Dernière mise à jour: November 1, 2026

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 10 unités et 4 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 les cours d'introduction de première année en ingénierie aérospatiale comme MIT 16.00 et le début de l'Unified Engineering du MIT, les cours d'introduction à l'aéronautique et à l'astronautique de Purdue, Georgia Tech et Embry-Riddle, et le manuel classique Introduction to Flight de John D. Anderson Jr. Nous renvoyons partout à des ressources gratuites, en particulier le Beginner's Guide to Aeronautics de NASA Glenn. Aucune de ces organisations ne cautionne cette page.
>
> Notre apport : chaque unité est reliée à un vol plus propre et aux engins spatiaux qui observent notre planète, chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et quatre TP, dont une soufflerie virtuelle et un planeur que vous construisez, rendent les équations concrètes.
>
> 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'ingénierie aérospatiale construit les satellites qui mesurent le climat, les forêts, les glaces et les océans de la Terre, et elle doit aussi réduire sa propre empreinte : chaque kilogramme de kérosène brûlé produit environ 3.16 kg de CO_2.

Chaque unité se termine par une courte section sourcée montrant comment ses idées aident les gens et la planète.

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 4 travaux pratiques (AERO 101).
- 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

- Algèbre et trigonométrie du lycée ; logarithmes et exponentielles.
- La mécanique de Physique I (forces, énergie, quantité de mouvement, mouvement circulaire) aide ; suivez-la en parallèle si possible.
- L'Analyse I est utile pour quelques démonstrations mais pas nécessaire pour les calculs numériques.

Comment étudier

- Gardez les unités en SI partout et écrivez-les à chaque ligne.
- Esquissez les forces (portance, poids, poussée, traînée) avant d'écrire toute équation.
- Estimez d'abord ; les grandeurs aérospatiales ont des ordres familiers (air au niveau de la mer ≈ 1.2 kg/m³, orbite basse ≈ 7.7 km/s).
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse.
- Utilisez les simulateurs de NASA Glenn pour vérifier votre intuition.
- Refaites les quiz quelques jours plus tard. La pratique espacée vaut mieux qu'une longue séance.

Ce qu'il vous faut

- Un ordinateur avec un navigateur web et un tableur (FoilSim fonctionne dans le navigateur).

- Pour le TP planeur : du carton fin ou du carton mousse, une règle, des ciseaux, de la pâte à modeler ou des pièces pour lester le nez, et un mètre ruban.
- Facultatif : le chronomètre d'un smartphone.

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	Histoire du vol et processus de conception	Histoire du vol ; processus de conception ; les quatre forces	MIT 16.00 ; Smithsonian
2	L'atmosphère	Atmosphère standard ; vitesse du son	NASA Glenn : atmosphère
3	Aérodynamique de base : portance et traînée	Équations de portance et de traînée ; Bernoulli	NASA Glenn : portance et traînée
4	Aérodynamique de base : portance et traînée	Nombre de Reynolds et vitesse de décrochage ; TP D	FAA PHAK
5	Profils aérodynamiques et ailes	Profils, courbe de portance, ailes finies ; TP A	NASA FoilSim
6	Performances des avions	Vol plané, puissance nécessaire, montée	NASA Glenn : angle de plané
7	Performances des avions	Distance franchissable et endurance ; entraînement au partiel	FAA PHAK
8	Stabilité et contrôle	Stabilité et contrôle ; TP C	NASA Glenn : rotations
9	Bases de la propulsion	Propulsion : réacteurs, soufflantes et hélices	NASA Glenn : propulsion
10	Fusées et équation de la fusée	Poussée des fusées et équation de la fusée	NASA Glenn : fusées
11	Fusées et équation de la fusée	Étagement et lanceurs ; TP B	NASA Glenn : fusées
12	Orbites et missions spatiales	Orbites, lois de Kepler, orbite géostationnaire	JPL Basics of Space Flight
13	Orbites et missions spatiales	Transferts de Hohmann et conception de missions	JPL Basics of Space Flight

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
14	Aviation et espace durables	Aviation et espace durables	NASA; EPA; DOE
15	Révision	Révision et série d’exercices finale	Toutes les unités

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

Histoire du vol et processus de conception

Des frères Wright à Artemis : comment les ingénieurs aérospatiaux transforment une mission en exigences, en compromis et en un engin qui vole.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Retracer les grandes étapes de l’aviation et du vol spatial.
- Décrire le cycle de conception : exigences, concept, conception préliminaire et détaillée, essais.
- Expliquer les études de compromis et pourquoi la masse conditionne tout.
- Nommer les quatre forces du vol.

Notions clés

- Le 17 décembre 1903, le Wright Flyer a effectué un vol de 12 secondes sur 36 m (120 ft) ; le meilleur vol de la journée a couvert 260 m (852 ft) en 59 secondes. Les Wright ont réussi en testant : ils ont construit des planeurs et leur propre soufflerie avant d’ajouter un moteur.
- Toute conception commence par une mission : charge utile, distance ou orbite, coût, sécurité. Les exigences traduisent la mission en nombres que la conception doit respecter.
- La conception est itérative : croquis du concept, dimensionnement, analyse, essai, nouvelle conception. Une étude de compromis compare les options selon des critères pondérés.
- Quatre forces agissent sur un avion : la portance, le poids, la poussée et la traînée. En vol stabilisé en palier, portance = poids et poussée = traînée.
- La masse s’accumule : une structure supplémentaire exige plus de portance, une aile plus grande, plus de traînée, plus de carburant, et encore plus de masse.

Équations clés

$$L = W, \quad T = D$$

`L=W, T=D`

Vol stabilisé en palier, non accéléré

$$W = mg$$

`W=mg`

Poids

$$\text{Score} = \sum_i w_i \, s_i$$

`Score=_i w_i s_i`

Score pondéré d’une étude de compromis

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Un avion léger de 1100 kg vole en croisière en palier. Quelle portance son aile doit-elle produire ?

1. Vol en palier : L = W = mg.
2. L = 1,100 × 9.81.

Réponse : 10,791 N ≈ 10.8 kN.

Exemple 1.2 Deux concepts d’aile sont notés sur 10 pour le coût (poids 0.3), l’efficacité (0.5) et la facilité de construction (0.2). Le concept A obtient 8, 6, 9 ; B obtient 5, 9, 6. Lequel l’emporte ?

1. A: 0.3(8) + 0.5(6) + 0.2(9) = 7.2.
2. B: 0.3(5) + 0.5(9) + 0.2(6) = 7.2.

Réponse : Égalité à 7.2 : l’équipe devrait tester les deux ou revoir les pondérations dont elle est le moins sûre.

Exemple 1.3 Le premier vol du Wright Flyer a couvert 36 m en 12 s. Quelle était sa vitesse sol moyenne ?

1. v = 36/12.

Réponse : 3 m/s par rapport au sol. Il volait face à un fort vent de face, donc sa vitesse air était bien plus élevée.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un avion de ligne de masse 70000 kg vole en croisière en palier. Trouvez sa portance.

   L = 70,000 × 9.81 = 686,700 N ≈ 687 kN.

2. En croisière en palier, les moteurs d’un avion fournissent 30 kN de poussée. Quelle est sa traînée ?

   30 kN, car la poussée équilibre la traînée en vol stabilisé.

3. Pourquoi les frères Wright ont-ils construit une soufflerie ?

   Les données de portance publiées n'étaient pas fiables, alors ils ont mesuré eux-mêmes de nombreuses formes d'aile : tester avant de construire est le cœur du processus de conception.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les ingénieurs conçoivent d'abord l'avion, puis lui trouvent une mission.

En réalité : La mission et ses exigences viennent en premier.

Idée reçue : En vol en palier, la poussée doit équilibrer le poids.

En réalité : La poussée équilibre la traînée ; la portance équilibre le poids.

Idée reçue : Gagner un peu de masse n'économise que cette masse.

En réalité : Les gains de masse se cumulent via la taille de l'aile, la traînée et le carburant.

Cartes mémoire

Quatre forces

Portance, poids, poussée, traînée.

Exigences

Objectifs mesurables qu'une conception doit atteindre.

Étude de compromis

Comparaison pondérée des options de conception.

Cycle de conception

Concept → préliminaire → conception détaillée → essai → itération.

Wright Flyer

Premiers vols motorisés et contrôlés d'un avion, 17 déc. 1903.

Spirale de la masse

Une masse supplémentaire fait grossir toute la conception.

Quiz d'autocontrôle

1. En vol stabilisé en palier, la portance est égale...

à la poussée

à la traînée

au poids

zéro

au poids. Les forces verticales s’équilibrent.

2. Le Wright Flyer a volé pour la première fois le…

1899

1903

1911

1927

1903. 17 décembre 1903, à Kitty Hawk.

3. Une étude de compromis…

choisit la pièce la moins chère

compare des options selon des critères pondérés

teste un prototype jusqu’à la rupture

se fait après les essais en vol

compare des options selon des critères pondérés. Elle classe les options de façon systématique.

4. La première étape du processus de conception est…

les plans détaillés

la mission et les exigences

l’essai en vol

le choix d’un moteur

la mission et les exigences. Les exigences déterminent tout ce qui suit.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les priorités de conception évoluent avec l'époque. Les exigences pour les nouveaux avions incluent désormais la consommation de carburant et les émissions, de sorte que les mêmes outils d'étude de compromis pèsent le climat au même titre que le coût et les performances.

La NASA cite trois grandes voies pour rendre l'aviation durable : une technologie aéronautique efficace, les carburants d'aviation durables, et de meilleures opérations et infrastructures.

Sur Saving Planets : Artemis II

Sources : Smithsonian : le Wright Flyer de 1903 (https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000) · NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- Smithsonian : le Wright Flyer de 1903 (https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000): L'histoire et les caractéristiques du Wright Flyer.
- MIT OpenCourseWare 16.00: Introduction to Aerospace Engineering and Design (https://ocw.mit.edu/courses/16-00-introduction-to-aerospace-engineering-and-design-spring-2003/): Le cours d'introduction du MIT centré sur la conception.
- NASA Glenn: Beginner's Guide to Aeronautics (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/): Commencez ici pour chaque thème.

☐ **J'ai terminé cette unité**

L’atmosphère

L’air dans lequel vole un avion : comment la température, la pression, la masse volumique et la vitesse du son varient avec l’altitude.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser un modèle d’atmosphère standard pour trouver T, p et ρ en altitude.
- Appliquer la loi des gaz parfaits à l’air.
- Calculer la vitesse du son et le nombre de Mach.
- Expliquer pourquoi les avions de ligne volent en croisière vers 11 km.

Notions clés

- Une atmosphère standard est un modèle moyen ajusté à des mesures. Dans le modèle de la NASA, la troposphère va du sol à 11000 m, et la température baisse d’environ 6.5 °C par kilomètre.
- De 11 à 25 km (basse stratosphère), la température du modèle est constante à −56.46 °C, tandis que la pression continue de baisser exponentiellement.
- La masse volumique découle de la loi des gaz parfaits, ρ = p/(RT). À 11 km, l’air a environ 30% de la masse volumique au niveau de la mer.
- La vitesse du son vaut a = √(γRT), elle ne dépend donc que de la température. Nombre de Mach M = V/a.
- Un air raréfié signifie moins de traînée à vitesse donnée, c’est pourquoi les avions à réaction volent haut, mais les ailes et les moteurs ont toujours besoin d’assez d’air pour fonctionner.

Équations clés

$$T = 15.04 - 0.00649\,h \;\; (^\circ\mathrm{C},\; h \text{ in m})$$

```
T=15.04-0.00649 h\ \ (^,\ h in m)
```

Ajustement NASA de la température dans la troposphère

$$p = 101.29 \left(\frac{T + 273.1}{288.08} \right)^{5.256} \;\; \mathrm{kPa}$$

```
p=101.29((T+273.1)/(288.08))^5.256 kPa
```

Ajustement NASA de la pression dans la troposphère

$$\rho = \frac{p}{0.2869\,(T + 273.1)}$$

ρ=(p)/(0.2869 (T+273.1))

Masse volumique (p en kPa, ρ en kg/m³)

$$a = \sqrt{\gamma RT}, \quad M = \frac{V}{a}$$

a=γ RT, M= Va

Vitesse du son et nombre de Mach

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Trouvez T, p et ρ à 5000 m avec le modèle de la NASA.

1. T = 15.04 − 0.00649 × 5,000 = −17.41 °C.
2. p = 101.29 × (255.69/288.08)^5.256 = 54.11 kPa.
3. ρ = 54.11/(0.2869 × 255.69).

Réponse : T ≈ −17.4 °C, p ≈ 54.1 kPa, ρ ≈ 0.738 kg/m³ (60% du niveau de la mer).

Exemple 2.2 Trouvez la vitesse du son au niveau de la mer (15 °C) et à 11 km (−56.5 °C).

1. a = √(1.4 × 287 × 288.15) = 340.3 m/s.
2. a = √(1.4 × 287 × 216.65) = 295.0 m/s.

Réponse : 340 m/s et 295 m/s.

Exemple 2.3 Un avion de ligne vole à 230 m/s de vitesse vraie à 11 km. Quel est son nombre de Mach ?

1. M = 230/295.0.

Réponse : M ≈ 0.78.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la masse volumique de l’air à 11000 m avec le modèle de la NASA (T = −56.46 °C, p = 22.72 kPa).

   ρ = 22.72/(0.2869 × 216.64) ≈ 0.366 kg/m³, environ 30% du niveau de la mer.

2. Trouvez la température à 1500 m dans le modèle de la NASA.

   $T = 15.04 - 9.74 = 5.3\ °C$.

3. Combien vaut Mach 2 au niveau de la mer en m/s ?

   $2 \times 340 = 680$ m/s.

4. Trouvez la masse volumique au niveau de la mer à partir de $p = 101.40$ kPa et $T = 15.04\ °C$.

   $\rho = 101.40/(0.2869 \times 288.14) \approx 1.227\ kg/m^3$.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La vitesse du son dépend de la pression.

En réalité : Pour un gaz parfait, elle ne dépend que de la température.

Idée reçue : Il fait de plus en plus froid tout le long de la montée.

En réalité : La température se stabilise au-dessus de 11 km et remonte plus haut dans la stratosphère.

Idée reçue : Un air plus raréfié aide toujours.

En réalité : Il réduit la traînée mais aussi la portance et la poussée des moteurs, donc les ailes doivent voler plus vite ou à des coefficients de portance plus élevés.

Cartes mémoire

Atmosphère standard

Modèle moyen de T, p, ρ en fonction de l'altitude.

Troposphère

Du sol à ~11 km ; la température baisse avec l'altitude.

Gradient thermique

≈ 6.5 °C par km dans la troposphère.

Loi des gaz parfaits

$p = \rho RT$.

Vitesse du son

$a = \sqrt{(\gamma RT)}$.

Nombre de Mach

$M = V/a$.

Quiz d'autocontrôle

1. Dans la troposphère, la température baisse d'environ…

1 °C/km

6.5 °C/km

15 °C/km

0 °C/km

6.5 °C/km. Le gradient de la NASA est de 0.00649 °C/m.

2. La vitesse du son au niveau de la mer est d'environ…

100 m/s

340 m/s

1,000 m/s

3,000 m/s

340 m/s. √(1.4 × 287 × 288).

3. La masse volumique à 11 km représente environ quelle fraction de celle au niveau de la mer ?

90%

60%

30%

5%

30%. 0.366/1.227.

4. Le nombre de Mach est…

V × a

V/a

a/V

V^2/a

V/a. La vitesse divisée par la vitesse locale du son.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les avions volent là où se produisent la météo et le climat. La NASA étudie les émissions des avions par la modélisation informatique, des essais de combustion en laboratoire et des essais en vol, car ce que les moteurs rejettent en altitude compte pour l'atmosphère.

La même physique de l'atmosphère permet aux satellites de transformer le rayonnement qu'ils mesurent en profils de température de l'air.

Sur Saving Planets : Traînée atmosphérique

Sources : NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/) · NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/): Le modèle et les équations utilisés dans cette unité.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Chapitres gratuits du manuel de la FAA sur l'atmosphère et l'aérodynamique.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Aérodynamique de base : portance et traînée

D’où viennent la portance et la traînée, et les deux équations qui dimensionnent toute aile : L = ½ρV²SC_L et D = ½ρV²SC_D.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Expliquer la portance comme le résultat de la déviation d’un écoulement, avec des différences de pression décrites par l’équation de Bernoulli.
- Utiliser les équations de portance et de traînée.
- Calculer la pression dynamique, la vitesse de décrochage et le nombre de Reynolds.
- Distinguer traînée de frottement, traînée de pression et traînée induite.

Notions clés

- Une aile dévie l’écoulement vers le bas ; d’après la troisième loi de Newton, l’air pousse l’aile vers le haut. De manière équivalente, un écoulement plus rapide sur l’extrados signifie une pression plus basse à cet endroit (Bernoulli). Les deux décrivent un même écoulement.
- La pression dynamique q = ½ρV² fixe l’échelle de toute force aérodynamique. Les coefficients de portance et de traînée C_L et C_D traduisent la forme et l’angle d’attaque.
- La portance croît avec V², donc diviser la vitesse par deux exige quatre fois plus de coefficient de portance ou de surface alaire.
- La traînée provient du frottement, de la traînée de pression (de forme) et de la traînée induite, le prix à payer pour produire de la portance avec une aile finie.
- Le nombre de Reynolds Re = ρVc/μ compare les effets d’inertie et de viscosité ; les maquettes en soufflerie doivent en tenir compte pour prédire le comportement en vraie grandeur.

Équations clés

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L$$

L=12ρ V^2SC_L

Équation de portance

$$D = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

D=12ρ V^2SC_D

Équation de traînée

$$p + \tfrac{1}{2}\rho V^2 = \text{const}$$

p+12ρ V^2=const

Équation de Bernoulli (le long d'une ligne de courant)

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

Re=(ρ Vc)/(μ)

Nombre de Reynolds

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Un avion de 1100 kg avec une aile de 16.2 m² vole en palier à 55 m/s au niveau de la mer (ρ = 1.227 kg/m³). Trouvez C_L.

1. L = W = 10,791 N.
2. q = ½ × 1.227 × 55² = 1,855 Pa.
3. C_L = 10,791/(1,855 × 16.2).

Réponse : C_L ≈ 0.36.

Exemple 3.2 Avec C_L,max = 1.6, trouvez la vitesse de décrochage de cet avion au niveau de la mer.

1. V_s = √(2W/(ρSC_L,max)).
2. = √(2 × 10,791/(1.227 × 16.2 × 1.6)).

Réponse : V_s ≈ 26.1 m/s (environ 51 nœuds).

Exemple 3.3 Trouvez le nombre de Reynolds d'une corde de 1.5 m à 55 m/s au niveau de la mer (μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)).

1. Re = 1.227 × 55 × 1.5/(1.789 × 10⁻⁵).

Réponse : Re ≈ 5.7 millions.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Si la vitesse double au même C_L, comment la portance change-t-elle ?

Portance ∝ V^2, donc elle quadruple.

2. Trouvez la pression dynamique à 230 m/s à 11 km (ρ = 0.366 kg/m^3).

   $q = ½ \times 0.366 \times 230^2 \approx 9{,}680$ Pa.

3. Trouvez la traînée de l'avion de l'exemple 3.1 si $C_D = 0.032$.

   $D = 1{,}855 \times 16.2 \times 0.032 \approx 962$ N.

4. De combien la vitesse de décrochage est-elle plus élevée à 1500 m (ρ = 1.060 kg/m^3) qu'au niveau de la mer ?

   $V_s \propto 1/\sqrt{\rho}$: √(1.227/1.060) = 1.076, donc environ 7.6% plus élevée (≈ 28.0 m/s de vitesse vraie).

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L'air passant sur l'extrados doit rejoindre l'air passant sous l'intrados au bord de fuite (temps de transit égal).

En réalité : C'est faux ; l'écoulement supérieur arrive en fait le premier. NASA Glenn classe le transit égal parmi les théories incorrectes de la portance.

Idée reçue : La portance, c'est seulement Bernoulli, ou seulement Newton.

En réalité : Les deux décrivent le même écoulement ; différences de pression et déviation de l'écoulement vont ensemble.

Idée reçue : La traînée n'est que du frottement de l'air.

En réalité : La traînée de pression et la traînée induite sont souvent plus grandes.

Cartes mémoire

Pression dynamique

$q = ½\rho V^2$.

Équation de portance

$L = qSC_L$.

Équation de traînée

$D = qSC_D$.

Vitesse de décrochage

$V_s = \sqrt{(2W/(\rho SC_{L,max}))}$.

Nombre de Reynolds

$\rho Vc/\mu$.

Traînée induite

Traînée due à la portance sur une aile finie.

Quiz d’autocontrôle

1. La portance est proportionnelle à…

- V
- V^2
- $\sqrt{V}$
- $1/V$

V^2. Via la pression dynamique $\frac{1}{2}\rho V^2$.

2. Doubler la surface alaire à même vitesse et même C_L…

- divise la portance par deux
- double la portance
- quadruple la portance
- n’a aucun effet

double la portance. $L \propto S$.

3. Le nombre de Reynolds compare…

- la portance et la traînée
- les effets d’inertie et de viscosité
- la vitesse et la vitesse du son
- la poussée et le poids

les effets d’inertie et de viscosité. $\rho V c/\mu$.

4. La traînée induite est causée par…

- la rugosité de la peinture
- la production de portance avec une aile finie

l’échappement des moteurs

uniquement les ondes de choc

la production de portance avec une aile finie. Les tourbillons marginaux inclinent la portance vers l’arrière.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La traînée, c’est du carburant. En croisière, la poussée des moteurs égale la traînée, donc chaque newton de traînée supprimé est du carburant non brûlé et du CO_2 non émis. Avoir besoin de moins d’énergie pour voler est la première des trois voies de la NASA vers une aviation durable.

La même physique de la portance anime les pales d’éoliennes, qui transforment la force aérodynamique du vent en électricité propre.

Sur Saving Planets : Physique I

Sources : NASA Glenn : l’équation de traînée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/) · NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Ressources d’apprentissage gratuites

- NASA Glenn : l’équation de portance (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/lift-equation/): Équation et coefficients de portance.
- NASA Glenn : l’équation de traînée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/): Équation de traînée.
- NASA Glenn : l’équation de Bernoulli (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoullis-equation/): Pression et vitesse.
- NASA Glenn : Bernoulli et Newton (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoulli-and-newton/): Pourquoi l’explication du transit égal est fausse.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Profils aérodynamiques et ailes

Géométrie des profils, courbe de portance, décrochage, et pourquoi des ailes longues et fines produisent moins de traînée.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Nommer la géométrie d'un profil : corde, cambrure, épaisseur, angle d'attaque.
- Utiliser la théorie des profils minces : c_l ≈ 2πα.
- Corriger la pente de portance pour une aile finie d'allongement AR.
- Utiliser la polaire de traînée C_D = C_D0 + C_L²/(πeAR) pour trouver la meilleure finesse.

Notions clés

- Un profil est la section d'une aile. La cambrure lui permet de porter à incidence nulle ; l'épaisseur apporte de la résistance et de la place pour le carburant.
- La théorie des profils minces prédit une pente de portance de 2π par radian (environ 0.11 par degré) jusqu'à ce que l'écoulement décolle et que l'aile décroche.
- Une aile finie perd de la pente de portance à cause de ses tourbillons marginaux : a = a_0/(1 + a_0/(πeAR)), avec l'allongement AR = b²/S.
- Traînée totale C_D = C_D0 + KC_L² avec K = 1/(πeAR). La finesse maximale L/D est atteinte quand la traînée induite égale la traînée parasite.
- Un grand allongement (planeurs, albatros, ailes des avions de ligne modernes) signifie moins de traînée induite et une finesse L/D plus élevée.

Équations clés

$$c_l = 2\pi\alpha \ (\alpha \text{ in rad})$$

```
c_l=2πα\ (α in rad)
```

Pente de portance d'un profil mince

$$a = \frac{a_0}{1 + a_0/(\pi e AR)}, \quad AR = \frac{b^2}{S}$$

```
a=(a_0)/(1+a_0/(π eAR)), AR=^2S
```

Pente de portance d'une aile finie

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi e AR}$$

C_D=C_D0+(C_L^2)/(π eAR)

Polaire de traînée

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{C_{D0}K}}, \quad C_L^* = \sqrt{\frac{C_{D0}}{K}}$$

(LD)_=12_D0K,\ \ C_L^*=_D0K

Meilleure finesse

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Théorie des profils minces : trouvez c_l à α = 5°.

1. α = 5π/180 = 0.0873 rad.
2. c_l = 2π × 0.0873.

Réponse : c_l ≈ 0.548.

Exemple 4.2 Trouvez la pente de portance d'une aile avec AR = 8 et e = 0.9.

1. a = 2π/(1 + 2π/(π × 0.9 × 8)) = 6.283/1.278.

Réponse : 4.92 par rad ≈ 0.086 par degré, 22% sous la valeur 2D.

Exemple 4.3 Avec C_D0 = 0.025, e = 0.8 et AR = 7.5, trouvez (L/D)max et le C_L correspondant.

1. K = 1/(π × 0.8 × 7.5) = 0.0531.
2. (L/D)max = 1/(2√(0.025 × 0.0531)).
3. C_L* = √(0.025/0.0531).

Réponse : (L/D)max ≈ 13.7 à C_L ≈ 0.69.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez l'allongement d'une aile d'envergure 11 m et de surface 16.2 m².

   AR = 121/16.2 ≈ 7.5.

2. Avec $c_l = 2\pi\alpha$, quel angle donne $c_l = 0.5$?

   $\alpha = 0.5/(2\pi) = 0.0796$ rad $\approx 4.6°$.

3. Pour l'avion de l'exemple 4.3, trouvez C_D à $C_L = 0.36$.

   $C_D = 0.025 + 0.0531 \times 0.1296 \approx 0.0319$.

4. Si AR passe de 7.5 à 15 (mêmes e et C_{D0}), comment $(L/D)_{max}$ évolue-t-elle ?

   K est divisé par deux, donc $(L/D)_{max}$ est multipliée par $\sqrt{2}$, soit ≈ 19.4.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Plus d'incidence signifie toujours plus de portance.
En réalité : Au-delà de l'angle de décrochage, l'écoulement décolle et la portance chute.

Idée reçue : Les profils symétriques ne peuvent pas porter.
En réalité : Ils portent à incidence positive.

Idée reçue : Les dispositifs de bout d'aile annulent la traînée induite.
En réalité : Ils la réduisent ; seule une aile infiniment longue n'en aurait pas.

Cartes mémoire

Corde

Du bord d'attaque au bord de fuite.

Cambrure

Courbure de la ligne moyenne.

Angle d'attaque

Angle entre la corde et l'écoulement incident.

Décrochage

Décollement de l'écoulement ; la portance chute.

Allongement

b^2/S.

Polaire de traînée

$C_D = C_{D0} + KC_L^2$.

Quiz d'autocontrôle

1. La pente de portance d'un profil mince vaut…

π par rad

2π par rad

2π par degré

1 par rad

2π par rad. $c_l = 2\pi\alpha$.

2. L'allongement est...

b/S

b^2/S

S/b

c/b

b^2/S. L'envergure au carré divisée par la surface.

3. À la finesse maximale L/D...

traînée induite = traînée parasite

la traînée est nulle

$C_L = 0$

l'aile est décrochée

traînée induite = traînée parasite. Minimiser C_D/C_L donne $KC_L^2 = C_{D0}$.

4. Un plus grand allongement réduit surtout...

le frottement

la traînée induite

au poids

la traînée d'onde

la traînée induite. K = 1/(πeAR).

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les ailes longues et fines sont l'un des moyens les plus directs de réduire la consommation, car la traînée induite baisse quand l'allongement augmente. C'est précisément la voie de la « technologie aéronautique efficace » dans les travaux de la NASA sur l'aviation durable.

L'albatros, qui plane des heures au-dessus de l'océan, utilise la même physique : une aile longue et fine à grande finesse.

Sur Saving Planets : Analyse II

Sources : NASA Glenn : coefficient de traînée induite (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/induced-drag-coefficient/) · NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Glenn : FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/): Explorez la cambrure, l'épaisseur et l'angle d'attaque.
- NASA Glenn : coefficient de traînée induite (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/induced-drag-coefficient/): Allongement et facteur d'efficacité.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04: Unified Engineering (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Les cours de mécanique des fluides du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Performances des avions

Jusqu'où, combien de temps, à quelle vitesse et avec quelle pente : vol plané, montée, distance franchissable et endurance.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Relier la finesse de plané à L/D.
- Trouver la poussée et la puissance nécessaires en vol en palier.
- Calculer le taux de montée à partir de l'excédent de puissance.
- Utiliser l'équation de Breguet de la distance franchissable.

Notions clés

- Un planeur de finesse L/D parcourt L/D mètres vers l'avant pour chaque mètre de hauteur perdu : tan γ = D/L.
- La poussée nécessaire en palier égale la traînée ; la puissance nécessaire vaut traînée × vitesse. L'excédent de puissance devient de la montée : taux de montée = (P_avail − P_req)/W.
- Pour un avion à réaction, la distance franchissable suit l'équation de Breguet : R = (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f). Trois leviers : le rendement des moteurs (V/c), l'aérodynamique (L/D) et les structures (fraction de masse).
- L'endurance (temps de vol) est maximale à une autre vitesse que la distance franchissable.

Équations clés

$$\tan\gamma = \frac{D}{L} = \frac{1}{L/D}$$

γ=D/L=1L/D

Angle de plané

$$P_R = DV$$

P_R=DV

Puissance nécessaire

$$RC = \frac{P_A - P_R}{W}$$

RC=(P_A-P_R)/(W)

Taux de montée

$$R = \frac{V}{c}\,\frac{L}{D}\,\ln\frac{W_i}{W_f}$$

`R= Vc LD (W_i)/(W_f)`

Équation de Breguet de la distance franchissable (réacteur)

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Un planeur de finesse L/D = 20 est à 1000 m d'altitude. Jusqu'où peut-il planer en air calme, et sous quel angle ?

1. Distance = 1000 × 20.
2. γ = arctan(1/20).

Réponse : 20 km, avec un angle de plané d'environ 2.9°.

Exemple 5.2 Un avion à réaction vole en croisière à 230 m/s avec L/D = 17 et une consommation spécifique c = 0.6 par heure. La combustion du carburant fait passer sa masse de W_i à W_i/1.25. Trouvez sa distance franchissable.

1. c = 0.6/3,600 = 1.667 × 10^{-4} s^{-1}.
2. R = (230/1.667 × 10^{-4}) × 17 × ln 1.25.

Réponse : ≈ 5,235 km.

Exemple 5.3 L'avion de l'exemple 3.1, avec la polaire de l'exemple 4.3, a environ 957 N de traînée à 55 m/s. Quelle puissance le vol en palier exige-t-il ?

1. P = DV = 957 × 55.

Réponse : ≈ 52.6 kW (environ 71 ch).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un planeur en papier a L/D = 5. Lancé à l'horizontale depuis 2 m, jusqu'où plane-t-il environ ?

   10 m.

2. Un avion pesant 10800 N dispose de 30 kW d'excédent de puissance. Trouvez son taux de montée.

30,000/10,800 ≈ 2.8 m/s.

3. Dans l’exemple 5.2, comment la distance franchissable change-t-elle si L/D passe de 17 à 20 ?

   Distance ∝ L/D : 5235 × 20/17 ≈ 6159 km.

4. Jusqu’où l’avion de l’exemple 4.3 peut-il planer depuis 1500 m à sa meilleure finesse de 13.7 ?

   1,500 × 13.7 ≈ 20.6 km.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un planeur plus lourd plane plus loin.
En réalité : La finesse dépend de L/D, pas de la masse ; la masse change la vitesse optimale.

Idée reçue : La distance franchissable ne dépend que de la quantité de carburant.
En réalité : Elle dépend du rendement des moteurs, de L/D et de la fraction de masse (Breguet).

Idée reçue : Voler plus vite donne toujours plus de distance.
En réalité : La meilleure distance s’obtient à une vitesse modérée liée à la meilleure finesse.

Cartes mémoire

Finesse de plané

Distance horizontale par unité de hauteur = L/D.

Puissance nécessaire

$P_R = DV$.

Taux de montée

$(P_A - P_R)/W$.

Distance de Breguet

$R = (V/c)(L/D) \ln(W_i/W_f)$.

TSFC

Débit de carburant par unité de poussée.

Endurance

Temps de vol.

Quiz d’autocontrôle

1. La finesse de plané est égale…

W/D

L/D

T/W

V/a

L/D. Distance sur hauteur = L/D.

2. La puissance nécessaire en vol en palier est…

L × V

D × V

W/V

T/V

D × V. La traînée multipliée par la vitesse.

3. La distance de Breguet augmente avec…

c

L/D

la masse de la structure

à la traînée

L/D. R ∝ L/D.

4. La montée vient…

de l’excédent de puissance

d’un surplus de portance uniquement

d’une masse plus faible uniquement

d’une vitesse plus faible

de l’excédent de puissance. RC = excédent de puissance/W.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'équation de Breguet est l'équation climatique de l'aviation : pour un trajet donné, le carburant brûlé diminue quand les moteurs deviennent plus efficaces, que les ailes ont une meilleure finesse L/D ou que les structures s'allègent. Les autres termes étant fixés, la distance franchissable est proportionnelle à L/D.

La NASA estime qu'avec la flotte et les modes d'exploitation actuels, le trafic aérien mondial en 2050 nécessiterait plus de 620 millions de tonnes de carburant et émettrait près de 2000 millions de tonnes de CO_2 : c'est pourquoi chaque terme de l'équation compte.

Sur Saving Planets : CO2M : mesurer le CO_2 depuis l'espace

Sources : NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Glenn : angle de plané (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/glide-angle/): Vol plané.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Chapitre sur les performances des avions.
- NASA Glenn : rapport poussée/poids (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-to-weight-ratio/): Poussée, poids et montée.

Regarder le cours magistral

Lecture 12: Aircraft Performance (https://ocw.mit.edu/courses/16-687-private-pilot-ground-school-january-iap-2019/resources/lecture-12-aircraft-performance/) (en anglais)

MIT 16.687 Private Pilot Ground School (IAP 2019), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d'utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). 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**

Stabilité et contrôle

Pourquoi un avion bien conçu revient de lui-même en vol stabilisé, et comment les pilotes et les ordinateurs le contrôlent.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Nommer les trois axes, tangage, roulis et lacet, et leurs gouvernes.
- Expliquer la stabilité statique et dynamique.
- Situer le centre de gravité et le point neutre ; calculer la marge statique.
- Expliquer pourquoi un empennage stabilise un avion.

Notions clés

- Un avion tourne autour de son centre de gravité : tangage (gouverne de profondeur), roulis (ailerons), lacet (gouverne de direction).
- Stabilité statique : après une perturbation, l’avion tend d’abord à revenir. Stabilité dynamique : le mouvement s’amortit réellement au fil du temps.
- La stabilité en tangage exige que le centre de gravité soit en avant du point neutre. La marge statique = (x_np − x_cg)/c̄ doit être positive.
- Un empennage loin derrière le CG agit comme l’empennage d’une flèche : une perturbation à cabrer augmente la portance de l’empennage et ramène le nez vers le bas.
- Trop de stabilité rend un avion peu maniable et coûte de la traînée d’équilibrage ; certains chasseurs modernes sont conçus instables et pilotés par ordinateur.

Équations clés

$$\mathrm{SM} = \frac{x_{np} - x_{cg}}{\bar{c}}$$

`SM=_np-x_cg c`

Marge statique

$$x_{cg} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$$

`x_cg=( m_ix_i)/( m_i)`

Centre de gravité

$$\frac{dC_m}{d\alpha} < 0$$

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Le point neutre est à 40% de la corde moyenne et le CG à 25%. Trouvez la marge statique.

1. SM = 0.40 − 0.25.

Réponse : 0.15, soit 15% : stable.

Exemple 6.2 Un planeur a une aile de 50 g à x = 10 cm, un empennage de 10 g à x = 40 cm et 20 g de lest dans le nez à x = 0. Trouvez le CG.

1. Σmx = 50(10) + 10(40) + 20(0) = 900 g·cm.
2. Σm = 80 g.

Réponse : x_cg = 11.25 cm depuis le nez.

Exemple 6.3 Pour le planeur de l'exemple 6.2 (corde moyenne 8 cm), le point neutre est à 13 cm. Est-il stable ?

1. SM = (13 − 11.25)/8.

Réponse : SM ≈ 0.22 : stable. Retirez le lest du nez et le CG recule vers l'instabilité.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Quelle gouverne contrôle le tangage ?

   La gouverne de profondeur, sur l'empennage horizontal.

2. CG à 30% de la corde, point neutre à 28%. Stable ?

   SM = −0.02 < 0 : statiquement instable.

3. Dans l'exemple 6.2, quelle masse de lest m dans le nez place le CG à 12 cm ?

   900/(60 + m) = 12 donne m = 15 g.

4. Pourquoi un avion en papier sans lest dans le nez se cabre-t-il et décroche-t-il ?

Son CG est trop en arrière, près du point neutre ou derrière lui.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Statiquement stable signifie que l'oscillation s'amortit.

En réalité : C'est la stabilité dynamique ; la stabilité statique est la tendance initiale.

Idée reçue : Plus de stabilité, c'est toujours mieux.

En réalité : Trop de stabilité alourdit les commandes et gaspille de la traînée d'équilibrage.

Idée reçue : Le CG peut être n'importe où tant que l'aile porte.

En réalité : Un CG trop arrière rend l'avion instable.

Cartes mémoire

Tangage / roulis / lacet

Profondeur / ailerons / direction.

Stabilité statique

Tendance initiale à revenir.

Stabilité dynamique

La perturbation s'amortit au fil du temps.

Point neutre

Position du CG donnant une stabilité en tangage neutre.

Marge statique

$(x_{np} - x_{cg})/\bar{c}$.

Équilibrage (trim)

Équilibré, moment résultant nul.

Quiz d'autocontrôle

1. Les ailerons contrôlent…

le tangage

le roulis

le lacet

à la poussée

le roulis. Ils braquent en sens opposés sur chaque aile.

2. Pour la stabilité en tangage, le CG doit être…

derrière le point neutre

en avant du point neutre

à l’empennage

en bout d’aile

en avant du point neutre. Marge statique positive.

3. Une marge statique de 0.15 signifie…

instable

stable

neutre

décroché

stable. Marge positive.

4. La stabilité dynamique concerne…

la tendance initiale

le mouvement au fil du temps

la poussée des moteurs

la masse uniquement

le mouvement au fil du temps. Le fait que les oscillations s’amortissent ou non.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Les marges de stabilité coûtent du carburant : un empennage classique pousse généralement vers le bas pour équilibrer l'avion, et l'aile doit produire une portance supplémentaire, avec une traînée supplémentaire, pour le compenser. Réduire cette pénalité fait partie de la voie de l'avion efficace décrite par la NASA.

Les mêmes notions d'équilibre et de contrôle maintiennent les satellites d'observation de la Terre pointés de manière stable pour que leurs instruments puissent cartographier la planète.

Sur Saving Planets : Guide des orbites

Sources : NASA Glenn : rotations de l'avion (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/) · NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Glenn : rotations de l'avion (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aircraft-rotations/): Tangage, roulis et lacet.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Chapitres sur la stabilité et les commandes de vol.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Bases de la propulsion

Comment les hélices, les réacteurs et les fusées produisent de la poussée en projetant de la masse vers l'arrière, et pourquoi des réacteurs plus gros et plus lents sont plus efficaces.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser l'équation de poussée par la quantité de mouvement.
- Calculer le rendement propulsif.
- Comparer turboréacteurs, turbosoufflantes et hélices.
- Définir l'impulsion spécifique et la consommation spécifique de carburant.

Notions clés

- Tout moteur produit de la poussée en accélérant un débit massique : F = ṁ(v_e − v_0) pour un moteur aérobie (en négligeant la masse du carburant et les termes de pression).
- Rendement propulsif η_p = 2/(1 + v_e/v_0) : déplacer beaucoup d'air un peu est plus efficace que déplacer peu d'air beaucoup. C'est pourquoi les turbosoufflantes ont d'énormes soufflantes.
- Turboréacteur : tout l'air passe par le cœur. Turbosoufflante : la majeure partie de l'air contourne le cœur via la soufflante. Turbopropulseur : une hélice entraînée par une turbine à gaz.
- L'impulsion spécifique I_sp = F/(ṁ_fuel g_0) mesure la poussée par débit de poids de carburant, en secondes.

Équations clés

$$F = \dot{m}(v_e - v_0)$$

F= m(v_e-v_0)

Poussée d'un moteur aérobie

$$\eta_p = \frac{2}{1 + v_e/v_0}$$

_p=(2)/(1+v_e/v_0)

Rendement propulsif

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}_f g_0}$$

I_sp=(F)/(m_fg_0)

Impulsion spécifique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Une turbosoufflante accélère 500 kg/s d'air de 250 m/s à 320 m/s. Trouvez la poussée et le rendement propulsif.

1. F = 500 × 70 = 35,000 N.
2. η_p = 2/(1 + 320/250) = 2/2.28.

Réponse : F = 35 kN, η_p ≈ 0.88.

Exemple 7.2 Un turboréacteur produit les mêmes 35 kN avec 100 kg/s d'air à v_0 = 250 m/s. Quelle vitesse d'éjection lui faut-il, et que vaut η_p ?

1. v_e = 250 + 35,000/100 = 600 m/s.
2. η_p = 2/(1 + 2.4).

Réponse : v_e = 600 m/s, η_p ≈ 0.59 : bien moins efficace.

Exemple 7.3 Un moteur produit 100 kN en brûlant 2.5 kg/s de carburant. Trouvez son I_sp.

1. I_sp = 100,000/(2.5 × 9.80665).

Réponse : ≈ 4079 s. Les moteurs aérobies battent les fusées sur ce critère car ils n'emportent pas leur comburant.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez la poussée pour $\dot{m}$ = 200 kg/s, v_0 = 200 m/s, v_e = 300 m/s.

   20 kN.

2. Trouvez η_p quand v_e = v_0.

   1.0, mais la poussée est nulle : rendement et poussée s'opposent.

3. Pourquoi les avions de ligne utilisent-ils des turbosoufflantes à grand taux de dilution ?

   Elles déplacent lentement une grande masse d'air, ce qui augmente le rendement propulsif et réduit la consommation et le bruit.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les réacteurs poussent sur l'air derrière eux.

En réalité : Ils accélèrent l'air à travers le moteur ; la réaction à cette accélération est la poussée.

Idée reçue : Une éjection plus rapide signifie toujours un meilleur moteur.

En réalité : Pour le rendement, la vitesse d'éjection doit être proche de la vitesse de vol.

Idée reçue : L'impulsion spécifique est une vitesse.

En réalité : Elle se mesure en secondes ; $I_{sp} \times g_0$ est une vitesse d'éjection effective.

Cartes mémoire

Poussée par quantité de mouvement

$F = \dot{m}(v_e - v_0)$.

Rendement propulsif

$2/(1 + v_e/v_0)$.

Turbosoufflante

Soufflante plus cœur ; la majeure partie de l'air contourne le cœur.

Taux de dilution

Air secondaire ÷ air du cœur.

Impulsion spécifique

$F/(\dot{m}\, g_0)$, en secondes.

TSFC

Débit de carburant par unité de poussée.

Quiz d'autocontrôle

1. Poussée d'un moteur aérobie ≈

$\dot{m}v_0$

$\dot{m}(v_e - v_0)$

$\dot{m}v_e^2$

ρV^2

$\dot{m}(v_e - v_0)$. Variation de quantité de mouvement par seconde.

2. Le rendement propulsif est maximal quand v_e/v_0 est…

grand

proche de 1

zéro

négatif

proche de 1. $\eta_p = 2/(1 + v_e/v_0)$.

3. Dans une turbosoufflante à grand taux de dilution, la majeure partie de l'air…

traverse la chambre de combustion

contourne le cœur

est stockée

est chauffée à 2000 K

contourne le cœur. Le flux de la soufflante.

4. I_{sp} se mesure en…

m/s

secondes

newtons

kg

secondes. Poussée par débit de poids d'ergol.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Un meilleur rendement propulsif, c'est directement du carburant et du CO_2 économisés. Chaque kilogramme de kérosène brûlé produit environ 3.16 kg de CO_2 (le carbone du carburant combiné à

l’oxygène de l’air ; voir l’unité 10), donc les gains de rendement s’additionnent sur les décennies de service d’un moteur.

Le carburant d’aviation durable, fabriqué à partir de déchets et de biomasse, est mélangé de façon à reproduire les propriétés du kérosène conventionnel pour une exploitation sûre. La NASA note que le SAF ne libère pas de nouveau CO_2 dans l’environnement.

Sur Saving Planets : Chimie générale I

Sources : NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · U.S. DOE : carburants d’aviation durables (https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuels)

Ressources d’apprentissage gratuites

- NASA Glenn : rapport poussée/poids (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-to-weight-ratio/): Moteurs et poussée.
- NASA Glenn : impulsion spécifique (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/specific-impulse/): Rendement des fusées et des réacteurs.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04: Unified Engineering (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Cours de propulsion du MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Fusées et équation de la fusée

Pourquoi atteindre l'orbite est si difficile : l'équation de Tsiolkovski, les rapports de masse et l'étagement.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utilisez Δv = I_sp g_0 ln(m_0/m_f).
- Calculer les rapports de masse nécessaires.
- Expliquer pourquoi l'étagement fonctionne.
- Calculer le rapport poussée/poids d'une fusée.

Notions clés

- Une fusée emporte tous ses ergols, carburant et comburant. Sa poussée vaut F = ṁv_e + (p_e − p_a)A_e.
- L'équation idéale de la fusée : Δv = v_e ln(m_0/m_f), avec v_e = I_sp g_0. La vitesse ne croît qu'avec le logarithme du rapport de masse.
- Atteindre l'orbite terrestre basse demande environ 9.4 km/s de Δv une fois incluses les pertes par gravité et par traînée, donc l'essentiel de la masse d'un lanceur est constitué d'ergols.
- L'étagement largue les réservoirs vides et les moteurs pour que les étages suivants ne transportent pas de poids mort.
- Le rapport poussée/poids doit dépasser 1 pour décoller.

Équations clés

$$\Delta v = I_{sp}\, g_0 \ln \frac{m_0}{m_f}$$

`Δ v=I_sp g_0(m_0)/(m_f)`

Équation idéale de la fusée (Tsiolkovski)

$$F = \dot{m} v_e + (p_e - p_a) A_e$$

`F= m v_e+(p_e-p_a)A_e`

Poussée d'une fusée

$$\frac{m_0}{m_f} = e^{\Delta v/(I_{sp} g_0)}$$

`(m_0)/(m_f)=e^Δ v/(I_spg_0)`

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Un moteur d'I_sp = 450 s fonctionne jusqu'à $m_0/m_f = 5$. Trouvez Δv.

1. v_e = 450 × 9.80665 = 4,413 m/s.
2. Δv = 4,413 × ln 5.

Réponse : ≈ 7,102 m/s.

Exemple 8.2 Quel rapport de masse un seul étage doit-il avoir pour 9.4 km/s avec I_sp = 300 s ? Et avec 450 s ?

1. 300 s: e^(9,400/2,942) = e^3.195.
2. 450 s: e^(9,400/4,413) = e^2.130.

Réponse : ≈ 24.4 contre ≈ 8.4 : environ 96% contre 88% de la fusée doit être constituée d'ergols.

Exemple 8.3 Une fusée à deux étages : chaque étage a I_sp = 300 s et un rapport de masse de 4. Trouvez le Δv total.

1. Chaque étage : 2942 × ln 4 = 4078 m/s.
2. Additionnez les étages.

Réponse : ≈ 8157 m/s, deux fois ce que donne un seul étage de rapport de masse 4.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez Δv pour I_sp = 311 s et $m_0/m_f = 3$.

   311 × 9.80665 × ln 3 ≈ 3,351 m/s.

2. Une fusée de 500000 kg a 7.5 MN de poussée. Trouvez T/W au décollage.

   $7.5 \times 10^6/(500{,}000 \times 9.81) \approx 1.53$.

3. Quel I_sp donne Δv = 3000 m/s avec un rapport de masse de 2 ?

   3,000/(9.80665 × ln 2) ≈ 441 s.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les fusées poussent contre l'air.

En réalité : Elles fonctionnent mieux dans le vide ; elles poussent sur leurs propres gaz d'échappement.

Idée reçue : Deux fois plus d'ergols, deux fois plus de Δv.

En réalité : Δv croît avec le logarithme du rapport de masse.

Idée reçue : L'orbite ne demande que 7.7 km/s de Δv.

En réalité : Les pertes par gravité et par traînée portent le total à environ 9.4 km/s.

Cartes mémoire

Équation de la fusée

$\Delta v = I_sp\ g_0 \ln(m_0/m_f)$.

Rapport de masse

m_0/m_f.

Étagement

Larguer les étages épuisés.

Poussée/poids

Doit dépasser 1 au décollage.

Δv vers l'orbite basse (LEO)

≈ 9.4 km/s pertes comprises.

I_sp

Secondes de poussée par poids d'ergol.

Quiz d'autocontrôle

1. Δv dépend du rapport de masse via…

un carré

un logarithme

une racine carrée

une droite

un logarithme. $\ln(m_0/m_f)$.

2. L’étagement aide parce que…

il augmente l’I_sp

il largue la masse morte

il ajoute de l’air

il diminue la gravité

il largue la masse morte. Les réservoirs vides n’ont plus besoin d’être accélérés.

3. Pour décoller, le rapport poussée/poids doit être…

< 1

> 1

= 0

exactement 1

> 1. La poussée doit dépasser le poids.

4. La vitesse d’éjection effective pour I_sp = 300 s est d’environ…

300 m/s

2,940 m/s

30 km/s

9.8 m/s

2,940 m/s. I_sp × g_0.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Chaque satellite d’observation de la Terre, de Landsat aux missions qui suivent le niveau de la mer et les gaz à effet de serre, voyage sur une fusée dimensionnée avec cette équation. C’est pourquoi

chaque kilogramme d’instrument est précieux et pourquoi les satellites sont conçus pour être légers.

Notre calculateur de Delta-v vous permet de refaire les mêmes calculs pour de vraies missions.

Sur Saving Planets : Calculateur de delta-v · Landsat 9

Sources : NASA Glenn : équation idéale de la fusée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/) · NASA Glenn : équation de poussée d’une fusée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/)

Ressources d’apprentissage gratuites

- NASA Glenn : équation idéale de la fusée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/): Démonstration et utilisation.
- NASA Glenn : équation de poussée d’une fusée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/rocket-thrust-equation/): Poussée de pression et de quantité de mouvement.
- NASA Glenn : impulsion spécifique (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/specific-impulse/): Comparaison des ergols.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Orbites et missions spatiales

Orbites circulaires et elliptiques, périodes, orbite géostationnaire et transfert de Hohmann, et la façon dont les missions d'observation de la Terre choisissent leur orbite.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la vitesse et la période d'une orbite circulaire.
- Trouver le rayon géostationnaire.
- Calculer le Δv et la durée d'un transfert de Hohmann.
- Décrire les orbites terrestres courantes et leurs usages.

Notions clés

- Sur une orbite circulaire, la gravité fournit la force centripète : v = √(μ/r), avec μ = GM.
- Troisième loi de Kepler : T = 2π√(a³/μ). Les orbites plus hautes sont plus lentes et durent plus longtemps.
- Une orbite géostationnaire a une période d'un jour sidéral (86164 s) et se situe au-dessus de l'équateur à un rayon d'environ 42164 km.
- Un transfert de Hohmann utilise deux poussées le long d'une ellipse tangente aux deux orbites circulaires ; c'est le transfert à deux impulsions le plus efficace entre orbites circulaires coplanaires.
- L'orbite terrestre basse (environ 400 km pour l'ISS), les orbites polaires héliosynchrones pour l'imagerie et l'orbite géostationnaire pour la météo servent chacune des missions différentes.

Équations clés

$$v = \sqrt{\mu / r}$$

v=μ/r

Vitesse sur orbite circulaire

$$T = 2\pi \sqrt{a^3 / \mu}$$

T=2π^3/μ

Période orbitale

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

v=μ(2r-1a)

Équation de la vis viva

$$\Delta v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}}\left(\sqrt{\frac{2r_2}{r_1+r_2}} - 1\right)$$

`Δ v_1=μr_1(2r_2r_1+r_2-1)`

Première poussée de Hohmann

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Trouvez la vitesse et la période d'une orbite circulaire à 400 km d'altitude.

1. r = 6,771 km.
2. v = √(3.986 × 10^{14}/6.771 × 10^{6}) = 7,673 m/s.
3. T = 2π√(r^3/μ) = 5,545 s.

Réponse : 7.67 km/s et ≈ 92.4 minutes.

Exemple 9.2 Trouver le rayon géostationnaire.

1. r = (μT^2/4π^2)^(1/3) avec T = 86164 s.

Réponse : ≈ 42164 km du centre de la Terre (environ 35786 km au-dessus de l'équateur).

Exemple 9.3 Trouvez le Δv de Hohmann d'une orbite circulaire de 300 km au rayon géostationnaire.

1. r_1 = 6,671 km, r_2 = 42,164 km.
2. Δv_1 = 2,428 m/s; Δv_2 = 1,468 m/s.
3. Durée du transfert = la moitié de la période de l'ellipse de transfert.

Réponse : Total ≈ 3.90 km/s ; transfert ≈ 5.27 heures (sans changement de plan).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Trouvez v pour une orbite circulaire à r = 7000 km.

   √(3.986 × 10^{14}/7 × 10^{6}) ≈ 7,546 m/s.

2. Si le rayon de l'orbite quadruple, comment la période change-t-elle ?

$T \propto r^{(3/2)}$: 8 fois plus longue.

3. Pourquoi de nombreux satellites météo sont-ils géostationnaires ?

   Ils restent au-dessus d'un même point et peuvent imager en continu le même hémisphère.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les astronautes flottent parce qu'il n'y a pas de gravité en orbite.

En réalité : À 400 km, la gravité vaut environ 89% de sa valeur en surface ; ils sont en chute libre.

Idée reçue : Pour rattraper un engin spatial devant vous, il suffit d'accélérer.

En réalité : Accélérer élève votre orbite et diminue votre vitesse angulaire.

Idée reçue : Les orbites plus hautes demandent plus de vitesse.

En réalité : La vitesse circulaire diminue avec l'altitude, même si atteindre une orbite plus haute demande plus de Δv au total.

Cartes mémoire

Vitesse circulaire

$\sqrt{(\mu/r)}$.

Troisième loi de Kepler

$T = 2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

Vis viva

$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$.

Transfert de Hohmann

Transfert elliptique à deux poussées.

GEO

Période = 1 jour sidéral ; $r \approx 42164$ km.

Orbite héliosynchrone

Orbite quasi polaire qui survole chaque lieu à peu près à la même heure locale.

Quiz d'autocontrôle

1. La vitesse sur orbite circulaire est…

$\sqrt{(\mu r)}$

$\sqrt{(\mu/r)}$

μ/r^2

$2\pi r$

$\sqrt{(\mu/r)}$. La gravité fournit la force centripète.

2. À 400 km, un engin spatial fait le tour de la Terre environ toutes les...

24 h

92 min

10 min

1 semaine

92 min. ≈ 92.4 minutes.

3. Un transfert de Hohmann utilise...

une poussée

deux poussées

uniquement une poussée continue

uniquement le freinage atmosphérique

deux poussées. Une à chaque extrémité de l'ellipse de transfert.

4. Rayon géostationnaire ≈

6,771 km

42,164 km

384,400 km

20,000 km

42,164 km. La troisième loi de Kepler avec un jour sidéral.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La surveillance du climat dépend du choix de l'orbite. Les orbites héliosynchrones permettent à Landsat d'imager le même lieu sous un éclairage similaire, de sorte que les changements des forêts, des cultures et des glaces ressortent, tandis que les satellites météo géostationnaires observent en continu le développement des tempêtes.

Les orbites demandent aussi du soin : les débris menacent ces missions, si bien que les engins spatiaux sont de plus en plus conçus pour être éliminés en fin de vie.

Sur Saving Planets : Guide des orbites · Calculateur de vitesse orbitale · Calculateur de période orbitale

Sources : NASA JPL : Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/) · Fiche NASA sur la Terre (en anglais) (https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA JPL : Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): L'introduction gratuite du NASA JPL aux orbites et aux missions.
- Physique I, unité 7 : gravitation et orbites: Notre unité sur les orbites.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Aviation et espace durables

Synthèse : la physique de la réduction de l'impact climatique de l'aviation, des avions efficaces aux carburants durables et aux nouvelles sources d'énergie, et la préservation d'un espace utilisable.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le CO_2 issu du carburant brûlé.
- Utiliser l'équation de Breguet pour comparer des gains d'efficacité.
- Expliquer le rôle et les limites du carburant d'aviation durable, des batteries et de l'hydrogène.
- Décrire la durabilité spatiale : débris et élimination.

Notions clés

- Brûler un kilogramme de carburéacteur de type kérosène produit environ 3.16 kg de CO_2, une valeur fixée par la chimie. Les seuls moyens de la réduire sont de brûler moins de carburant ou d'utiliser un carburant dont le carbone provient récemment de l'air.
- L'EPA indique que les avions couverts par sa réglementation sur les gaz à effet de serre représentent 10% des émissions de gaz à effet de serre des transports aux États-Unis et 3% du total américain.
- Les trois voies de la NASA : technologie aéronautique efficace, carburant d'aviation durable, et meilleures opérations et infrastructures.
- Les batteries actuelles stockent bien moins d'énergie par kilogramme que le kérosène, donc les avions électriques conviennent aux vols courts et petits ; l'hydrogène stocke beaucoup d'énergie par kilogramme mais exige de grands réservoirs.
- La durabilité spatiale consiste à planifier l'élimination des engins pour que les orbites utiles restent ouvertes aux satellites qui surveillent la Terre.

Équations clés

$$m_{\mathrm{CO_2}} \approx 3.16\, m_{\mathrm{fuel}}$$

CO_2 issu de la combustion du kérosène

$$\frac{\mathrm{fuel}_2}{\mathrm{fuel}_1} \approx \frac{(L/D)_1}{(L/D)_2}$$

Le carburant varie en raison inverse de L/D (même trajet, variations modestes)

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 D'où vient 3.16 ? Modélisez le carburéacteur comme $C_{12}H_{23}$ et trouvez les kg de CO_2 par kg de carburant.

1. Masse molaire : 12(12.011) + 23(1.008) = 167.3 g/mol.
2. 12 CO_2 par molécule : 12 × 44.01 = 528.1 g.
3. 528.1/167.3.

Réponse : ≈ 3.16 kg de CO_2 par kg de carburant.

Exemple 10.2 La NASA estime à 620 millions de tonnes la consommation de carburant en 2050 au niveau d'efficacité actuel. Combien de CO_2 cela représente-t-il ?

1. 620 × 3.16.

Réponse : ≈ 1959 millions de tonnes, en accord avec les « près de 2000 mégatonnes » de la NASA.

Exemple 10.3 Un vol brûle 20 t de carburant. Une nouvelle aile fait passer L/D de 17 à 19. Estimez le carburant et le CO_2 économisés.

1. Carburant ≈ 20 × 17/19 = 17.9 t.
2. Carburant économisé ≈ 2.1 t ; × 3.16.

Réponse : ≈ 2.1 t de carburant et ≈ 6.7 t de CO_2 par vol (estimation simplifiée).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un vol brûle 5000 kg de carburant. Combien de CO_2 ?

   ≈ 15,800 kg.

2. Si les moteurs deviennent 15% plus économes, de combien les émissions de CO_2 par trajet baissent-elles environ ?

   D'environ 15%, puisque le CO_2 est proportionnel au carburant brûlé.

3. Pourquoi les batteries actuelles ne peuvent-elles pas propulser les long-courriers ?

   Leur énergie par kilogramme est bien inférieure à celle du kérosène, et le compromis de Breguet rend la masse supplémentaire très coûteuse.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le carburant d'aviation durable n'émet pas de CO_2 quand on le brûle.

En réalité : Il émet du CO_2 comme le kérosène ; l'avantage est que son carbone provient récemment de l'air, donc les émissions sur le cycle de vie sont plus faibles.

Idée reçue : Les avions électriques remplaceront bientôt tous les avions à réaction.

En réalité : La densité énergétique des batteries les limite pour l'instant aux vols courts et petits.

Idée reçue : L'espace est trop grand pour être pollué.

En réalité : Les débris sur les orbites très utilisées sont un vrai danger.

Cartes mémoire

CO_2 par kg de carburant

≈ 3.16 kg.

SAF

Carburant d'aviation durable issu de déchets et de biomasse.

Trois voies

Avions efficaces, SAF, opérations.

Densité énergétique

Énergie par kg ; batteries ≪ kérosène.

Débris spatiaux

Objets hors service qui menacent les orbites utiles.

Émissions sur le cycle de vie

Toutes les émissions, de la production du carburant à son utilisation.

Quiz d'autocontrôle

1. Brûler 1 kg de kérosène produit environ…

1 kg CO_2

3.16 kg CO_2

0.3 kg CO_2

10 kg CO_2

3.16 kg CO_2. Le carbone du carburant se combine avec l'oxygène de l'air.

2. Les trois voies de la NASA vers une aviation durable sont…

des réservoirs plus grands

avions efficaces, SAF, opérations et infrastructures

uniquement voler plus bas

uniquement des montées plus lentes

avions efficaces, SAF, opérations et infrastructures. Selon la liste de la NASA.

3. Si L/D augmente de 10%, le carburant pour le même trajet baisse d'environ…

1%

9–10%

50%

0%

9–10%. Carburant ∝ 1/(L/D).

4. Quelle part du total des gaz à effet de serre américains émettent les avions couverts par la règle de l'EPA ?

0.3%

3%

30%

50%

3%. EPA : 3% du total national.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Cette unité est le lien complet du cours avec la planète : chaque équation des unités 3–7 est un levier sur la consommation de carburant, et la consommation de carburant, c'est du CO_2. Les ingénieurs capables de faire ces calculs conçoivent les avions plus propres vers lesquels travaillent la NASA et l'industrie.

L'EPA indique que les avions couverts par sa règle produisent 10% des émissions de gaz à effet de serre des transports aux États-Unis, et la NASA note que les États-Unis se sont engagés en 2021 à atteindre la neutralité des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation d'ici 2050.

Sur Saving Planets : CO2M : mesurer le CO_2 depuis l'espace · Calculateur de delta-v

Sources : NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/) · EPA : émissions de gaz à effet de serre des avions (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/): Présentation et objectifs de la NASA.
- EPA : émissions de gaz à effet de serre des avions (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-aircraft): Normes d'émissions et données américaines.
- U.S. DOE : carburants d'aviation durables (https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuels): Comment le SAF est fabriqué.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

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

1. Histoire du vol et processus de conception
   3 exercices
2. L'atmosphère
   4 exercices
3. Aérodynamique de base : portance et traînée
   4 exercices
4. Profils aérodynamiques et ailes
   4 exercices
5. Performances des avions
   4 exercices
6. Stabilité et contrôle
   4 exercices
7. Bases de la propulsion

3 exercices

8. Fusées et équation de la fusée
   3 exercices
9. Orbites et missions spatiales
   3 exercices
10. Aviation et espace durables
    3 exercices

Travaux pratiques

Quatre TP mettent le cours en pratique : une soufflerie virtuelle avec FoilSim de la NASA, un calculateur de l'équation de la fusée, un planeur que vous concevez et faites voler, et un tableur d'atmosphère et de vitesse de décrochage.

Les données d'exemple sont signalées comme telles. Vos propres mesures seront différentes, et expliquer pourquoi fait partie du TP.

Référence de sécurité : FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak)

TP A : soufflerie virtuelle avec NASA FoilSim

SEMAINE 5

Objectif : Mesurer la courbe de portance d'un profil dans FoilSim et la comparer à la théorie des profils minces.

$$c_l \approx 2\pi\alpha$$

Théorie des profils minces (α en radians)

Mode opératoire

1. Ouvrez FoilSim et choisissez un profil symétrique (cambrure nulle) d'environ 12% d'épaisseur.
2. Relevez le coefficient de portance à α = 0°, 2°, 4°, 6° et 8°.
3. Ajoutez une colonne avec 2πα et comparez. Puis ajoutez de la cambrure et recommencez.
4. Augmentez α jusqu'à ce que FoilSim signale le décrochage ; notez l'angle.

Tableau de données

α (deg)	Théorie c_l = 2πα
0	0.000
2	0.219
4	0.439
6	0.658
8	0.877

Valeurs théoriques calculées. Vos relevés FoilSim différeront quelque peu ; expliquez pourquoi (épaisseur, hypothèses du modèle).

Exemple de calcul

1. 2π × (4π/180) = 0.439.
2. Pente théorique : 0.110 par degré. Une aile finie avec AR = 8 et e = 0.9 ne montrerait qu'environ 0.086 par degré (unité 4).

> **Sécurité**
>
> - Aucune, au-delà d'un usage normal de l'ordinateur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Fonctionne dans un navigateur web.

NASA Glenn : FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/)

Lien avec la planète : Les essais en soufflerie, réels et virtuels, permettent aux concepteurs de trouver des ailes à faible traînée qui consomment moins de carburant. NASA : aviation durable (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-aviation/)

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

TP B : calculateur de l’équation de la fusée

SEMAINE 11

Objectif : Construire un tableur qui donne Δv à partir de l’I_sp et du rapport de masse, et l’utiliser pour dimensionner une fusée à deux étages.

$$\Delta v = I_{sp}\, g_0 \ln(m_0/m_f)$$

```
Δ v=I_sp g_0(m_0/m_f)
```

Équation idéale de la fusée

Mode opératoire

1. Colonnes : I_sp, m_0, m_f, rapport de masse, Δv.
2. Remplissez des lignes pour I_sp = 300 s et 450 s avec des rapports de masse de 2, 4 et 8.
3. Ajoutez une feuille à deux étages : Δv total = somme des étages. Trouvez des rapports de masse par étage qui atteignent 9.4 km/s.
4. Vérifiez un résultat avec notre calculateur de Delta-v.

Tableau de données

I_sp (s)	Rapport de masse	Δv (m/s)
300	2	2,039
300	4	4,078
300	8	6,118
450	4	6,118
450	8	9,177

Valeurs calculées (cas idéal : sans pertes par gravité ni par traînée).

Exemple de calcul

1. 300 × 9.80665 × ln 2 = 2,039 m/s.
2. Chaque doublement du rapport de masse ajoute les mêmes 2039 m/s à 300 s : c’est le logarithme à l’œuvre.
3. Deux étages à 300 s, chacun de rapport de masse 5, donnent 2 × 4735 = 9470 m/s, juste au-dessus de 9.4 km/s.

> **Sécurité**

- Aucune précaution au-delà d'un usage normal de l'ordinateur. Ne construisez pas et ne faites pas voler de moteurs-fusées sans encadrement qualifié ni autorisation locale.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Un tableur suffit.

Calculateur de Delta-v de Saving Planets · NASA Glenn : équation idéale de la fusée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/)

Lien avec la planète : Chaque kilogramme gagné sur un satellite climatique réduit la fusée nécessaire pour le lancer. NASA Glenn : équation idéale de la fusée (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/ideal-rocket-equation/)

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

TP C : concevoir, construire et faire voler un planeur

SEMAINE 8

Objectif : Concevoir un planeur en carton fin ou en mousse, régler son CG pour une marge statique positive, puis mesurer sa finesse de plané.

$$L/D \approx \frac{\text{glide distance}}{\text{launch height}}$$

Finesse à partir d'un plané stabilisé

Mode opératoire

1. Esquissez un modèle : choisissez une envergure et une corde donnant un allongement entre 5 et 8, un empennage d'environ 20% de la surface alaire, et une baguette comme fuselage.
2. Construisez-le. Trouvez le CG en le posant en équilibre sur un doigt ; ajoutez du lest dans le nez jusqu'à ce que le CG soit à environ 25% de la corde derrière le bord d'attaque de l'aile.
3. Lancez-le doucement et à l'horizontale depuis une hauteur mesurée, en air calme, au moins cinq fois ; notez chaque distance.
4. Calculez L/D. Puis reculez le CG par petites étapes et notez ce qui se passe.

Tableau de données

Essai	Hauteur (m)	Distance (m)
1	2.0	9.6
2	2.0	10.4
3	2.0	10.0
Moyenne	2.0	10.0

Données d'exemple pour s'entraîner, pas un résultat mesuré.

Exemple de calcul

1. L/D moyen ≈ 10.0/2.0 = 5.0.
2. Angle de plané = arctan(1/5) ≈ 11.3°.
3. Constat typique : avec un CG trop en arrière, le planeur se cabre et décroche (marge statique négative) ; trop en avant, il pique.

> **Sécurité**
>
> - Coupez en éloignant la lame de votre corps ; un adulte doit manipuler tout cutter.
> - Faites voler à l'écart du visage des personnes, dans un espace dégagé.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Du carton fin, du ruban adhésif et une pièce comme lest dans le nez conviennent bien.

NASA Glenn : angle de plané (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/glide-angle/)

Lien avec la planète : Les planeurs montrent jusqu'où une bonne aérodynamique seule peut vous mener, sans aucun carburant.

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

TP D : tableur d’atmosphère et de vitesse de décrochage

SEMAINE 4

Objectif : Mettre en œuvre le modèle d’atmosphère de la NASA et voir comment l’altitude modifie la masse volumique, la vitesse du son et la vitesse de décrochage.

$$V_s = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,\max}}}$$

V_s=2Wρ SC_L,

Vitesse de décrochage (vitesse vraie)

Mode opératoire

1. Programmez les ajustements de la NASA pour la troposphère et la basse stratosphère de 0 à 12 km par pas de 1 km.
2. Calculez ρ, a et V_s pour W = 10791 N, S = 16.2 m², C_L,max = 1.6.
3. Tracez ρ/ρ₀ et V_s en fonction de l’altitude.

Tableau de données

Altitude (m)	ρ (kg/m³)	V_s (m/s)
0	1.227	26.1
5,000	0.738	33.6
10,000	0.414	44.8

Calculé à partir du modèle de la NASA.

Exemple de calcul

1. At 5,000 m: √(2 × 10,791/(0.738 × 16.2 × 1.6)) = 33.6 m/s.
2. V_s croît comme 1/√ρ : à 10 km, elle vaut 1.72 fois sa valeur au niveau de la mer.

> **Sécurité**
>
> - Aucune, au-delà d’un usage normal de l’ordinateur.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Un tableur suffit.

NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/)

Lien avec la planète : La physique de l'atmosphère standard sous-tend aussi la façon dont les satellites mesurent l'air.

☐ **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 ρ à 5000 m avec le modèle de la NASA.
    1. $T = -17.41\ ^\circ C$; $p = 54.11$ kPa.
    2. $\rho = 54.11/(0.2869 \times 255.69)$.

    Réponse : ≈ 0.738 kg/m³.
2. Un avion de 1100 kg ($S = 16.2$ m², $C_{L,max} = 1.6$) : trouvez sa vitesse de décrochage à 5000 m.
    1. $V_s = \sqrt{(2 \times 10{,}791/(0.738 \times 16.2 \times 1.6))}$.

    Réponse : ≈ 33.6 m/s.
3. Trouvez $(L/D)_{max}$ pour $C_{D0} = 0.025$, $e = 0.8$, $AR = 7.5$.
    1. $K = 0.0531$; $(L/D)_{max} = 1/(2\sqrt{(C_{D0} K)})$.

    Réponse : ≈ 13.7.
4. Un planeur de $L/D = 13.7$ part de 1500 m d'altitude. Jusqu'où peut-il planer ?
    1. $1{,}500 \times 13.7$.

    Réponse : ≈ 20.6 km.

Série d'entraînement finale (toutes les unités)

1. Trouvez la marge statique pour $x_{np} = 0.40\bar{c}$ et $x_{cg} = 0.25\bar{c}$.
    1. $0.40 - 0.25$.

    Réponse : 0.15 (stable).
2. Un moteur accélère 500 kg/s d'air de 250 à 320 m/s. Trouvez la poussée et η_p.
    1. $F = 500 \times 70$; $\eta_p = 2/(1 + 1.28)$.

Réponse : 35 kN; ≈ 0.88.

3. Trouvez Δv pour I_sp = 450 s et un rapport de masse de 5.

    1. 4,413 × ln 5.

    Réponse : ≈ 7,102 m/s.

4. Trouvez la période d'une orbite circulaire à 400 km d'altitude.

    1. T = 2π√(r³/μ) avec r = 6.771 × 10⁶ m.

    Réponse : ≈ 92.4 min.

5. Trouvez le Δv de Hohmann d'une orbite à 300 km jusqu'au rayon géostationnaire.

    1. Δv_1 = 2,428 m/s; Δv_2 = 1,468 m/s.

    Réponse : ≈ 3.90 km/s.

6. Un vol brûle 20 t de carburant. Combien de CO_2 ?

    1. 20 × 3.16.

    Réponse : ≈ 63 t.

Fiche de formules

$$L = W,\ T = D$$

$$T = 15.04 - 0.00649h,\ p = 101.29\left(\frac{T+273.1}{288.08}\right)^{5.256}$$

$$\rho = p/(RT),\ a = \sqrt{\gamma RT},\ M = V/a$$

$$L = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_L,\ D = \tfrac{1}{2}\rho V^2 S C_D$$

$$V_s = \sqrt{2W/(\rho S C_{L,\max})}$$

$$Re = \rho V c/\mu$$

$$c_l = 2\pi\alpha$$

$$a = a_0/(1 + a_0/(\pi e AR))$$

$$C_D = C_{D0} + C_L^2/(\pi e AR)$$

$$(L/D)_{\max} = 1/(2\sqrt{C_{D0}K})$$

$$\tan\gamma = 1/(L/D)$$

$$R = (V/c)(L/D)\ln(W_i/W_f)$$

$$\mathrm{SM} = (x_{np} - x_{cg})/\bar{c}$$

$$F = \dot{m}(v_e - v_0),\ \eta_p = 2/(1 + v_e/v_0)$$

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln(m_0/m_f)$$

$$v = \sqrt{\mu/r},\ T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu}$$

$$v^2 = \mu(2/r - 1/a)$$

$$m_{CO_2} \approx 3.16\, m_{fuel}$$

Constantes

Constante	Valeur
Gravité standard g_0	9.80665 m/s²
Masse volumique de l'air au niveau de la mer (modèle NASA)	1.23 kg/m³
Pression au niveau de la mer (modèle NASA)	101.3 kPa
Vitesse du son, niveau de la mer (15 °C)	340 m/s
Constante des gaz de l'air R	287 J/(kg·K)
Rapport des chaleurs spécifiques γ (air)	1.4
GM de la Terre	3.986 × 10¹⁴ m³/s²
Rayon moyen de la Terre	6,371 km

Source : NASA Glenn: Earth atmosphere model (metric) (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/earth-atmosphere-equation-metric/)

Simulateurs et références

Outils et références gratuits à utiliser avec le cours.

- NASA Glenn: Beginner's Guide to Aeronautics (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/): La référence gratuite de la NASA pour chaque équation de ce cours, avec des simulateurs.
- NASA Glenn : FoilSim (https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/foilsim/): Soufflerie virtuelle pour profils (TP A).
- MIT OpenCourseWare 16.00: Introduction to Aerospace Engineering and Design (https://ocw.mit.edu/courses/16-00-introduction-to-aerospace-engineering-and-design-spring-2003/): Le cours de conception de première année du MIT.
- FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak): Manuel gratuit de la FAA sur l'aérodynamique, les performances et la stabilité.
- NASA JPL : Basics of Space Flight (https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/): Introduction gratuite aux orbites et aux missions.

Glossaire

Angle d'attaque

Angle entre la corde et l’air incident.

Allongement
Envergure au carré divisée par la surface alaire.

Équation de distance franchissable de Breguet
Distance franchissable d’un avion à réaction selon la vitesse, la consommation, L/D et la fraction de masse.

Cambrure
Courbure de la ligne moyenne d’un profil.

Centre de gravité
Point où s’applique le poids.

Polaire de traînée
C_D en fonction de C_L.

Pression dynamique
$\frac{1}{2}\rho V^2$.

Orbite géostationnaire
Orbite équatoriale de période égale à un jour sidéral.

Transfert de Hohmann
Transfert elliptique à deux poussées entre orbites circulaires.

Traînée induite
Traînée due à la production de portance par une aile finie.

Nombre de Mach
La vitesse divisée par la vitesse locale du son.

Point neutre
Position du CG donnant une stabilité neutre en tangage.

Rendement propulsif
Fraction de la puissance du jet qui devient puissance de poussée utile.

Nombre de Reynolds
Rapport des effets d’inertie aux effets visqueux, $\rho Vc/\mu$.

Équation de la fusée
$\Delta v = I_sp\ g_0 \ln(m_0/m_f)$.

Impulsion spécifique
Poussée par débit de poids d’ergol, en secondes.

Décrochage
Perte de portance quand l’écoulement décolle de l’aile.

Atmosphère standard
Modèle moyen des propriétés de l’air en fonction de l’altitude.

Marge statique
Distance entre le CG et le point neutre, en cordes moyennes.

Carburant d’aviation durable
Carburéacteur fabriqué à partir de déchets ou de biomasse.

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	Pose les problèmes à partir des forces et des exigences, vérifie les unités et les ordres de grandeur, et explique les compromis.
3 · Compétent	Résout les exercices d’entraînement avec quelques erreurs occasionnelles.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais peine à choisir la bonne équation.
1 · Débutant	Remplace par des nombres sans vérifier les unités ni les hypothèses ; revoir l’unité.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	25%
Travaux pratiques	20%
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

- Analyse II MATH 111
- Dessin technique / CAO ENGR 120
- Chimie générale I + TP CHEM 110 + CHEM 110L
- Tous les cours