poussée d’Archimède	Forces sur les surfaces immergées, poussée d’Archimède, stabilité ; TP A	UP1 14.4
4	Bernoulli, charges et équation de l’énergie	Continuité, Bernoulli, charges, équation de l’énergie ; TP B	UP1 14.5–14.6
5	Quantité de mouvement intégrale : jets, aubes, coudes et turbines	Théorème de transport de Reynolds, quantité de mouvement, jets, aubes, Pelton	MIT 2.06
6	Analyse différentielle : continuité, Navier–Stokes et écoulements exacts	Cinématique, continuité, fonction de courant	MIT 2.06
7	Analyse différentielle : continuité, Navier–Stokes et écoulements exacts	Navier–Stokes, Couette et Poiseuille ; TP C ; entraînement pour le partiel	MIT 2.25
8	Analyse dimensionnelle, similitude et essais sur maquette	Analyse dimensionnelle et similitude	MIT 1.060

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
9	Écoulement en conduite : frottement, diagramme de Moody et pertes singulières	Écoulement laminaire et turbulent en conduite, diagramme de Moody	MIT 1.060
10	Écoulement en conduite : frottement, diagramme de Moody et pertes singulières	Pertes singulières, réseaux ; TP D	MIT 1.060
11	Pompes, turbines et réseaux de pompage	Pompes, courbes de réseau, lois de similitude, turbines ; TP F	Systèmes de pompage du DOE
12	Écoulement externe : couches limites, traînée et portance	Couches limites, traînée, écoulement de Stokes	NASA Glenn
13	Écoulement externe : couches limites, traînée et portance	Portance, énergie éolienne, limite de Betz ; TP E	NASA Glenn; DOE wind
14	Écoulement à surface libre : rivières, canaux et ressauts hydrauliques	Canaux à surface libre, nombre de Froude, Manning	MIT 1.060
15	Écoulement à surface libre : rivières, canaux et ressauts hydrauliques	Énergie spécifique, ressauts hydrauliques, déversoirs ; entraînement pour l’examen final	MIT 1.060

Votre progression

Cochez les unités et les TP à mesure que vous les terminez, et faites les quiz. La progression et les scores sont enregistrés uniquement dans ce navigateur et ne nous sont jamais envoyés.

Unités

Propriétés des fluides : masse volumique, viscosité et tension superficielle

Ce qui fait un fluide, l'hypothèse du milieu continu, masse volumique et densité, pression, viscosité et loi de Newton de la viscosité, viscosité cinématique, fluides non newtoniens, tension superficielle et ascension capillaire, et pression de vapeur et cavitation.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Définir un fluide et utiliser l'hypothèse du milieu continu.
- Utiliser la loi de Newton de la viscosité pour trouver la contrainte de cisaillement.
- Calculer l'ascension capillaire à partir de la tension superficielle.
- Expliquer comment les différences de masse volumique entraînent des écoulements.

Notions clés

- Un fluide se déforme continûment sous toute contrainte de cisaillement, si petite soit-elle. Le traiter comme un milieu continu permet de définir la masse volumique, la vitesse et la pression en chaque point.
- Masse volumique ρ (kg/m³) et densité SG = ρ/ρ_water. L'eau à 20 °C a ρ = 998 kg/m³ ; l'air à 15 °C a 1.225 kg/m³.
- Loi de Newton de la viscosité : contrainte de cisaillement τ = μ du/dy. La viscosité dynamique μ mesure la résistance au cisaillement ; la viscosité cinématique ν = μ/ρ. L'eau est environ 56 fois plus visqueuse que l'air mais a un ν environ 15 fois plus faible.
- Les fluides non newtoniens (peinture, sang, dentifrice) ont une viscosité qui varie avec le taux de cisaillement.
- La tension superficielle σ tend les surfaces liquides ; dans un tube fin, l'eau monte de h = 4σ cos θ/(ρgD). Si la pression locale tombe à la pression de vapeur, le liquide bout : c'est la cavitation, qui endommage pompes et hélices.

Équations clés

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

τ=μdu/dy

Loi de Newton de la viscosité

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ν=(μ)/(ρ)

Viscosité cinématique

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{water}}$$

SG=ρρ_water

Densité

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g D}$$

h=(4σθ)/(ρ gD)

Ascension capillaire

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 De l'eau (μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s)) remplit un interstice de 1 mm entre une plaque fixe et une plaque se déplaçant à 2 m/s. Trouvez la contrainte de cisaillement.

1. du/dy = 2/0.001 = 2000 s⁻¹.
2. τ = 1.002 × 10⁻³ × 2000.

Réponse : τ = 2.00 Pa.

Exemple 1.2 Trouvez l'ascension capillaire de l'eau (σ = 0.0728 N/m, θ = 0) dans un tube de verre de 1 mm.

1. h = 4 × 0.0728/(998 × 9.81 × 0.001).

Réponse : h = 29.7 mm.

Exemple 1.3 Trouvez ν pour l'eau à 20 °C.

1. ν = 1.002 × 10⁻³/998.

Réponse : ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la densité SG de l’eau de mer (1025 kg/m³).

   1025/998 = 1.027.

2. Trouvez l’ascension capillaire dans un tube de 0.5 mm.

   Deux fois plus : 59.5 mm.

3. Trouvez μ_water/μ_air.

   $1.002 \times 10^{-3}/1.789 \times 10^{-5} = 56.0$.

4. Quelle fraction d’un iceberg se trouve sous la surface de l’eau de mer ?

   917/1025 = 89.5%.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La viscosité et la masse volumique sont la même chose.
En réalité : Le miel est visqueux ; le mercure est dense mais peu visqueux.

Idée reçue : Les fluides résistent au cisaillement comme les solides.
En réalité : Ils s’écoulent sous toute contrainte de cisaillement.

Idée reçue : La cavitation nécessite une température élevée.
En réalité : Une basse pression suffit.

Cartes mémoire

Fluide

Se déforme continûment sous cisaillement.

Viscosité

$\tau = \mu\, du/dy$.

Viscosité cinématique

$\nu = \mu/\rho$.

Densité

ρ/ρ_{water}.

Ascension capillaire

$4\sigma \cos\theta/(\rho g D)$.

Cavitation

Ébullition à basse pression.

Quiz d’autocontrôle

1. La contrainte de cisaillement dans un fluide newtonien est…

μ du/dy

ρgh

ρV²

σ/D

μ du/dy. Loi de Newton de la viscosité.

2. La viscosité cinématique est…

μρ

μ/ρ

ρ/μ

τ/μ

μ/ρ. ν = μ/ρ.

3. L’ascension capillaire augmente quand le tube est…

plus large

plus étroit

plus long

plus lourd

plus étroit. h ∝ 1/D.

4. La cavitation se produit quand la pression tombe à…

zéro relatif

la pression de vapeur

la pression atmosphérique

la pression d’arrêt

la pression de vapeur. Ébullition locale.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NOAA explique que les vents entraînent les courants océaniques dans les 100 premiers mètres, mais que les courants profonds, à des milliers de mètres, sont entraînés par des différences de masse volumique de l’eau, contrôlées par la température et la salinité : la circulation thermohaline.

Dans les régions polaires, la banquise se forme en laissant le sel derrière elle ; l’eau environnante devient plus salée et plus dense et plonge ; l’eau de surface afflue pour la remplacer, ce qui lance le tapis roulant océanique mondial. La masse volumique, première propriété de ce module, déplace la chaleur sur toute la planète.

Sur Saving Planets : Océans · Observation de la Terre

Sources : NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

Ressources d’apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 14.1 Fluids, density and pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Section de manuel gratuite.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Notes du MIT sur les propriétés des fluides.
- PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density): La masse volumique en interactif.

☐ **J’ai terminé cette unité**

UNITÉ 2 · SEMAINES 2–3

Statique des fluides, manomètres et poussée d’Archimède

Pression en un point, équation de l’hydrostatique, pression relative et absolue, manomètres, forces hydrostatiques sur les surfaces planes immergées et centre de poussée, forces sur les surfaces courbes, principe d’Archimède, et stabilité des corps flottants.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la pression en profondeur et lire les manomètres.
- Trouver la force résultante et le centre de poussée sur une vanne immergée.
- Appliquer le principe d’Archimède.
- Juger si un corps flottant est stable.

Notions clés

- La pression en un point agit de la même façon dans toutes les directions. Dans un fluide au repos dp/dz = −ρg, donc avec une masse volumique constante p = p_0 + ρgh à la profondeur h. La pression relative est mesurée par rapport à l’atmosphère.
- Les manomètres équilibrent des colonnes de fluide : parcourez le tube en ajoutant ρgh en descendant et en le soustrayant en montant.
- Sur une surface plane, la force résultante vaut F = ρg h_c A (h_c = profondeur du centroïde). Elle s’applique au centre de poussée, sous le centroïde : y_cp = y_c + I_xc/(y_c A).
- Sur les surfaces courbes, la composante horizontale est la force sur la projection verticale et la composante verticale est le poids du fluide situé au-dessus.
- Archimède : la poussée est égale au poids du fluide déplacé, F_B = ρ_fluid g V_displaced. Un corps flottant est stable si son métacentre est au-dessus de son centre de gravité.

Équations clés

$$p = p_0 + \rho g h$$

p=p_0+ρ gh

Pression hydrostatique

$$F = \rho g h_c A$$

F=ρ g h_cA

Force sur une surface plane

$$y_{cp} = y_c + \frac{I_{xc}}{y_c A}$$

`y_cp=y_c+_xcy_cA`

Centre de poussée

$$F_B = \rho_f g V_{disp}$$

`F_B=ρ_f gV_disp`

Poussée d’Archimède

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Trouvez la pression relative à 10 m sous la surface d’une eau douce (ρ = 998 kg/m³).

1. p = 998 × 9.81 × 10.

Réponse : p = 97.9 kPa (environ une atmosphère).

Exemple 2.2 Une vanne rectangulaire verticale de 2 m de large et 3 m de haut a son bord supérieur à la surface de l’eau. Trouvez la force et la profondeur du centre de poussée.

1. h_c = 1.5 m; A = 6 m².
2. F = 998 × 9.81 × 1.5 × 6 = 88.1 kN.
3. I_xc = 2 × 3³/12 = 4.5 m⁴; y_cp = 1.5 + 4.5/(1.5 × 6).

Réponse : F = 88.1 kN appliquée à 2.0 m sous la surface (aux deux tiers de la profondeur).

Exemple 2.3 Un manomètre à mercure (ρ = 13600 kg/m³) branché sur une conduite d’eau indique une différence de 0.1 m. Trouvez la différence de pression.

1. Δp = (13600 − 1000) × 9.81 × 0.1 (eau au-dessus du mercure, ρ_water ≈ 1000 kg/m³).

Réponse : Δp = 12.4 kPa.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la poussée sur un objet de 2 L entièrement immergé dans l'eau ($\rho \approx 1000$ kg/m³).

   $1000 \times 9.81 \times 0.002 = 19.6$ N.

2. Quelle est la pression absolue à 10 m de profondeur si $p_{atm} = 101.3$ kPa ?

   199.2 kPa.

3. La force sur un barrage dépend-elle de la longueur de la retenue ?

   Non ; seulement de la profondeur et de la surface de la paroi.

4. Pourquoi le centre de poussée est-il sous le centroïde ?

   La pression augmente avec la profondeur.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La pression dépend de la forme du récipient.
En réalité : Seulement de la profondeur (le paradoxe hydrostatique).

Idée reçue : La poussée d'Archimède dépend du poids de l'objet.
En réalité : Elle dépend du volume déplacé.

Idée reçue : La force sur une vanne s'applique en son centre.
En réalité : Elle s'applique au centre de poussée, plus bas.

Cartes mémoire

Hydrostatique

$p = p_0 + \rho g h$.

Pression relative

Par rapport à l'atmosphère.

Force sur une surface plane

$\rho g\, h_c\, A$.

Centre de poussée

$y_c + I/(y_c\, A)$.

Archimède

$F_B = \rho g V$.

Stabilité

Métacentre au-dessus de G.

Quiz d'autocontrôle

1. La pression à la profondeur h est…

ρgh

ρV²/2

μ du/dy

mg/A

ρgh. Hydrostatique (relative).

2. La poussée d'Archimède est égale…

au poids de l'objet

au poids du fluide déplacé

à la masse de l'objet

zéro

au poids du fluide déplacé. Archimède.

3. Pour une vanne verticale partant de la surface, le centre de poussée est…

à mi-profondeur

aux deux tiers de la profondeur

à la surface

au fond

aux deux tiers de la profondeur. Charge triangulaire.

4. Un corps flottant est stable si…

G est au-dessus de M

M est au-dessus de G

B = G

il est lourd

M est au-dessus de G. Métacentre.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE note que les États-Unis comptent plus de 90000 barrages et que moins de 3 % d'entre eux produisent de l'électricité ; les autres servent aux loisirs, aux étangs agricoles, à la maîtrise des crues, à l'approvisionnement en eau et à l'irrigation. Chacun est conçu avec les équations de ce module : la charge de l'eau sur un barrage croît avec le carré de la profondeur et s'applique bas sur la paroi.

Le DOE décrit la centrale hydroélectrique la plus courante, une centrale à retenue, comme un barrage qui stocke l'eau d'une rivière dans un réservoir ; l'eau relâchée à travers une turbine fait tourner un alternateur, et les lâchers peuvent aussi servir à la maîtrise des crues, aux loisirs, au passage des poissons et à la qualité de l'eau. La pression de l'eau stockée sur le barrage et sa charge à la turbine découlent directement de $p = \rho g h$.

Sur Saving Planets : Statique · Océans

Sources : U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 14.2 Measuring pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-2-measuring-pressure): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 14.4 Archimedes' principle and buoyancy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-4-archimedes-principle-and-buoyancy): Section de manuel gratuite.
- PhET : Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): L'hydrostatique en interactif.
- PhET : Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): La poussée d'Archimède en interactif.

Regarder le cours magistral

Fluid Dynamics and Statics and Bernoulli's Equation (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-20) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d'utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Bernoulli, charges et équation de l’énergie

Lignes de courant et visualisation des écoulements, continuité Q = AV, équation de Bernoulli et ses limites, charges de pression, de vitesse et d’altitude, ligne de charge, loi de Torricelli, équation de l’énergie en écoulement permanent avec charges de pompe, de turbine et de pertes, et production hydroélectrique.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Appliquer la continuité et Bernoulli le long d’une ligne de courant.
- Travailler en charges : pression, vitesse et altitude.
- Utiliser l’équation de l’énergie avec les charges de pompe, de turbine et de pertes.
- Calculer la puissance hydroélectrique et la puissance de pompage.

Notions clés

- Pour un écoulement permanent incompressible, le débit volumique Q = AV est le même dans chaque section d’une conduite (continuité).
- Bernoulli le long d’une ligne de courant (permanent, non visqueux, incompressible) : p/(ρg) + V²/(2g) + z = constante. Chaque terme est une charge en mètres.
- Torricelli : un jet sortant d’un réservoir à la profondeur h a une vitesse V = √(2gh).
- Les systèmes réels ajoutent pompes et turbines et perdent de l’énergie par frottement : $p_1/(\rho g) + V_1^2/(2g) + z_1 + h_pump = p_2/(\rho g) + V_2^2/(2g) + z_2 + h_turbine + h_L$.
- Puissance d’une charge : P = ρgQH. Les turbines fournissent P = ηρgQH ; les pompes nécessitent P = ρgQH/η. Le DOE note que la production hydroélectrique dépend du débit et de la charge.

Équations clés

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

`Q=A_1V_1=A_2V_2`

Continuité

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{const}$$

`(p)/(ρ g)+(V^2)/(2g)+z=const`

Bernoulli en charges

$$V = \sqrt{2gh}$$

V=2gh

Torricelli

$$P = \eta \rho g Q H$$

P=ρ gQH

Hydroélectricité

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Trouvez la vitesse du jet sortant d'un trou situé 5 m sous la surface d'un réservoir.

1. V = √(2 × 9.81 × 5).

Réponse : V = 9.90 m/s.

Exemple 3.2 Une centrale hydroélectrique a Q = 50 m³/s, une charge H = 100 m et un rendement global de 0.9 (valeurs d'exemple ; ρ = 1000 kg/m³). Trouvez la puissance.

1. P = 0.9 × 1000 × 9.81 × 50 × 100.

Réponse : P = 44.1 MW, une « grande » centrale selon la définition du DOE (30 MW).

Exemple 3.3 Une pompe élève 0.05 m³/s d'eau de 20 m avec 5 m de pertes en conduite et un rendement de 75 %. Trouvez la puissance absorbée.

1. h_pump = 20 + 5 = 25 m.
2. P = 1000 × 9.81 × 0.05 × 25/0.75.

Réponse : P = 16.4 kW.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un tuyau débite 0.4 L/s à travers un alésage de 20 mm vers une buse de 10 mm. Trouvez les deux vitesses.

   1.27 m/s et 5.09 m/s.

2. Convertissez 200 kPa en mètres de colonne d’eau.

   200,000/(1000 × 9.81) = 20.4 m.

3. On double la charge d’une centrale hydroélectrique à Q constant. Puissance ?

   Elle double.

4. Pourquoi un tube de Pitot indique-t-il plus qu’une prise statique ?

   Il ajoute la charge de vitesse.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Bernoulli s’applique à travers une pompe.
En réalité : Utilisez l’équation de l’énergie avec h_pump.

Idée reçue : Un écoulement plus rapide signifie une pression plus élevée.
En réalité : Le long d’une ligne de courant, plus rapide signifie une pression statique plus basse.

Idée reçue : La charge est une pression.
En réalité : C’est une énergie par unité de poids, en mètres.

Cartes mémoire

Continuité

$Q = AV$.

Bernoulli

$p/\rho g + V^2/2g + z = \text{const.}$

Torricelli

$V = \sqrt{(2gh)}$.

Équation de l’énergie

Ajoute h_pump, h_turbine, h_L.

Hydroélectricité

$P = \eta\rho gQH$.

Puissance de pompe

$\rho gQH/\eta$.

Quiz d’autocontrôle

1. La charge de vitesse est…

$V^2/(2g)$

p/ρg

z

ρV²

V²/(2g). L’énergie cinétique par unité de poids.

2. Diviser par deux la section d’une conduite double…

de la pression

la vitesse

le débit

la perte de charge

la vitesse. Continuité.

3. La puissance hydroélectrique est proportionnelle à…

Q seulement

H seulement

Q × H

Q/H

Q × H. P = ηρgQH.

4. La vitesse du jet de Torricelli est…

gh

√(2gh)

2gh

√(gh)

√(2gh). Bernoulli du réservoir au jet.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE explique que l'hydroélectricité est alimentée par l'énergie cinétique de l'eau qui s'écoule, et que l'énergie disponible dépend à la fois du volume d'écoulement et de la dénivellation, la chute : plus le débit est grand et la chute haute, plus on peut produire d'électricité. L'eau traverse une conduite forcée et fait tourner une turbine reliée à un alternateur.

Le DOE classe les centrales par taille : grande hydraulique au-dessus de 30 MW, petite hydraulique de 100 kW à 10 MW, et micro-hydraulique jusqu'à 100 kW, assez pour une maison, une ferme ou un village. P = ηρgQH permet de dimensionner chacune à partir d'une mesure de débit et d'un relevé de la chute.

Sur Saving Planets : Solutions · Thermodynamique

Sources : U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works) · U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP1, 14.5 Fluid dynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-5-fluid-dynamics): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP1, 14.6 Bernoulli's equation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-6-bernoullis-equation): Section de manuel gratuite.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): Bernoulli en interactif.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Notes sur l'équation de l'énergie.

Regarder le cours magistral

Fluid Dynamics and Statics and Bernoulli's Equation (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-20) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d'utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Quantité de mouvement intégrale : jets, aubes, coudes et turbines

Théorème de transport de Reynolds, équation de la quantité de mouvement pour les volumes de contrôle, forces des jets sur les plaques et les aubes, forces sur les coudes et les buses, volumes de contrôle mobiles, turbines à action (roues Pelton), et équation du moment cinétique pour les turbomachines.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Énoncer le théorème de transport de Reynolds.
- Appliquer l'équation de la quantité de mouvement aux jets et aux aubes.
- Analyser une aube mobile et une roue Pelton.
- Utiliser le moment cinétique pour le couple des turbines et des pompes.

Notions clés

- Théorème de transport de Reynolds : le taux de variation d'une propriété d'un système fluide = taux de variation dans un volume de contrôle + flux sortant net à travers sa surface.
- Quantité de mouvement en régime permanent : ΣF = Σṁ_out V_out − Σṁ_in V_in (vecteurs). Incluez les forces de pression sur les sections coupées et la force d'appui.
- Un jet de vitesse V et de débit Q frappant une plaque plane de face exerce F = ρQV. Une aube déviant le jet d'un angle θ exerce F = ρQV(1 − cos θ) le long du jet.
- Pour une aube se déplaçant à la vitesse U, utilisez la vitesse relative (V − U). Les augets d'une roue Pelton dévient le jet de près de 180° ; la puissance F·U est maximale pour U = V/2.
- Moment cinétique : couple = ṁ(r_2V_θ2 − r_1V_θ1) (équation d'Euler des turbomachines), base de la conception des pompes et des turbines.

Équations clés

$$\sum \mathbf{F} = \sum \dot{m}\mathbf{V}_{out} - \sum \dot{m}\mathbf{V}_{in}$$

F= m V_out- m V_in

Quantité de mouvement en régime permanent

$$F = \rho Q V(1 - \cos\theta)$$

F=ρ QV(1-θ)

Force d'un jet dévié

$$F = \rho Q(V - U)(1 - \cos\beta)$$

F=ρ Q(V-U)(1-β)

Aube mobile

$$T = \dot{m}(r_2 V_{\theta 2} - r_1 V_{\theta 1})$$

T= m(r_2V_θ2-r_1V_θ1)

Équation d'Euler des turbomachines

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Un jet d'eau de 50 mm à 20 m/s frappe une plaque plane de face. Trouvez la force.

1. A = π × 0.05²/4 = 1.963 × 10⁻³ m².
2. F = ρAV² = 1000 × 1.963 × 10⁻³ × 400.

Réponse : F = 785 N.

Exemple 4.2 Le même jet est dévié de 120° par une aube fixe. Trouvez la force le long du jet.

1. F = ρAV²(1 − cos 120°) = 785 × 1.5.

Réponse : F = 1178 N.

Exemple 4.3 Un auget Pelton se déplaçant à 15 m/s reçoit un jet de 0.01 m³/s à 30 m/s et le dévie de 165°. Trouvez la force et la puissance.

1. F = 1000 × 0.01 × (30 − 15)(1 − cos 165°) = 294.9 N.
2. P = F × U.

Réponse : F = 294.9 N ; P = 4.42 kW (le jet transporte ½ρQV² = 4.5 kW).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. À quelle vitesse d'auget une roue Pelton donne-t-elle la puissance maximale ?

La moitié de la vitesse du jet.

2. On double la vitesse du jet à section égale. Force sur une plaque ?

   4 fois plus.

3. Citez les forces d'un bilan de quantité de mouvement sur un coude.

   Forces de pression à l'entrée et à la sortie, poids et force d'appui.

4. Pourquoi les augets Pelton sont-ils divisés au milieu ?

   Pour dévier le jet de près de 180° sans qu'il frappe l'auget suivant.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La force sur la plaque dépend de la taille de la plaque.
En réalité : Pour un jet entièrement dévié, elle ne dépend que de ρQV.

Idée reçue : Une aube mobile voit toute la vitesse du jet.
En réalité : Elle voit V − U.

Idée reçue : La quantité de mouvement est un scalaire.
En réalité : C'est un vecteur ; décomposez-la en composantes.

Cartes mémoire

RTT

Taux du système = taux dans le VC + flux sortant net.

Quantité de mouvement

$\Sigma F = \Sigma \dot{m}\, V_{out} - \Sigma \dot{m}\, V_{in}$.

Plaque

ρQV.

Aube

$\rho Q V(1 - \cos\theta)$.

Pelton

Optimale pour U = V/2.

Turbine d'Euler

$T = \dot{m}\, \Delta(rV_\theta)$.

Quiz d'autocontrôle

1. La force d'un jet sur une plaque plane est…

ρQV

ρgQH

½ρV²

QV

ρQV. Le flux de quantité de mouvement.

2. Dévier un jet de 180° donne une force de…

ρQV

2ρQV

0

ρQV/2

2ρQV. 1 − cos 180° = 2.

3. Le meilleur rapport U/V pour une roue Pelton est…

0.25

0.5

1

2

0.5. Il maximise (V − U)U.

4. L’équation d’Euler donne, pour une turbomachine, …

le moment d’une force

à la traînée

la flottabilité

la viscosité

le moment d’une force. Moment cinétique.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE explique que le stockage hydraulique par pompage fonctionne comme une batterie géante : quand la demande est faible, il pompe l’eau vers un réservoir supérieur, et quand la demande est forte, l’eau redescend à travers une turbine. Selon le DOE, le stockage par pompage représente 88 % de tout le stockage d’énergie à l’échelle des réseaux aux États-Unis, avec 43 centrales, et la capacité pourrait plus que doubler.

Chaque pompe-turbine est conçue avec les équations de quantité de mouvement et de moment cinétique de ce module : les angles des aubes de la roue fixent le couple que l’eau cède ou reçoit. Stocker ainsi l’énergie solaire et éolienne dépend de la justesse de ces aubes.

Sur Saving Planets : Solutions · Dynamique

Sources : U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

Ressources d’apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Quantité de mouvement sur un volume de contrôle.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Notes sur la quantité de mouvement.
- NASA Glenn: Conservation of momentum (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/conmo.html): Page gratuite de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Traitement plus approfondi.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Analyse différentielle : continuité, Navier–Stokes et écoulements exacts

Cinématique des fluides (champ de vitesse, accélération, vorticité, déformation), équation de continuité différentielle, fonction de courant, équations d'Euler et de Navier–Stokes, conditions aux limites, et solutions laminaires exactes : écoulement de Couette, écoulement de Poiseuille plan et écoulement de Hagen–Poiseuille en conduite.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer l'accélération particulaire d'un champ de vitesse.
- Vérifier la continuité et trouver une fonction de courant.
- Énoncer les équations de Navier–Stokes et leurs conditions aux limites.
- Résoudre les écoulements de Couette et de Hagen–Poiseuille.

Notions clés

- Du point de vue eulérien, l'accélération a une partie locale ∂V/∂t et une partie convective (V·∇)V ; leur somme est la dérivée particulaire DV/Dt.
- Continuité incompressible : ∇·V = ∂u/∂x + ∂v/∂y + ∂w/∂z = 0. En 2D, une fonction de courant ψ avec u = ∂ψ/∂y, v = −∂ψ/∂x la satisfait automatiquement.
- Navier–Stokes (incompressible, newtonien) : ρ DV/Dt = −∇p + ρg + μ∇²V. Avec la condition de non-glissement aux parois, elle gouverne presque tous les écoulements de ce cours ; seuls quelques cas se résolvent exactement.
- Écoulement de Couette entre une plaque fixe et une plaque mobile : profil de vitesse linéaire, cisaillement τ = μU/h.
- Écoulement de Hagen–Poiseuille en conduite : profil parabolique, u_max = 2V_avg, et Q = πR⁴Δp/(8μL). Il reste valable tant que l'écoulement est laminaire (Re inférieur à environ 2300).

Équations clés

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\cdot\nabla)\mathbf{V}$$

```
(D V)/(Dt)=( V)/( t)+( V·) V
```

Accélération particulaire

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Continuité incompressible

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V}$$

ρ(D V)/(Dt)=- p+ρ g+μ^2 V

Navier–Stokes

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu L}$$

Q=(π R^4Δ p)/(8μ L)

Hagen–Poiseuille

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 De l'eau s'écoule dans un tube de 4 mm de diamètre avec Δp/L = 100 Pa/m. Trouvez Q, V_avg, u_max et Re.

1. $Q = \pi \times 0.002^4 \times 100/(8 \times 1.002 \times 10^{-3}) = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s.
2. $V = Q/(\pi \times 0.002^2) = 0.0499$ m/s ; u_max = 2V.
3. $Re = 998 \times 0.0499 \times 0.004/1.002 \times 10^{-3}$.

Réponse : $Q = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s, V = 0.0499 m/s, u_max = 0.0998 m/s, Re = 199 (laminaire).

Exemple 5.2 Une plaque se déplace à 1 m/s sur un film d'eau de 2 mm. Trouvez la contrainte de cisaillement.

1. $\tau = \mu U/h = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.002$.

Réponse : τ = 0.501 Pa.

Exemple 5.3 V = (2x, −2y) est-il incompressible, et quelle est son accélération en (1, 1) ?

1. $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 2 - 2 = 0$.
2. $a_x = u\, \partial u/\partial x = 2x \times 2 = 4x$; $a_y = v\, \partial v/\partial y = (-2y)(-2) = 4y$.

Réponse : Oui ; a = (4, 4) m/s².

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. On divise par deux le rayon de la conduite à $\Delta p/L$ égal. Q ?

   1/16 du débit initial.

2. Trouvez ψ pour $u = 1$, $v = 0$.

   $\psi = y$.

3. Où le cisaillement est-il maximal dans un écoulement de Poiseuille ?

   À la paroi.

4. Nommez la condition aux limites sur une paroi solide.

   Non-glissement : la vitesse du fluide est égale à celle de la paroi.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un écoulement permanent a une accélération nulle.
En réalité : L’accélération convective peut être non nulle.

Idée reçue : Navier–Stokes a de nombreuses solutions exactes.
En réalité : Seulement pour quelques géométries simples.

Idée reçue : La loi de Poiseuille s’applique à tout écoulement en conduite.
En réalité : Seulement en écoulement laminaire.

Cartes mémoire

Dérivée particulaire

$\partial/\partial t + V\cdot\nabla$.

Continuité

$\nabla\cdot V = 0$.

Fonction de courant

$u = \partial\psi/\partial y$, $v = -\partial\psi/\partial x$.

Navier–Stokes

$\rho DV/Dt = -\nabla p + \rho g + \mu\nabla^2 V$.

Couette

$\tau = \mu U/h$.

Poiseuille

$Q = \pi R^4 \Delta p/8\mu L$.

Quiz d’autocontrôle

1. Le Q de Hagen–Poiseuille varie avec le rayon comme…

R

R^2

R^3

R^4

R^4. $\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$.

2. Dans un écoulement de Couette, le profil est…

parabolique

linéaire

uniforme

logarithmique

linéaire. Pas de gradient de pression.

3. L’accélération convective est…

$\partial V/\partial t$

$(V\cdot\nabla)V$

∇p

$\mu\nabla^2 V$

$(V\cdot\nabla)V$. La variation spatiale.

4. u_max/V_avg en écoulement laminaire en conduite vaut…

1

1.5

2

4

2. Parabolique.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'EPA indique que les fuites domestiques peuvent gaspiller près de 1 billion de gallons d'eau par an à l'échelle du pays, que les fuites d'un foyer moyen peuvent gaspiller plus de 9300 gallons par an, et que 9 % des logements ont des fuites gaspillant 50 gallons ou plus par jour.

Les petites fuites à travers des joints et raccords usés sont souvent des écoulements lents et laminaires dans de minuscules interstices, où la loi en R^4 ci-dessus montre pourquoi un léger élargissement d'une fissure change beaucoup. Selon l'EPA, réparer les fuites domestiques faciles à corriger peut faire économiser environ 10 % sur les factures d'eau.

Sur Saving Planets : Équations différentielles · Analyse III

Sources : U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Cours sur Navier–Stokes.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Solutions exactes.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Loi de Poiseuille.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Notes de cinématique.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Analyse dimensionnelle, similitude et essais sur maquette

Homogénéité dimensionnelle, théorème Pi de Buckingham, nombres sans dimension courants (Reynolds, Froude, Mach, Weber, Euler), similitude géométrique, cinématique et dynamique, lois de similitude et effets d'échelle, et adimensionnalisation des équations qui gouvernent les écoulements.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Trouver les nombres sans dimension avec le théorème Pi.
- Dire ce que comparent Re, Fr, Ma et We.
- Transposer les résultats d'essais sur maquette à l'échelle réelle par similitude de Froude ou de Reynolds.
- Expliquer pourquoi une similitude complète est souvent impossible.

Notions clés

- Toute équation valide est dimensionnellement homogène. Le théorème Pi de Buckingham dit qu'un problème à n variables et k dimensions de base a n − k nombres sans dimension indépendants.
- Nombres courants : Re = ρVL/μ (inertie/viscosité), Fr = V/√(gL) (inertie/gravité), Ma = V/a (compressibilité), We = ρV²L/σ (inertie/tension superficielle), Eu = Δp/(ρV²) (pression).
- Similitude dynamique : si la maquette et le prototype ont la même géométrie et les mêmes nombres sans dimension déterminants, leurs résultats adimensionnels (C_D, C_p, rendement) coïncident.
- Les écoulements à surface libre (navires, évacuateurs de crues, vagues) utilisent la similitude de Froude : V_m = V_p√(L_m/L_p) ; les forces varient comme le cube de l'échelle des longueurs et la puissance comme cette échelle à la puissance 3.5.
- Respecter à la fois Re et Fr exige généralement un fluide impossible ; les ingénieurs respectent donc le nombre dominant et corrigent l'autre (effets d'échelle).

Équations clés

$$\Pi \text{ groups} = n - k$$

```
groups=n-k
```

Théorème Pi de Buckingham

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu},\ Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

`Re=(ρ VL)/(μ),\ Fr=`

Nombres de Reynolds et de Froude

$$V_m = V_p\sqrt{L_m/L_p}$$

`V_m=V_p_m/L_p`

Similitude de Froude

$$\frac{F_p}{F_m} = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3$$

`(F_p)/(F_m)=((L_p)/(L_m))^3`

Échelle des forces (Froude, même fluide)

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 La traînée F d'une sphère dépend de ρ, V, D et μ. Combien de nombres Pi, et lesquels ?

1. n = 5 variables, k = 3 dimensions (M, L, T).
2. Nombres : F/(ρV²D²) et ρVD/μ.

Réponse : 2 nombres : C_D = f(Re).

Exemple 6.2 Une maquette houlomotrice au 1:20 est testée en similitude de Froude. La vitesse des vagues en vraie grandeur est de 10 m/s. Trouvez la vitesse sur maquette.

1. V_m = 10/√20.

Réponse : V_m = 2.24 m/s.

Exemple 6.3 Pour cette maquette, comment varient les forces et la puissance ?

1. F_p/F_m = 20³.
2. P_p/P_m = 20^3.5.

Réponse : Forces × 8000 ; puissance × 35777.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Quel nombre compte le plus pour les vagues d’un navire ?

   Le nombre de Froude.

2. Et pour l’écoulement dans une petite conduite ?

   Le nombre de Reynolds.

3. Une maquette au 1:10 dans le même fluide doit respecter Re. Vitesse sur maquette par rapport à la vraie grandeur ?

   10 fois plus rapide.

4. Que compare We ?

   L’inertie à la tension superficielle.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les essais sur maquette utilisent la même vitesse qu’en vraie grandeur.
En réalité : Ils utilisent des vitesses mises à l’échelle.

Idée reçue : Sans dimension signifie sans importance.
En réalité : Les nombres sans dimension gouvernent la physique.

Idée reçue : Toute maquette donne des résultats exacts en vraie grandeur.
En réalité : Des effets d’échelle subsistent quand tous les nombres ne coïncident pas.

Cartes mémoire

Théorème Pi

n − k nombres.

Reynolds

Inertie/viscosité.

Froude

Inertie/gravité.

Weber

Inertie/tension superficielle.

Similitude

Mêmes nombres, mêmes coefficients.

Similitude de Froude

$V \propto \sqrt{L}$.

Quiz d’autocontrôle

1. Le nombre de Froude compare l’inertie à…

la viscosité

la gravité

la tension superficielle

la compressibilité

la gravité. V/√(gL).

2. Avec 6 variables et 3 dimensions, il y a…

2

3

6

9

3. n − k.

3. En similitude de Froude (même fluide), les forces varient avec la longueur à la puissance…

1st

2nd

3rd

3.5th

3rd. L^3.

4. Le C_D d’une sphère lisse dépend surtout de…

Fr

Re

We

Ma

Re. Effets visqueux.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE décrit l'énergie marine comme l'énergie tirée des vagues, des marées, des courants fluviaux et océaniques, et des différences de température de l'océan. Il indique que la ressource marine totale des États-Unis équivaut à environ 57 % de toute la production d'électricité américaine en 2019, et que ces ressources sont très prévisibles.

Le DOE note que des chercheurs testent et déploient de nouvelles technologies pour exploiter cette ressource. Les houlomoteurs et les hydroliennes sont développés avec des maquettes dans des bassins à houle et des canaux bien avant que les dispositifs grandeur nature partent en mer, en utilisant les similitudes de Froude et de Reynolds de ce module.

Sur Saving Planets : Océans · Solutions

Sources : U.S. DOE: Marine energy basics (https://www.energy.gov/eere/water/marine-energy-basics)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Cours d'analyse dimensionnelle.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Notes sur la similitude.
- NASA Glenn: Similarity parameters (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airsim.html): Page gratuite de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Mise à l'échelle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Écoulement en conduite : frottement, diagramme de Moody et pertes singulières

Écoulement laminaire et turbulent en conduite, longueur d'établissement, équation de Darcy–Weisbach, coefficient de frottement laminaire 64/Re, diagramme de Moody et corrélations de Colebrook et de Haaland, pertes singulières, conduites non circulaires et diamètre hydraulique, et conduites en série, en parallèle et en réseau.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Déterminer si un écoulement en conduite est laminaire ou turbulent.
- Calculer les pertes par frottement avec Darcy–Weisbach et la formule de Haaland.
- Ajouter les pertes singulières des raccords et des vannes.
- Résoudre des problèmes simples de conduites en série et en parallèle.

Notions clés

- En conduite, l'écoulement est laminaire en dessous de Re ≈ 2300, turbulent au-delà d'environ 4000. L'écoulement turbulent mélange fortement la quantité de mouvement et a un profil plus plat.
- Darcy–Weisbach : h_L = f(L/D)(V²/2g). En laminaire f = 64/Re.
- En turbulent, f dépend de Re et de la rugosité relative ε/D (diagramme de Moody). La formule de Haaland est explicite : 1/√f = −1.8 $\log_{10}$[(ε/D/3.7)^1.11 + 6.9/Re].
- Raccords, vannes, coudes et entrées ajoutent des pertes singulières h_m = K V²/(2g). Dans les longues canalisations le frottement domine ; dans la plomberie domestique, les raccords comptent.
- Les conduites non circulaires utilisent le diamètre hydraulique D_h = 4A/P. Des conduites en série ont le même Q et leurs pertes s'additionnent ; en parallèle, elles ont la même perte de charge et leurs débits s'additionnent.

Équations clés

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Re=(ρ VD)/(μ)

Nombre de Reynolds en conduite

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

h_L=fL/D(V^2)/(2g)

Darcy–Weisbach

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10}\left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re}\right]$$

(1)/(f)=-1.8_10[((/D)/(3.7))^1.11+(6.9)/(Re)]

Haaland

$$h_m = K\frac{V^2}{2g}$$

h_m=K(V^2)/(2g)

Perte singulière

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 De l'eau s'écoule à 2 m/s dans une conduite en acier commercial de 50 mm (ε = 0.045 mm). Trouvez Re et f.

1. Re = 998 × 2 × 0.05/1.002 × 10^{-3} = 99,600.
2. ε/D = 0.0009 ; Haaland donne f.

Réponse : Re = 9.96 × 10^{4} (turbulent) ; f = 0.0216.

Exemple 7.2 Trouvez la perte de charge par frottement sur 100 m de cette conduite.

1. h_L = 0.0216 × (100/0.05) × 2^{2}/(2 × 9.81).

Réponse : h_L = 8.82 m.

Exemple 7.3 Trouvez le coefficient de frottement laminaire à Re = 1500, et la perte d'une entrée à arête vive (K = 0.5) à 2 m/s.

1. f = 64/1500.
2. h_m = 0.5 × 4/19.62.

Réponse : f = 0.0427; h_m = 0.102 m.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez D_h pour un conduit de 0.2 m × 0.1 m.

   4 × 0.02/0.6 = 0.133 m.

2. On double V en régime turbulent entièrement rugueux. h_L ?

   Environ 4 fois plus.

3. Deux conduites identiques en parallèle transportent un Q total. Débit dans chacune ?

   Q/2, avec la même perte de charge.

4. Re = 3000 est-il laminaire ou turbulent ?

   Transitoire.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le coefficient de frottement est constant.
En réalité : Il dépend de Re et de la rugosité.

Idée reçue : Les pertes singulières sont toujours mineures.
En réalité : Pas dans les conduites courtes avec beaucoup de raccords.

Idée reçue : L’écoulement laminaire a des pertes plus élevées.
En réalité : À Re comparable, son f est plus faible, mais l’écoulement laminaire n’existe qu’à basse vitesse.

Cartes mémoire

Transition

Re ≈ 2300–4000.

Darcy–Weisbach

$f(L/D)V^2/2g$.

f laminaire

64/Re.

Haaland

f explicite.

Perte singulière

Diamètre hydraulique

$KV^2/2g$. $4A/P$.

Quiz d’autocontrôle

1. Le coefficient de frottement laminaire est…

64/Re

0.316/Re^0.25

0.02

Re/64

64/Re. Poiseuille.

2. La perte de Darcy–Weisbach varie comme…

V

V^2

V^3

1/V

V^2. À f fixé.

3. Le diamètre hydraulique vaut…

4A/P

A/P

P/A

2A/P

4A/P. Définition.

4. Des conduites en parallèle ont en commun le même…

débit

la perte de charge

diamètre

la vitesse

la perte de charge. Extrémités communes.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'EPA note qu'un robinet qui goutte une fois par seconde peut gaspiller plus de 3000 gallons par an, de quoi prendre plus de 180 douches, et qu'un pommeau de douche qui fuit à raison de 10 gouttes par minute gaspille plus de 500 gallons par an. Une fuite d'arrosage de 1/32 de pouce peut gaspiller environ 6300 gallons par mois.

Chaque gallon livré doit aussi être pompé à travers des kilomètres de conduites, contre les pertes par frottement de ce module. Réparer les fuites économise à la fois l'eau et l'énergie de pompage ; 3000 gallons représentent environ 11355 L, soit 31.1 L par jour.

Sur Saving Planets : Solutions · Résistance des matériaux

Sources : U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Notes sur l'écoulement en conduite.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Cours sur les écoulements internes.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Écoulement laminaire et turbulent.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Turbulence.

☐ **J'ai terminé cette unité**

UNITÉ 8 · SEMAINE 11

Pompes, turbines et réseaux de pompage

Pompes centrifuges et axiales, hauteur manométrique, puissance et rendement, courbes caractéristiques des pompes, courbes de réseau et point de fonctionnement, pompes en série et en parallèle, lois de similitude et variateurs de vitesse, cavitation et NPSH, et turbines hydrauliques (Pelton, Francis, Kaplan).

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Lire une courbe de pompe et trouver le point de fonctionnement avec une courbe de réseau.
- Calculer la puissance et le rendement d’une pompe.
- Appliquer les lois de similitude aux changements de vitesse.
- Expliquer le NPSH et comment éviter la cavitation.

Notions clés

- Une pompe ajoute une charge h_p à l’écoulement ; la puissance hydraulique vaut ρgQh_p et la puissance sur l’arbre ρgQh_p/η.
- La courbe de la pompe (charge décroissante quand le débit augmente) croise la courbe du réseau (hauteur statique plus pertes croissant avec Q²) au point de fonctionnement.
- Lois de similitude pour la même pompe à une nouvelle vitesse N : Q ∝ N, H ∝ N², P ∝ N³. Ralentir une pompe avec un variateur de vitesse plutôt que de fermer une vanne économise beaucoup d’énergie.
- La cavitation commence quand la pression d’aspiration approche la pression de vapeur. La charge nette disponible à l’aspiration (NPSH_A) doit dépasser celle requise par la pompe (NPSH_R).
- Les turbines hydrauliques sont des pompes fonctionnant à l’envers : Pelton (à action) pour les hautes chutes, Francis pour les chutes moyennes, Kaplan (hélice) pour les basses chutes et les grands débits ; beaucoup de groupes de stockage par pompage sont des pompes-turbines réversibles.

Équations clés

$$P_{shaft} = \frac{\rho g Q h_p}{\eta}$$

```
P_shaft=(ρ gQh_p)/()
```

Puissance de pompe

$$H_{sys} = H_{static} + kQ^2$$

```
H_sys=H_static+kQ^2
```

Courbe de réseau

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1},\ \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2,\ \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

(Q_2)/(Q_1)=(N_2)/(N_1),\ (H_2)/(H_1)=((N_2)/(N_1))^2,\ (P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3

Lois de similitude

$$NPSH_A > NPSH_R$$

Pas de cavitation

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Une courbe de pompe est H = 40 − 7000Q² et la courbe de réseau H = 10 + 5000Q² (H en m, Q en m³/s). Trouvez le point de fonctionnement.

1. 40 − 7000Q² = 10 + 5000Q², donc Q² = 30/12000.
2. Q = 0.05 m³/s; H = 10 + 5000 × 0.0025.

Réponse : Q = 0.05 m³/s, H = 22.5 m.

Exemple 8.2 Trouvez la puissance sur l'arbre en ce point avec η = 0.75 (ρ = 1000 kg/m³).

1. P = 1000 × 9.81 × 0.05 × 22.5/0.75.

Réponse : P = 14.7 kW.

Exemple 8.3 Une pompe qui débite 0.05 m³/s sous 30 m de charge est ralentie de 1800 à 1500 tr/min. Trouvez le nouveau débit, la nouvelle charge et le rapport de puissance.

1. Q = 0.05 × 1500/1800.
2. H = 30 × (1500/1800)².
3. Rapport de P = (1500/1800)³.

Réponse : Q = 0.0417 m³/s, H = 20.8 m, puissance à 57.9 % de l'originale.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Deux pompes identiques en série : qu’est-ce qui s’additionne ?

   Les charges à débit égal.

2. Deux en parallèle ?

   Les débits à charge égale.

3. On réduit la vitesse de 20 %. Puissance ?

   $0.8^3 = 51.2\%$.

4. Quelle turbine convient à une chute de 500 m ?

   Pelton.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Fermer une vanne est un moyen efficace de réduire le débit.
En réalité : Cela gaspille de la charge ; ralentir la pompe est préférable.

Idée reçue : Une pompe plus grosse est toujours meilleure.
En réalité : Les pompes surdimensionnées fonctionnent loin de leur point de rendement optimal.

Idée reçue : La cavitation ne fait que du bruit.
En réalité : Elle érode les roues et réduit les performances.

Cartes mémoire

Puissance de pompe

$\rho g Q h / \eta$.

Courbe de réseau

$H_{static} + kQ^2$.

Point de fonctionnement

Les courbes se croisent.

Similitude

$Q \propto N$, $H \propto N^2$, $P \propto N^3$.

NPSH

Éviter la cavitation.

Turbines

Pelton, Francis, Kaplan.

Quiz d’autocontrôle

1. La puissance d’une pompe varie avec la vitesse comme…

N

N^2

N^3

$\sqrt{N}$

N^3. Lois de similitude.

2. Le point de fonctionnement est là où…

la courbe de la pompe croise celle du réseau

le rendement est nul

$Q = 0$

$H = 0$

la courbe de la pompe croise celle du réseau. Équilibre.

3. Pour éviter la cavitation…

$NPSH_A > NPSH_R$

$NPSH_A < NPSH_R$

augmenter la vitesse

abaisser la pression d’aspiration

$NPSH_A > NPSH_R$. Marge.

4. Une faible chute et un grand débit conviennent à une…

Pelton

Francis

Kaplan

pompe à piston

Kaplan. Turbine à hélice.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le bureau de l'efficacité industrielle du DOE indique que des économies spectaculaires d'énergie et de coûts sont possibles dans les systèmes de pompage en appliquant les meilleures pratiques de gestion de l'énergie et en achetant des équipements économes, et il propose gratuitement l'outil Pumping System Assessment Tool (PSAT) et le logiciel MEASUR pour les trouver.

Les lois de similitude montrent d'où vient une grande partie de ces économies : une pompe ralentie de 20 % par un variateur de vitesse n'a besoin que d'environ la moitié de la puissance. La page du DOE sur le stockage par pompage ajoute que les pompes-turbines remontent l'eau quand l'électricité est bon marché et produisent quand on en a besoin.

Sur Saving Planets : Solutions · Circuits

Sources : U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems) · U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Notes sur les pompes.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Cours sur les turbomachines.
- U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems): Outils gratuits du DOE pour les pompes.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Traitement plus approfondi.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Écoulement externe : couches limites, traînée et portance

Écoulement autour des corps, couches limites sur plaques planes, traînée de frottement et de pression, coefficients de traînée des sphères, cylindres et corps profilés, crise de traînée, écoulement de Stokes et sédimentation, portance, et puissance disponible dans un courant d'air ou d'eau.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la traînée à partir d'un coefficient de traînée.
- Expliquer le rôle de la traînée de frottement et de la traînée de pression.
- Utiliser la loi de Stokes pour les petites particules.
- Trouver la puissance d'un courant de vent et la limite de Betz.

Notions clés

- Traînée F_D = C_D ½ρV²A et portance F_L = C_L ½ρV²A, où A est une aire de référence. C_D dépend de la forme et de Re.
- Les corps profilés subissent surtout une traînée de frottement ; les corps non profilés (sphères, cylindres, camions) subissent surtout une traînée de pression due à un sillage décollé.
- Pour une sphère lisse, C_D ≈ 0.47 pour 10^3 < Re < 2 × 10^5 ; vers Re ≈ 3 × 10^5 la couche limite devient turbulente, décolle plus tard, et C_D chute brusquement (la crise de traînée).
- À très faible Re (Re < 1), traînée de Stokes F = 3πμVD ; une petite particule sédimente à V = (ρ_p − ρ)gD²/(18μ).
- Un courant de section A transporte une puissance ½ρAV³. Aucune turbine ne peut en capter plus de 16/27 ≈ 59.3 % (la limite de Betz).

Équations clés

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2} \rho V^2 A$$

F_D=C_D12ρ V^2A

Traînée

$$F = 3\pi \mu V D$$

F=3πμ VD

Traînée de Stokes

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18 \mu}$$

V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)

Vitesse de sédimentation

$$P = \tfrac{1}{2} \rho A V^3, \;\; C_{P,max} = \frac{16}{27}$$

P=12ρ AV^3,\ \ C_P,max=16/27

Puissance éolienne et limite de Betz

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Un ballon de 0.22 m se déplace à 20 m/s dans l'air (C_D = 0.47, valeur d'exemple). Trouvez Re et la traînée.

1. Re = 1.225 × 20 × 0.22/1.789 × 10^{-5} = 3.01 × 10^{5}.
2. F = 0.47 × ½ × 1.225 × 400 × π × 0.11^{2}.

Réponse : Re = 3.01 × 10^{5} (près de la crise de traînée) ; F = 4.38 N.

Exemple 9.2 Trouvez la vitesse de sédimentation d'un grain de sable de 50 µm (ρ_p = 2500 kg/m^{3}) dans l'eau.

1. V = (2500 − 998) × 9.81 × $(50 \times 10^{-6})^{2}$/(18 × 1.002 × 10^{-3}).
2. Vérifiez Re = 998 × 0.00204 × 50 × 10^{-6}/1.002 × 10^{-3} = 0.102.

Réponse : V = 2.04 mm/s ; Re < 1, donc la loi de Stokes s'applique.

Exemple 9.3 Trouvez la puissance du vent traversant un rotor de 100 m de diamètre à 10 m/s, et le maximum de Betz.

1. A = π × 50^{2} = 7854 m^{2}.
2. P = ½ × 1.225 × 7854 × 1000.
3. P_max = P × 16/27.

Réponse : P = 4.81 MW ; maximum de Betz 2.85 MW.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. On double la vitesse du vent. Puissance du vent ?

   8 fois plus.

2. Pourquoi les camions ont-ils des carénages ?

   Pour réduire la traînée de pression due au sillage.

3. On divise par deux le diamètre d’une particule. Vitesse de sédimentation de Stokes ?

   1/4.

4. Qu’est-ce que la crise de traînée ?

   La chute soudaine de C_D quand la couche limite devient turbulente.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La traînée est toujours proportionnelle à V^2.
En réalité : À très faible Re, elle est proportionnelle à V.

Idée reçue : Une turbine peut extraire toute la puissance du vent.
En réalité : La limite de Betz la plafonne à 59.3 %.

Idée reçue : Les surfaces rugueuses augmentent toujours la traînée.
En réalité : Sur les sphères, elles peuvent déclencher plus tôt la crise de traînée.

Cartes mémoire

Traînée

C_D $\frac{1}{2}\rho V^2 A$.

Traînée de pression

Sillage derrière les corps non profilés.

Crise de traînée

C_D chute vers Re 3×10^5.

Stokes

$F = 3\pi\mu VD$.

Puissance éolienne

Betz

$\frac{1}{2}\rho A V^3$.

59.3%.

Quiz d’autocontrôle

1. La puissance du vent varie avec V comme…

V

V^2

V^3

V^4

V^3. $\frac{1}{2}\rho A V^3$.

2. La limite de Betz vaut environ…

30%

45%

59%

100%

59%. 16/27.

3. La traînée de Stokes s’applique quand Re est…

< 1

$\approx 10^3$

$> 10^5$

quelconque

< 1. Écoulement rampant.

4. La traînée d’un corps non profilé est surtout…

le frottement

de la pression

induite

onde

de la pression. Sillage décollé.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE explique que les pales d'éolienne fonctionnent comme une aile d'avion ou un rotor d'hélicoptère : la différence de pression de part et d'autre d'une pale crée de la portance et de la traînée, et comme la portance l'emporte sur la traînée, le rotor fait tourner un générateur. Le DOE indique que les éoliennes terrestres vont de 100 kilowatts à plusieurs mégawatts.

La loi ½ρAV³ explique pourquoi les éoliennes sont de plus en plus hautes et larges : doubler le diamètre du rotor quadruple la surface, et des moyeux plus hauts atteignent des vents plus rapides, la puissance croissant comme le cube de la vitesse. La limite de Betz fixe l'objectif que poursuit tout concepteur de pales.

Sur Saving Planets : Aérodynamique I · Solutions

Sources : DOE des États-Unis : comment fonctionnent les éoliennes ? (en anglais) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html): Page gratuite de la NASA.
- NASA Glenn: Boundary layer (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html): Page gratuite de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Cours sur les écoulements externes.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Section de manuel gratuite.

☐ **J'ai terminé cette unité**

UNITÉ 10 · SEMAINES 14–15

Écoulement à surface libre : rivières, canaux et ressauts hydrauliques

Canaux à surface libre, rayon hydraulique, nombre de Froude et écoulements fluvial, critique et torrentiel, charge spécifique et hauteur critique, écoulement uniforme et formule de Manning, ressauts hydrauliques et dissipation d'énergie, et déversoirs pour la mesure des débits.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Classer un écoulement en canal avec le nombre de Froude.
- Trouver la hauteur critique et la charge spécifique.
- Utiliser la formule de Manning pour l'écoulement uniforme.
- Calculer la hauteur après un ressaut hydraulique et l'énergie qui y est perdue.

Notions clés

- Dans les canaux, la gravité entraîne l'écoulement et la surface libre est à la pression atmosphérique. Le rayon hydraulique vaut R_h = A/P (périmètre mouillé).
- Nombre de Froude Fr = V/√(gy) : Fr < 1 fluvial (lent, profond), Fr = 1 critique, Fr > 1 torrentiel (rapide, peu profond). Les ondes de surface ne peuvent remonter vers l'amont qu'en écoulement fluvial.
- Charge spécifique E = y + V²/(2g). Pour un débit par unité de largeur q, le minimum de E a lieu à la hauteur critique y_c = (q²/g)^(1/3).
- Écoulement uniforme (Manning, SI) : V = (1/n) R_h^(2/3) S^(1/2), avec la rugosité n (environ 0.013 pour du béton fini) et la pente du fond S.
- Un ressaut hydraulique rend fluvial un écoulement torrentiel : $y_2/y_1 = \tfrac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$, et dissipe la charge h_L = $(y_2 - y_1)^3/(4y_1y_2)$. Les évacuateurs de crue utilisent les ressauts pour protéger le lit des rivières sous les barrages.

Équations clés

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

Nombre de Froude

$$E = y + \frac{V^2}{2g}, \quad y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$$

E=y+(V^2)/(2g),\ \ y_c=((q^2)/(g))^1/3

Charge spécifique et hauteur critique

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

V=1n R_h^2/3S^1/2

Formule de Manning (SI)

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right)$$

(y_2)/(y_1)=12(1+8Fr_1^2-1)

Ressaut hydraulique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Un canal en béton de 2 m de large (n = 0.013) s'écoule sur 1 m de profondeur avec une pente de 0.001. Trouvez V et Q.

1. A = 2 m², P = 4 m, R_h = 0.5 m.
2. V = (1/0.013) × 0.5^(2/3) × 0.001^0.5.
3. Q = VA.

Réponse : V = 1.53 m/s; Q = 3.06 m³/s.

Exemple 10.2 L'eau s'écoule sur 0.5 m de profondeur à 6 m/s au pied d'un évacuateur. Trouvez Fr, la hauteur après un ressaut hydraulique et la charge perdue.

1. Fr = 6/√(9.81 × 0.5) = 2.71.
2. y_2 = 0.25 × (√(1 + 8 × 2.71²) − 1).
3. h_L = (y_2 − y_1)³/(4$y_1$$y_2$).

Réponse : Fr = 2.71; y_2 = 1.68 m; h_L = 0.491 m.

Exemple 10.3 Trouvez la hauteur critique pour q = 2 m²/s.

1. y_c = (4/9.81)^(1/3).

Réponse : y_c = 0.742 m.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. V = 3 m/s sous 1 m de profondeur : fluvial ou torrentiel ?

   Fr = 0.958, fluvial.

2. Trouvez E pour y = 1 m, V = 3 m/s.

   1 + 9/19.62 = 1.459 m.

3. Quelle hauteur transporterait q = 2 m²/s à V = 1.53 m/s ?

   2/1.532 = 1.31 m.

4. Pourquoi construire un bassin de dissipation sous un barrage ?

   Pour forcer un ressaut qui dissipe l’énergie.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un écoulement rapide est toujours torrentiel.
En réalité : Comparez V à √(gy).

Idée reçue : Un ressaut gagne de l’énergie.
En réalité : Il perd de l’énergie.

Idée reçue : Le n de Manning est le même partout.
En réalité : Il dépend de la surface.

Cartes mémoire

Froude

V/√(gy).

Rayon hydraulique

A/P.

Charge spécifique

y + V²/2g.

Hauteur critique

(q²/g)^(1/3).

Manning

(1/n)R^(2/3)S^(1/2).

Ressaut

$y_2/y_1 = \frac{1}{2}(\sqrt{(1 + 8Fr^2)} - 1)$.

Quiz d’autocontrôle

1. Un écoulement torrentiel est…

Fr < 1

Fr = 1

Fr > 1

Fr = 0

Fr > 1. Rapide, peu profond.

2. Le rayon hydraulique vaut…

A/P

P/A

4A/P

y

A/P. Définition.

3. La charge spécifique est minimale à…

la hauteur critique

une hauteur nulle

la hauteur normale

toute hauteur

la hauteur critique. dE/dy = 0.

4. Un ressaut hydraulique…

dissipe de l’énergie

ajoute de l’énergie

est réversible

accélère l’écoulement

dissipe de l’énergie. Mélange turbulent.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE décrit une centrale hydroélectrique de dérivation, ou au fil de l’eau, comme une installation qui détourne une partie d’une rivière par un canal et/ou une conduite forcée, en utilisant la pente naturelle du lit pour produire de l’énergie, parfois sans barrage. Concevoir ce canal est un problème d’écoulement à surface libre : la formule de Manning le dimensionne pour le débit, et la dénivellation fixe la chute.

Le DOE ajoute que les lâchers des retenues peuvent servir au passage des poissons et à la qualité de l’eau. Les ingénieurs utilisent le nombre de Froude et les ressauts hydrauliques pour concevoir des évacuateurs et des canaux qui protègent le lit des rivières et maintiennent des débits sûrs pour la faune.

Sur Saving Planets : Océans · Observation de la Terre

Sources : U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

Ressources d’apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Notes sur les canaux à surface libre.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Écoulements à surface libre.
- NOAA: Currents tutorial (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html): Tutoriel gratuit de la NOAA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Traitement plus approfondi.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Exercices

Ces exercices sont dans chaque unité. Faites-les sur papier, puis ouvrez la réponse.

1. Propriétés des fluides : masse volumique, viscosité et tension superficielle
   4 exercices
2. Statique des fluides, manomètres et poussée d’Archimède
   4 exercices
3. Bernoulli, charges et équation de l’énergie
   4 exercices
4. Quantité de mouvement intégrale : jets, aubes, coudes et turbines
   4 exercices
5. Analyse différentielle : continuité, Navier–Stokes et écoulements exacts
   4 exercices
6. Analyse dimensionnelle, similitude et essais sur maquette
   4 exercices
7. Écoulement en conduite : frottement, diagramme de Moody et pertes singulières
   4 exercices
8. Pompes, turbines et réseaux de pompage
   4 exercices
9. Écoulement externe : couches limites, traînée et portance
   4 exercices
10. Écoulement à surface libre : rivières, canaux et ressauts hydrauliques
    4 exercices

Le laboratoire (Fluid mechanics lab)

Le labo est la partie pratique du cours. Ici, il est gratuit et sert uniquement à s’entraîner, sans crédits.

Chaque TP peut se faire dans une simulation gratuite ou avec des objets de la cuisine et du jardin. Travaillez au-dessus d’un évier ou dehors, essuyez immédiatement tout liquide renversé pour éviter de glisser, utilisez uniquement de l’eau froide du robinet, et tenez l’eau éloignée des prises et appareils électriques.

Référence de sécurité : OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

TP A : Masse volumique et flottabilité par pesée

SEMAINE 3

Objectif : Trouver le volume et la masse volumique d'un objet à partir de son poids dans l'air et de son poids apparent dans l'eau, grâce au principe d'Archimède.

$$V = \frac{m_{air} - m_{water}}{\rho_w}, \quad \rho = \frac{m_{air}}{V}$$

V=_air-m_waterρ_w,\ \ ρ=_airV

Principe d'Archimède

Mode opératoire

1. Explorez PhET Buoyancy : modifiez la masse volumique de l'objet et celle du fluide et observez les forces.
2. À la maison : pesez un petit objet dense (une pierre ou une cuillère en métal) sur une balance de cuisine.
3. Suspendez-le par un fil entièrement immergé dans un pichet posé sur la balance (faites la tare d'abord), ou utilisez un peson à bagages ; notez la masse apparente.
4. Calculez le volume et la masse volumique.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Masse dans l'air	200 g
Masse apparente dans l'eau	120 g
Volume	80 cm³
Masse volumique	2500 kg/m³

Valeurs d'exemple (typiques de la pierre ou du verre).

Exemple de calcul

1. V = (200 − 120)/1.00 = 80 cm³.
2. ρ = 200/80 = 2.50 g/cm³ = 2500 kg/m³.

> **Sécurité**
>
> - Essuyez immédiatement tout liquide renversé.

Alternative à la maison ou virtuelle

- C’est un TP à la maison.

PhET : Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy) · PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density)

Lien avec la planète : La NOAA explique que les différences de masse volumique dues à la température et à la salinité entraînent la circulation thermohaline des grands fonds. NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

- [ ] **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP B : La bouteille de Torricelli

SEMAINE 4

Objectif : Vérifier la loi de Torricelli en mesurant jusqu'où va un jet d'eau sortant d'un trou dans une bouteille.

$$V = \sqrt{2gh}, \quad x = 2\sqrt{hY}$$

V=2gh,\ \ x=2

Vitesse et portée du jet depuis la hauteur Y

Mode opératoire

1. Percez un petit trou sur le côté d'une bouteille en plastique près du fond ; couvrez-le de ruban adhésif.
2. Remplissez la bouteille et posez-la sur une boîte au-dessus d'un évier ou dehors, le trou étant à Y = 0.3 m au-dessus de la surface de réception.
3. Retirez le ruban ; quand le niveau d'eau est à h = 0.2 m au-dessus du trou, marquez le point d'impact du jet.
4. Comparez avec la prédiction ; recommencez à d'autres hauteurs d'eau.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Charge h	0.20 m
Vitesse du jet	1.98 m/s
Hauteur de chute Y	0.30 m
Portée prédite	0.49 m

Valeurs prédites ; les jets réels tombent un peu plus court à cause des pertes au trou.

Exemple de calcul

1. V = √(2 × 9.81 × 0.2) = 1.98 m/s.
2. x = 2√(0.2 × 0.3) = 0.49 m.

> **Sécurité**
>
> - Faites-le au-dessus d'un évier ou dehors ; essuyez l'eau pour éviter de glisser.
> - Utilisez une brochette avec précaution, pointe éloignée de votre main.

Alternative à la maison ou virtuelle

- C’est un TP à la maison.

PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow) · PhET : Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure)

Lien avec la planète : Le DOE note que la production hydroélectrique croît avec la chute ; la vitesse du jet de la bouteille croît comme √h pour la même raison. U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

☐ **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP C : Mesurer le débit et le nombre de Reynolds

SEMAINE 7

Objectif : Mesurer le débit d'un robinet ou d'un tuyau avec un seau et un chronomètre, et déterminer si l'écoulement à l'intérieur est laminaire ou turbulent.

$$Q = \frac{V_{bucket}}{t}, \quad Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Q=_buckett,\ \ Re=(ρ VD)/(μ)

Débit et nombre de Reynolds

Mode opératoire

1. Chronométrez le temps qu'il faut à un tuyau ou un robinet pour remplir 10 L.
2. Mesurez le diamètre intérieur du tuyau ou de la sortie du robinet.
3. Calculez Q, la vitesse moyenne et Re.
4. Baissez le robinet jusqu'à ce que le filet paraisse lisse et vitreux, et recommencez.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
10 L en	25 s
Q	0.4 L/s
Diamètre intérieur du tuyau	16 mm
V	1.99 m/s
Re	31,700

Valeurs d'exemple ; un Re bien supérieur à 4000 signifie un écoulement turbulent dans le tuyau.

Exemple de calcul

1. V = 0.0004/(π × 0.008²) = 1.99 m/s.
2. Re = 998 × 1.99 × 0.016/1.002 × 10^{-3} = 31,700.

> **Sécurité**
>
> - Fermez le robinet à la fin ; attention au sol glissant.

Alternative à la maison ou virtuelle

- C'est un TP à la maison.

PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow)

Lien avec la planète : L'EPA suggère de vérifier votre compteur d'eau sur deux heures sans aucune utilisation d'eau ; tout changement signale une fuite. U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP D : Tableur de frottement en conduite

SEMAINE 10

Objectif : Construire un tableur du nombre de Reynolds, du coefficient de frottement et de la perte de charge en fonction de la vitesse, et voir comment les pertes augmentent.

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

`h_L=fL/D(V^2)/(2g)`

Darcy–Weisbach

Mode opératoire

1. Prenez D = 50 mm, L = 100 m, ε = 0.045 mm, eau à 20 °C.
2. Calculez Re et le f de Haaland pour V de 0.5 à 3 m/s.
3. Calculez h_L et tracez-le en fonction de V.
4. Ajustez h_L ∝ V^n et trouvez n.

Tableau de données

V (m/s)	Re	f	h_L (m)
1	49,800	0.0235	2.39
2	99,600	0.0216	8.82
3	149,400	0.0209	19.2

Valeurs calculées ; n est un peu inférieur à 2 car f diminue lentement quand Re augmente.

Exemple de calcul

1. h_L(2 m/s) = 0.0216 × 2000 × 4/19.62 = 8.82 m.
2. Tripler V multiplie h_L par 19.2/2.39 = 8.0.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/)

Lien avec la planète : Le DOE affirme que les bonnes pratiques dans les systèmes de pompage économisent énormément d'énergie ; moins de pertes signifie des pompes plus petites. U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP E : Sédimentation du sable dans l’eau

SEMAINE 13

Objectif : Observer du sable fin et du sable grossier se déposer dans un grand verre d’eau et comparer avec la loi de Stokes.

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18 \mu}$$

`V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)`

Sédimentation de Stokes

Mode opératoire

1. Remplissez d’eau un grand verre ou une bouteille transparente.
2. Laissez tomber une pincée de sable fin et chronométrez la chute des grains sur 0.2 m.
3. Recommencez avec du sable plus grossier.
4. Comparez les vitesses avec la loi de Stokes et notez quand elle cesse de s’appliquer.

Tableau de données

Diamètre des grains	Vitesse de Stokes	Re
50 µm	2.04 mm/s	0.102
100 µm	8.17 mm/s	0.81

Calculé pour des grains de type quartz (ρ = 2500 kg/m³) ; les grains plus grossiers, avec Re supérieur à environ 1, tombent plus lentement que ne le prévoit Stokes.

Exemple de calcul

1. V(50 µm) = 1502 × 9.81 × 2.5 × 10⁻⁹/(18 × 1.002 × 10⁻³) = 2.04 mm/s.
2. Doubler D multiplie la vitesse par 4.

> **Sécurité**
>
> - Utilisez du sable de jeu propre ; lavez-vous les mains ensuite.

Alternative à la maison ou virtuelle

- C’est un TP à la maison.

NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html)

Lien avec la planète : Le DOE note que les lâchers des retenues servent la qualité de l'eau ; la sédimentation détermine comment les réservoirs se comblent et comment les rivières charrient le limon. U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

☐ **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP F : Système de pompage et vitesse variable

SEMAINE 11

Objectif : Trouver le point de fonctionnement d'une pompe et utiliser les lois de similitude pour comparer le vannage et le ralentissement de la pompe.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

```
(P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3
```

Loi de similitude pour la puissance

Mode opératoire

1. Saisissez la courbe de pompe H = 40 − 7000Q² et la courbe de réseau H = 10 + 5000Q².
2. Trouvez le point de fonctionnement et la puissance sur l'arbre.
3. Appliquez les lois de similitude à 1500 et 1200 tr/min au point à 1800 tr/min (0.05 m³/s, 30 m).
4. Comparez les puissances nécessaires.

Tableau de données

N (tr/min)	Q (m³/s)	H (m)	Rapport de puissance
1800	0.050	30.0	1.000
1500	0.0417	20.8	0.579
1200	0.0333	13.3	0.296

Similitude idéale ; la hauteur statique du réseau limite jusqu'où une vraie pompe peut être ralentie.

Exemple de calcul

1. Q(1200) = 0.05 × 2/3 = 0.0333 m³/s.
2. Rapport de puissance = (2/3)³ = 0.296.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

Lien avec la planète : Les outils gratuits PSAT et MEASUR du DOE aident les usines à trouver précisément ces économies sur les pompes. U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

Séries d'entraînement aux examens

Chronométrez-vous : environ 10 minutes par problème. Comparez ensuite avec les solutions complètes.

Série d'exercices de mi-parcours (unités 1–5)

1. Trouvez la contrainte de cisaillement dans l'eau entre deux plaques distantes de 0.5 mm quand l'une se déplace à 1 m/s.
    1. $\tau = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.0005$.

    Réponse : 2.00 Pa.
2. Trouvez la pression relative à 25 m de profondeur dans l'eau de mer (1025 kg/m³).
    1. $1025 \times 9.81 \times 25$.

    Réponse : 251.4 kPa.
3. Trouvez la puissance d'une centrale hydroélectrique avec Q = 20 m³/s, H = 40 m, $\eta = 0.88$ ($\rho = 1000$).
    1. $0.88 \times 1000 \times 9.81 \times 20 \times 40$.

    Réponse : 6.91 MW.
4. Un jet d'eau de 0.01 m³/s à 25 m/s est dévié de 180° par une aube fixe. Force ?
    1. $2\rho QV = 2 \times 1000 \times 0.01 \times 25$.

    Réponse : 500 N.
5. Trouvez le Q laminaire dans un tube de rayon 2 mm, $\Delta p/L = 200$ Pa/m, eau.
    1. $\pi \times 0.002^4 \times 200/(8 \times 1.002 \times 10^{-3})$.

    Réponse : 1.25×10^{-6} m³/s.

Série d'entraînement finale (toutes les unités)

1. Une maquette de navire au 1:25 est à similitude de Froude. Vitesse réelle 10 m/s. Vitesse de la maquette ?

1. 10/5.

Réponse : 2 m/s.

2. Trouvez h_L dans 200 m de conduite de 0.1 m avec f = 0.02 à 1.5 m/s.

    1. 0.02 × 2000 × 2.25/19.62.

Réponse : 4.59 m.

3. Une pompe à 1200 tr/min donne 25 m de charge. Charge à 1500 tr/min ?

    1. 25 × (1.25)².

Réponse : 39.1 m.

4. Trouvez la puissance du vent traversant un rotor de 80 m à 8 m/s (ρ = 1.225).

    1. ½ × 1.225 × π × 40² × 512.

Réponse : 1.58 MW.

5. Trouvez Fr pour un écoulement à 4 m/s sur 0.4 m de profondeur.

    1. 4/√(9.81 × 0.4).

Réponse : 2.02, torrentiel.

6. Trouvez y_c pour q = 3 m²/s.

    1. (9/9.81)^(1/3).

Réponse : 0.972 m.

Fiche de formules

$$\tau = \mu\, du/dy,\ \nu = \mu/\rho$$

$$p = p_0 + \rho g h,\ F = \rho g h_c A,\ F_B = \rho g V$$

$$Q = AV,\ p/\rho g + V^2/2g + z = \text{const}$$

$$P = \eta \rho g Q H,\ V = \sqrt{2gh}$$

$$\sum F = \sum \dot{m} V_{out} - \sum \dot{m} V_{in},\ F = \rho Q V(1 - \cos$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0,\ Q = \pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$$

$$Re = \rho V L/\mu,\ Fr = V/\sqrt{gL}$$

$$h_L = f(L/D)V^2/2g,\ f_{lam} = 64/Re$$

$$h_m = KV^2/2g,\ D_h = 4A/P$$

$$P = \rho g Q h/\eta,\ Q \propto N,\ H \propto N^2,\ P \propto N^3$$

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A,\ P_{wind} = \tfrac{1}{2}\rho A V^3$$

$$V = (1/n) R_h^{2/3} S^{1/2},\ y_c = (q^2/g)^{1/3}$$

$$y_2/y_1 = \tfrac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

Constantes

Constante	Valeur
Eau à 20 °C (valeurs de manuel)	ρ = 998 kg/m³, μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s), ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s, tension superficielle σ = 0.0728 N/m
Air à 15 °C (valeurs de manuel)	ρ = 1.225 kg/m³, μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)
Eau de mer et glace (valeurs de manuel)	ρ_sea = 1025 kg/m³, ρ_ice = 917 kg/m³
Mercure (valeur de manuel)	ρ = 13,600 kg/m³
La gravité	g = 9.81 m/s²
1 gallon américain	3.785 L

Source : NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

Textes et simulations gratuits

Utilisez ces cours, sections de manuels et simulations gratuits en parallèle du cours.

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Notes de cours et séries d'exercices gratuites du MIT.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Cours gratuit de mécanique des fluides en génie civil du MIT.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Traitement plus approfondi du MIT.
- OpenStax University Physics Volume 1, Chapter 14: Fluid mechanics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): Chapitre de manuel gratuit.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): Pression et écoulement de façon interactive.
- PhET : Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): La poussée d'Archimède en interactif.

Glossaire

Couche limite
Couche mince près d'une paroi où la viscosité compte.

Flottabilité
Force ascendante égale au poids du fluide déplacé.

Cavitation
Bulles de vapeur qui se forment là où la pression tombe à la pression de vapeur.

Continuité
Conservation de la masse dans un écoulement.

Coefficient de traînée
Traînée divisée par $\frac{1}{2}\rho V^2 A$.

Nombre de Froude
$V/\sqrt{(gL)}$, inertie sur gravité.

Charge
Énergie par unité de poids de fluide, en mètres.

Perte de charge
Énergie mécanique perdue par frottement, par unité de poids.

Ressaut hydraulique
Passage brusque d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial.

Rayon hydraulique
Aire d'écoulement divisée par le périmètre mouillé.

Écoulement laminaire
Écoulement régulier, en couches, à faible nombre de Reynolds.

Manomètre
Tube de liquide servant à mesurer des différences de pression.

Équations de Navier–Stokes
Équations de quantité de mouvement d'un fluide visqueux.

Point de fonctionnement
Là où la courbe de la pompe croise la courbe du réseau.

Nombre de Reynolds
$\rho VL/\mu$, inertie sur forces visqueuses.

Densité
Masse volumique rapportée à celle de l'eau.

Écoulement de Stokes
Écoulement rampant à Re très inférieur à 1.

Tension superficielle
Force par unité de longueur le long d'une surface liquide.

Écoulement turbulent
Écoulement chaotique et mélangeant à grand nombre de Reynolds.

Viscosité
Résistance d’un fluide au cisaillement.

Grille d’autoévaluation

Aucune note ni aucun crédit ne sont attribués. Utilisez cette grille pour juger honnêtement où vous en êtes dans chaque unité.

Niveau	À quoi cela ressemble
4 · Maîtrise	Trace des volumes de contrôle, choisit la bonne loi (hydrostatique, Bernoulli, énergie, quantité de mouvement, Navier–Stokes), vérifie Re et Fr, garde des unités cohérentes et mène les TP en sécurité.
3 · Compétent	Résout les exercices avec quelques erreurs occasionnelles d’unité ou de signe.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais applique Bernoulli à travers les pompes ou ignore les pertes.
1 · Débutant	Injecte des nombres dans les formules sans schéma ; doit revoir le module.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	20%
Travaux pratiques	25%
Série d’entraînement de mi-parcours	25%
Série d’entraînement finale	30%

Visez le niveau 3 ou mieux dans chaque unité avant de passer au cours suivant.

Cours associés

- Thermodynamique ENGR 320
- Performances des avions AERO 320
- Aérodynamique I AERO 310
- Tous les cours