Dernière mise à jour: November 1, 2026

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 périmètre suit une option de dernière année sur l'aviation et l'environnement. Il s'appuie sur le cours sur les facteurs environnementaux de MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (gratuit sur MIT OpenCourseWare) et sur des documents publics de la NASA, du DOE, de l'EIA et de l'EPA, liés là où ils aident. Aucun d'eux ne cautionne cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque module est relié à un travail réel avec une source publique citée, chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant publication, et chaque TP fonctionne dans un tableur ou une simulation gratuits.
>
> 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

Tout ce cours est une section planète : l'Alternative Fuels Data Center du DOE indique que l'aviation produit environ 2% de tout le CO_2 mondial et 12% du CO_2 des transports, et les traînées de condensation ajoutent un réchauffement au-delà du CO_2.

Le Sustainable Flight National Partnership de la NASA œuvre pour l'objectif du secteur aérien de zéro émission nette de carbone d'ici 2050. Chaque module se termine par une courte section sourcée. Les valeurs non issues d'une source sont indiquées comme valeurs d'exemple ou de manuel.

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 (AERO 470).
- 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

- Propulsion : poussée, rendement et TSFC.
- Performances des avions : portance, traînée et équation de Bréguet.
- Thermodynamique : énergie, pouvoirs calorifiques et rendement de cycle.
- Capstone Design ou Avionics & Systems Engineering : exigences et compromis.

Comment étudier

- Gardez les unités cohérentes : kg, gallons, litres, MJ et Wh.
- Demandez-vous toujours « par quoi ? » : par vol, par passager-km, par kg de carburant.
- Distinguez le CO_2 de combustion du CO_2 sur le cycle de vie.
- Vérifiez chaque économie annoncée par rapport à une référence.
- N'oubliez pas les effets hors CO_2 comme les traînées de condensation.
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse, et refaites les quiz quelques jours plus tard.

Ce qu'il vous faut

- Un tableur (n'importe quel tableur gratuit), ou Python.
- Un ordinateur ou une tablette pour la simulation gratuite PhET Greenhouse Effect.
- Les notes de cours gratuites MIT 16.885J dans un navigateur web.

- Une calculatrice.

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	Aviation et climat : compter le CO_2	Compter le CO_2 ; TP A	EIA
2	Indicateurs d'efficacité	Indicateurs d'efficacité	NASA SFNP
3	Efficacité aérodynamique	L/D et traînée induite	MIT 16.885J
4	Efficacité aérodynamique	Consommation selon Bréguet ; TP B	NASA SFNP
5	Efficacité des moteurs	Efficacité des moteurs ; TP C	MIT 16.885J
6	Carburants d'aviation durables	Bases des SAF	DOE AFDC
7	Carburants d'aviation durables	Cycle de vie des SAF ; TP D ; entraînement de mi-parcours	DOE AFDC
8	Traînées de condensation et effets hors CO_2	Traînées de condensation	NASA-DLR
9	Propulsion électrique et hybride	Batteries et autonomie électrique	NASA SFNP
10	Propulsion électrique et hybride	Systèmes hybrides ; TP E	NASA SFNP
11	Avions à hydrogène	Avions à hydrogène	MIT 16.885J
12	Opérations, bruit et qualité de l'air	Opérations	NASA SFNP
13	Opérations, bruit et qualité de l'air	Bruit et qualité de l'air	EPA
14	Trajectoires vers le zéro net	Scénarios ; TP F	DOE AFDC

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
15	Trajectoires vers le zéro net	Révision ; entraînement à l’examen final	MIT 16.885J

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

Aviation et climat : compter le CO_2

D’où viennent les émissions de l’aviation, facteurs d’émission, CO_2 de combustion ou sur le cycle de vie, et part de l’aviation dans le total.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Utiliser un facteur d’émission pour calculer le CO_2.
- Convertir entre gallons, litres et kilogrammes.
- Expliquer le CO_2 de combustion par rapport au CO_2 sur le cycle de vie.
- Indiquer la part de l’aviation dans le CO_2 mondial.

Notions clés

- Brûler du carburéacteur transforme son carbone en CO_2 ; la masse de CO_2 vaut environ trois fois celle du carburant car chaque atome de carbone gagne deux atomes d’oxygène.
- L’EIA américaine indique 21.50 lb (9.75 kg) de CO_2 par gallon de carburéacteur brûlé.
- Le CO_2 sur le cycle de vie ajoute la production et le transport du carburant ; pour les carburants durables, la culture de la matière première peut absorber du CO_2.
- L’Alternative Fuels Data Center du DOE indique que l’aviation représente 2% de tout le CO_2 et 12% du CO_2 des transports dans le monde.
- L’aviation réchauffe aussi le climat par des effets hors CO_2 comme les traînées de condensation et les NOx.

Équations clés

$$m_{CO_2} = EF \times V_{fuel}$$

`m_CO_2=EF× V_fuel`

Émissions à partir du volume de carburant

$$EF = 9.75\ \mathrm{kg/gal}$$

`EF=9.75\ kg/gal`

Facteur EIA du carburéacteur

$$1\ \mathrm{gal} = 3.785\ \mathrm{L}$$

`1\ gal=3.785\ L`

Conversion de volume

$$\frac{44}{12} \approx 3.67$$

Rapport de masse CO_2/carbone

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Un vol brûle 5000 gallons de carburéacteur. CO_2 ?

1. 5000 × 9.75.

Réponse : 48,750 kg (48.75 t).

Exemple 1.2 Vérifiez les valeurs EIA en livres et en kilogrammes.

1. 21.50 × 0.45359237.

Réponse : 9.75 kg, cohérent.

Exemple 1.3 Combien de litres font 5000 gallons ?

1. 5000 × 3.785.

Réponse : 18,927 L.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. CO_2 pour 1000 gallons ?

   9750 kg.

2. Rapport de masse du CO_2 au carbone ?

   44/12 = 3.67.

3. Part de l'aviation dans le CO_2 des transports (DOE) ?

   12%.

4. Qu'ajoute le cycle de vie ?

Effets de production, de transport et de matière première.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le CO_2 pèse moins que le carburant.

En réalité : Il pèse environ trois fois plus.

Idée reçue : L'aviation n'émet que du CO_2.

En réalité : Les traînées de condensation et les NOx comptent aussi.

Idée reçue : Le CO_2 sur le cycle de vie et celui de combustion sont égaux.

En réalité : Ils diffèrent, surtout pour les SAF.

Cartes mémoire

Facteur d'émission

CO_2 par unité de carburant.

CO_2 de combustion

Issu de la combustion.

CO_2 sur le cycle de vie

Total du puits au sillage.

Effets hors CO_2

Traînées, NOx, suie.

Jet A

Carburéacteur standard.

t CO_2

Tonne de CO_2.

Quiz d'autocontrôle

1. CO_2 pour 5000 gal...

48,750 kg

4875 kg

9750 kg

487,500 kg

48,750 kg. × 9.75.

2. Facteur EIA…

9.75 kg/gal

3.16 kg/gal

21.5 kg/gal

1 kg/gal

9.75 kg/gal. EIA.

3. Part de l’aviation dans tout le CO_2…

2%

12%

25%

0.2%

2%. DOE.

4. Litres dans 5000 gal…

18,927

1321

5000

37,854

18,927. × 3.785.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L’EIA américaine indique 21.50 lb (9.75 kg) de CO_2 par gallon de carburéacteur.

L’Alternative Fuels Data Center du DOE indique que l’aviation représente 2% de tout le CO_2 mondial et 12% de tout le CO_2 des transports.

Sur Saving Planets : Solutions · Observation de la Terre

Sources : U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php) · U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Ressources d’apprentissage gratuites

- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Tableau de l’EIA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Indicateurs d’efficacité

Carburant et CO_2 par passager-kilomètre, intensité énergétique, et comment comparer équitablement les avions.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le carburant par passager-km.
- Calculer le CO_2 par passager-km.
- Appliquer un gain d’efficacité en pourcentage.
- Comparer équitablement les avions.

Notions clés

- Les émissions totales trompent ; normalisez par les passagers et la distance.
- Le coefficient de remplissage compte : les sièges vides augmentent les émissions par passager.
- L’intensité énergétique (MJ par passager-km) compare différents carburants sur une même échelle.
- Un gain d’efficacité réduit le carburant par unité de transport, pas forcément le carburant total si le trafic croît.
- Le Sustainable Flight National Partnership de la NASA vise des gains d’efficacité énergétique de 25–30% pour les avions de transport de nouvelle génération.

Équations clés

$$\frac{V_{fuel}}{n_{pax} d}$$

Carburant par passager-km

$$\frac{m_{CO_2}}{n_{pax} d}$$

CO_2 par passager-km

$$m' = m(1 - g)$$

`m^=m(1-g)`

Après un gain fractionnaire g

$$LF = \frac{n_{pax}}{n_{seats}}$$

LF=_paxn_seats

Facteur de charge

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 5000 gallons transportent 180 passagers sur 2000 km (valeurs d'exemple). Litres par passager-km ?

1. 18,927/(180 × 2000).

Réponse : 0.0526 L.

Exemple 2.2 CO_2 par passager-km ?

1. 48,750/360,000.

Réponse : 0.135 kg (135 g).

Exemple 2.3 Un gain d'efficacité de 25% sur le même trajet. Nouveau CO_2 ?

1. 48,750 × 0.75.

Réponse : 36,563 kg.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Même vol avec 150 passagers : g de CO_2 par pkm ?

   162.5 g.

2. Coefficient de remplissage, 180 sièges sur 200 ?

   0.9.

3. Un gain de 30% sur 48750 kg ?

   34,125 kg.

4. Pourquoi normaliser ?

   Pour comparer équitablement différents trajets et avions.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les gros avions émettent toujours plus par passager.

En réalité : Souvent moins par passager.

Idée reçue : L'efficacité réduit les émissions totales.

En réalité : Seulement si le trafic ne croît pas plus vite.

Idée reçue : Sièges égalent passagers.

En réalité : Utilisez le coefficient de remplissage.

Cartes mémoire

Passager-km

Un passager transporté sur un km.

Facteur de charge

Passagers divisés par sièges.

Intensité énergétique

MJ par pkm.

Effet rebond

Croissance qui compense l'efficacité.

Référence

Cas de référence.

Normalisation

Comparaison par unité.

Quiz d'autocontrôle

1. L par pkm...

0.0526

0.526

5.26

0.00526

0.0526. 18,927/360,000.

2. g de CO_2 par pkm…

135

13.5

1350

48.75

135. 48,750/360,000.

3. Après un gain de 25%…

36,563 kg

12,188 kg

48,750 kg

60,938 kg

36,563 kg. × 0.75.

4. Objectif SFNP…

25–30%

2–3%

50–70%

100%

25–30%. NASA.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que le Sustainable Flight National Partnership vise à permettre des gains d’efficacité énergétique de 25–30% pour des avions de transport de nouvelle génération pouvant utiliser 100% de carburant d’aviation durable et voler sur des trajectoires optimales.

Les indicateurs par passager de ce module sont la façon dont ces gains sont mesurés.

Sur Saving Planets : Performances des avions · Solutions

Sources : NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Ressources d’apprentissage gratuites

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Efficacité aérodynamique

L/D, traînée induite et allongement, ailes à grand allongement et ailes haubanées, et consommation selon l'équation de Bréguet.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la fraction de carburant avec Bréguet.
- Montrer comment L/D réduit le carburant.
- Calculer le coefficient de traînée induite.
- Expliquer pourquoi des ailes longues et fines économisent du carburant.

Notions clés

- D'après Bréguet, la fraction de carburant vaut 1 − exp(−Rc/(V·L/D)).
- Un L/D plus élevé signifie moins de carburant pour la même distance.
- La traînée induite C_Di = C_L²/(πeAR) diminue quand l'allongement augmente.
- Les ailes très fines ont besoin de haubans (conceptions haubanées) pour rester légères et rigides.
- La pièce maîtresse du partenariat de la NASA est un démonstrateur X-plane à pleine échelle testant une conception aérodynamique ultra-efficace.

Équations clés

$$\frac{W_f}{W_i} = 1 - e^{-Rc/(V\,L/D)}$$

```
(W_f)/(W_i)=1-e^-Rc/(V L/D)
```

Fraction de carburant

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi e AR}$$

```
C_D_i=(C_L^2)/(π eAR)
```

Traînée induite

$$AR = b^2/S$$

```
AR=b^2/S
```

Allongement

$$L/D = C_L/C_D$$

`L/D=C_L/C_D`

Finesse

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 3000 km à 230 m/s, c = 0.6 /h, L/D = 17 (valeurs de manuel). Fraction de carburant ?

1. Rc/(V L/D) = 3 × 10^6 × 1.667 × 10^{-4}/(230 × 17) = 0.1279.
2. 1 − e^(−0.1279).

Réponse : 0.120.

Exemple 3.2 Idem avec L/D = 20.

1. 1 − e^(−0.1087).

Réponse : 0.103 : 14.2% de carburant en moins.

Exemple 3.3 C_Di pour C_L = 0.5, e = 0.85, AR = 9 ?

1. 0.25/(π × 0.85 × 9).

Réponse : 0.0104.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. C_Di pour AR = 12 ?

   0.0078.

2. Pour AR = 19 (classe haubanée) ?

   0.0049.

3. Allongement pour b = 36 m, S = 120 m^2 ?

   10.8.

4. Pourquoi haubaner une aile fine ?

   Pour la garder légère et rigide.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La traînée n’est que du frottement.

En réalité : La traînée induite est importante en croisière.

Idée reçue : Des ailes plus longues ne coûtent rien.

En réalité : Limites de masse et de porte d’embarquement.

Idée reçue : Le carburant varie linéairement avec L/D.

En réalité : Il suit l’exponentielle.

Cartes mémoire

L/D

Rapport portance/traînée.

Traînée induite

Traînée due à la portance.

Allongement

b^2/S.

Facteur d’Oswald

Efficacité d’envergure e.

Aile haubanée

Aile fine avec haubans.

Fraction de carburant

Carburant rapporté à la masse au décollage.

Quiz d’autocontrôle

1. Fraction de carburant, L/D 17…

0.120

0.103

0.128

0.017

0.120. Breguet.

2. Carburant économisé à L/D 20…

14.2%

17.6%

3%

30%

14.2%. Comparez les fractions.

3. C_Di AR 9…

0.0104

0.104

0.00104

0.0078

0.0104. $C_L^2/(\pi eAR)$.

4. Un AR plus élevé…

réduit la traînée induite

l’augmente

aucun effet

n’augmente que le frottement

réduit la traînée induite. Formule.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que la pièce maîtresse de son Sustainable Flight National Partnership sera un démonstrateur X-plane à pleine échelle conçu pour tester une conception aérodynamique ultra-efficace, afin d'éclairer la prochaine génération d'avions monocouloirs.

La NASA prévoit le premier vol du démonstrateur au plus tôt fin 2026.

Sur Saving Planets : Aérodynamique I · Performances des avions

Sources : NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Efficacité des moteurs

Rendements thermique, propulsif et global, taux de dilution et cœurs de moteur avancés.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le rendement propulsif.
- Combiner rendement thermique et rendement propulsif.
- Expliquer pourquoi un taux de dilution élevé économise du carburant.
- Relier le rendement à la TSFC.

Notions clés

- Le rendement global est le rendement thermique multiplié par le rendement propulsif.
- Le rendement propulsif 2/(1 + V_e/V_0) augmente quand la vitesse d’éjection se rapproche de la vitesse de vol.
- Les turbosoufflantes à fort taux de dilution déplacent plus d’air plus lentement, ce qui augmente le rendement propulsif.
- Des cœurs plus chauds, à plus haute pression et compacts augmentent le rendement thermique.
- Les travaux Hybrid Thermally Efficient Core de la NASA développent des cœurs de turbine à haute densité de puissance pour les avions de transport de nouvelle génération.

Équations clés

$$\eta_p = \frac{2}{1 + V_e/V_0}$$

`_p=(2)/(1+V_e/V_0)`

Rendement propulsif

$$\eta_o = \eta_{th}\eta_p$$

`_o=_th_p`

Rendement global

$$TSFC \propto \frac{V_0}{\eta_o}$$

Consommation de carburant par poussée

$$BPR = \dot{m}_{bypass}/\dot{m}_{core}$$

`BPR= m_bypass/ m_core`

Taux de dilution

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 V_0 = 230 m/s, V_e = 400 m/s. η_p?

1. 2/(1 + 400/230).

Réponse : 0.730.

Exemple 4.2 Abaissez V_e à 300 m/s (dilution plus élevée).

1. 2/(1 + 300/230).

Réponse : 0.868.

Exemple 4.3 Avec η_th = 0.5, rendement global à V_e = 300 ?

1. 0.5 × 0.868.

Réponse : 0.434.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. η_p à V_e = 350 m/s ?

   0.793.

2. Global à V_e = 400, η_th = 0.5 ?

   0.365.

3. Économie de carburant en passant de 0.365 à 0.434 en global ?

   15.9% de carburant en moins pour le même travail.

4. Qu'est-ce que le taux de dilution ?

   Débit massique secondaire divisé par débit du cœur.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un jet plus rapide est plus efficace.

En réalité : Il réduit le rendement propulsif.

Idée reçue : Le rendement thermique est tout.

En réalité : Le rendement propulsif compte autant.

Idée reçue : La dilution ne coûte rien.

En réalité : Des soufflantes plus grandes ajoutent masse et traînée.

Cartes mémoire

Rendement propulsif

Part utile de la puissance de poussée.

Rendement thermique

Rendement du cycle.

Rendement global

Produit des deux.

Taux de dilution

Air de la soufflante sur air du cœur.

TSFC

Carburant par poussée et par unité de temps.

Cœur du moteur

Compresseur, chambre de combustion, turbine.

Quiz d’autocontrôle

1. η_p à 400…

0.730

0.868

0.575

1.0

0.730. 2/(1 + 1.739).

2. η_p à 300...

0.868

0.730

0.5

0.95

0.868. 2/(1 + 1.304).

3. Global...

0.434

0.868

0.5

0.25

0.434. 0.5 × 0.868.

4. Forte dilution...

augmente η_p

réduit η_p

augmente V_e

aucun effet

augmente η_p. Jet plus lent.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que ses travaux Hybrid Thermally Efficient Core accélèrent le développement et la démonstration de technologies avancées de turbomoteurs dans un cœur à haute densité de

puissance pour les avions commerciaux de nouvelle génération.

Les deux rendements de ce module influent directement sur le carburant brûlé par passager.

Sur Saving Planets : Propulsion · Thermodynamique

Sources : NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Ressources d’apprentissage gratuites

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Carburants d’aviation durables

Ce que sont les SAF, filières de production, limites de mélange, réductions sur le cycle de vie et objectifs nationaux.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Définir les SAF.
- Calculer les économies sur le cycle de vie d’un mélange.
- Dimensionner les économies au niveau des objectifs.
- Expliquer les limites de mélange.

Notions clés

- Le DOE définit les SAF comme un carburant alternatif issu de matières premières non pétrolières qui réduit la pollution de l’air due au transport aérien.
- Les SAF peuvent être mélangés à des taux compris entre 10% et 50%, selon la matière première et la filière de production (ASTM D7566).
- Les SAF mélangés fonctionnent dans les avions et infrastructures existants.
- Les économies sur le cycle de vie sont proportionnelles au taux de mélange multiplié par la réduction propre du SAF.
- Le SAF Grand Challenge vise 3 milliards de gallons en 2030 et 35 milliards en 2050 avec au moins 50% de réduction sur le cycle de vie.

Équations clés

$$s = b \times r$$

`s=b× r`

Économie du mélange = mélange × réduction du SAF

$$m_{saved} = V \times EF \times r$$

`m_saved=V× EF× r`

CO_2 évité par volume de SAF

$$b \leq 0.5$$

Mélange maximal (selon la filière)

$$EF = 9.75 \text{ kg/gal}$$

`EF=9.75\ kg/gal`

Facteur EIA

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Un mélange à 50% de SAF avec 50% de réduction sur le cycle de vie. Économie globale ?

1. 0.5 × 0.5.

Réponse : 25%.

Exemple 5.2 3 milliards de gallons avec 50% de réduction, en prenant le facteur EIA comme référence (simplifié).

1. $3 \times 10^9 \times 9.75 \times 0.5$.

Réponse : Environ 14.6 millions de tonnes de CO_2 par an.

Exemple 5.3 Idem pour 35 milliards de gallons.

1. $35 \times 10^9 \times 9.75 \times 0.5$.

Réponse : Environ 171 millions de tonnes.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un mélange à 10% avec 80% de réduction ?

   8%.

2. Vols ayant utilisé des SAF selon l'OACI, via le DOE ?

   Plus de 360000 dans 46 aéroports.

3. Pourquoi une limite de mélange ?

Les propriétés du carburant doivent respecter les spécifications Jet A.

4. Les SAF exigent-ils de nouveaux moteurs ?

   Les mélanges fonctionnent dans les avions existants.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les SAF n'émettent rien.

En réalité : Ils brûlent en CO_2 ; les économies se font sur le cycle de vie.

Idée reçue : N'importe quel mélange convient.

En réalité : Les limites dépendent de la filière.

Idée reçue : Les SAF n'affectent que le CO_2.

En réalité : La NASA et le DLR ont observé moins de cristaux de glace dans les traînées.

Cartes mémoire

SAF

Carburant d'aviation durable.

HEFA

Filière des esters et acides gras hydrotraités.

Limite de mélange

Part maximale de SAF.

ASTM D7566

Spécification du carburéacteur synthétique.

Réduction sur le cycle de vie

Baisse par rapport au carburant fossile.

Carburant de substitution directe

Fonctionne dans les systèmes existants.

Quiz d'autocontrôle

1. Économie du mélange…

25%

50%

100%

75%

25%. 0.5 × 0.5.

2. Économies en 2030…

≈ 14.6 Mt

≈ 1.5 Mt

≈ 146 Mt

≈ 29 Mt

≈ 14.6 Mt. × 9.75 × 0.5.

3. Plage de mélange…

10–50%

0–5%

90–100%

illimitée

10–50%. DOE.

4. Objectif 2050…

35 milliards de gal

3 milliards de gal

360000 gal

46 milliards de gal

35 milliards de gal. DOE.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L’Alternative Fuels Data Center du DOE indique que plus de 360000 vols commerciaux ont utilisé des SAF dans 46 aéroports (selon l’OACI), et le SAF Grand Challenge vise 3 milliards de gallons en 2030 et 35 milliards de gallons en 2050 avec au moins 50% de réduction sur le cycle de vie.

Le DOE note que les trois usines américaines existantes utilisent la filière HEFA, des usines alcool-vers-kérosène étant attendues.

Sur Saving Planets : Solutions · Chimie générale I

Sources : U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Ressources d’apprentissage gratuites

- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): Page SAF du DOE.
- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Facteurs de l’EIA.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Traînées de condensation et effets hors CO_2

Comment se forment les traînées de condensation, pourquoi elles réchauffent, suie et cristaux de glace, et comment carburants et routage les réduisent.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Expliquer la formation des traînées.
- Calculer les réductions de cristaux de glace.
- Décrire le réchauffement hors CO_2.
- Citer des options d'atténuation.

Notions clés

- Les traînées se forment quand les gaz d'échappement chauds et humides se mélangent à l'air froid et que l'eau se condense et gèle sur des particules de suie.
- Les traînées persistantes peuvent s'étendre en cirrus qui piègent la chaleur sortante.
- Moins de particules de suie signifie des cristaux de glace moins nombreux et plus gros qui disparaissent plus tôt.
- La NASA et le DLR ont constaté que des carburants durables à combustion plus propre produisaient 50%–70% de cristaux de glace en moins en croisière.
- Contourner l'air sursaturé en glace peut éviter les traînées persistantes.

Équations clés

$$N = EI \times m_f$$

`N=EI× m_f`

Cristaux de glace à partir de l'indice d'émission et du carburant

$$N' = N(1 - r)$$

`N^=N(1-r)`

Après une réduction r

$$r \in [0.5, 0.7]$$

Plage NASA-DLR

$$\Delta T \propto F$$

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Un indice d'émission d'exemple de 10^{15} cristaux de glace par kg de carburant. Avec une réduction de 50% ?

1. $10^{15} \times 0.5$.

Réponse : 5×10^{14} par kg.

Exemple 6.2 Avec une réduction de 70% ?

1. $10^{15} \times 0.3$.

Réponse : 3×10^{14} par kg.

Exemple 6.3 Un vol brûle 15000 kg de carburant en croisière (exemple). Cristaux avec la réduction de 70% ?

1. $3 \times 10^{14} \times 15{,}000$.

Réponse : 4.5×10^{18}.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Pourquoi les traînées réchauffent-elles la nuit ?

   Elles piègent l'infrarouge sortant sans soleil à réfléchir.

2. Qu'est-ce qui amorce la glace des traînées ?

   La suie et d'autres particules.

3. Réduction de 5×10^{14} à 3×10^{14} ?

   40%.

4. Une solution opérationnelle ?

   Contourner l'air sursaturé en glace.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les traînées ne sont que de l’eau, donc inoffensives.

En réalité : Elles peuvent ajouter du réchauffement.

Idée reçue : Toutes les traînées persistent.

En réalité : Seulement dans l’air sursaturé en glace.

Idée reçue : Seul le CO_2 compte.

En réalité : Les effets hors CO_2 sont importants.

Cartes mémoire

Traînée de condensation

Traînée formée par condensation.

Cirrus de traînée

Traînées persistantes étalées.

Sursaturation en glace

Air capable de faire croître la glace.

Suie

Particules de carbone.

Indice d’émission

Quantité par kg de carburant.

Forçage hors CO_2

Réchauffement autre que le CO_2.

Quiz d’autocontrôle

1. Réduction de 50%...

5×10^{14}

5×10^{15}

10^{14}

0

5×10^{14}. × 0.5.

2. Plage NASA-DLR...

50%–70%

5%–7%

90%–100%

20%

50%–70%. NASA.

3. Cristaux par vol...

4.5×10^{18}

4.5×10^{14}

3×10^{14}

1.5×10^{19}

4.5×10^{18}. × 15,000.

4. La glace des traînées se forme sur...

les particules de suie

CO_2

l'azote

l'ozone

les particules de suie. Nucléation.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA rapporte que des carburéacteurs à combustion plus propre issus de sources durables peuvent produire 50%–70% de traînées de cristaux de glace en moins à l'altitude de croisière,

d’après des recherches conjointes de la NASA et du DLR (Centre aérospatial allemand).

La NASA note que les traînées de cristaux de glace peuvent persister des heures dans la haute atmosphère et modifier la façon dont la Terre se réchauffe et se refroidit.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Transferts thermiques

Sources : NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/)

Ressources d’apprentissage gratuites

- NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/): Étude de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Propulsion électrique et hybride

Densité énergétique des batteries, rendement de la chaîne de traction, autonomie électrique, et où les systèmes hybrides aident.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Comparer les densités énergétiques des batteries et du carburant.
- Tenir compte du rendement de la chaîne de traction.
- Calculer l’autonomie d’un avion électrique.
- Identifier les missions adaptées.

Notions clés

- Le carburéacteur stocke environ 43 MJ/kg (11944 Wh/kg) ; les batteries actuelles stockent quelques centaines de Wh/kg (valeurs de manuel).
- Les chaînes de traction électriques convertissent l’énergie bien plus efficacement (environ 90%) que les turbines (environ 35%), ce qui réduit l’écart (valeurs de manuel).
- L’autonomie électrique sur batterie vaut R = (e η/g)(L/D)(m_b/m).
- Les batteries ne s’allègent pas en se déchargeant, contrairement au carburant.
- La NASA indique que la propulsion électrifiée offre de nouvelles possibilités de réduire la consommation de carburant et d’énergie, des petits avions de passagers aux avions monocouloirs.

Équations clés

$$R = \frac{e\eta}{g}\frac{L}{D}\frac{m_b}{m}$$

`R=e/gL/D(m_b)/(m)`

Distance franchissable sur batteries

$$\frac{e_{fuel}}{e_{batt}}$$

Rapport de densité énergétique

$$e = 250\ \mathrm{Wh/kg} = 9\times10^{5}\ \mathrm{J/kg}$$

`e=250\ Wh/kg=9×10^5\ J/kg`

Batterie d’exemple

$$1\ \mathrm{Wh} = 3600\ \mathrm{J}$$

```
1\ Wh=3600\ J
```

Conversion

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Carburéacteur à 43 MJ/kg en Wh/kg, et rapport avec une batterie de 250 Wh/kg ?

1. $43 \times 10^6/3600 = 11{,}944$ Wh/kg.
2. 11,944/250.

Réponse : 47.8 fois.

Exemple 7.2 Corrigez du rendement : turbine 0.35, électrique 0.9.

1. $47.8 \times 0.35/0.9$.

Réponse : Environ 18.6 fois.

Exemple 7.3 Autonomie avec e = 250 Wh/kg, $\eta = 0.8$, L/D = 15, fraction batterie 0.3.

1. $9 \times 10^5 \times 0.8/9.80665 \times 15 \times 0.3$.

Réponse : Environ 330 km.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Autonomie si l'énergie de la batterie double à 500 Wh/kg ?

   Environ 661 km.

2. 250 Wh/kg en J/kg ?

   9×10^5.

3. Pourquoi les hybrides aident-ils ?

   L'électrique renforce le décollage et la montée tandis que le carburant fournit l'autonomie.

4. Meilleures premières missions ?

   Vols régionaux courts et vols d’entraînement.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les batteries égaleront bientôt le carburéacteur.

En réalité : L’écart reste grand même après le rendement.

Idée reçue : Électrique veut dire zéro émission.

En réalité : Cela dépend du réseau électrique.

Idée reçue : Le poids de la batterie diminue en vol.

En réalité : Il reste constant.

Cartes mémoire

Charge spécifique

Énergie par unité de masse.

Rendement de la chaîne de traction

Rendement de la batterie à l’arbre.

Hybride-électrique

Carburant plus puissance électrique.

Fraction batterie

Masse de la batterie sur masse de l’avion.

Wh/kg

Unité d’énergie spécifique des batteries.

Intensité du réseau

CO_2 par kWh.

Quiz d’autocontrôle

1. Rapport d’énergie…

47.8

4.78

478

18.6

47.8. 11,944/250.

2. Corrigé du rendement…

18.6

47.8

2.6

100

18.6. × 0.35/0.9.

3. Autonomie électrique…

≈ 330 km

≈ 33 km

≈ 3300 km

≈ 660 km

≈ 330 km. Formule.

4. Autonomie avec énergie doublée…

≈ 661 km

≈ 330 km

≈ 1320 km

≈ 165 km

≈ 661 km. Linéaire.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que la propulsion électrifiée offre de nouvelles possibilités de réduire la consommation de carburant et d'énergie dans l'aviation, des petits avions de passagers aux avions monocouloirs, grâce à de nouvelles technologies, de nouveaux concepts, des avions d'essai et des installations au sol.

L'équation d'autonomie de ce module montre pourquoi les premiers avions électriques volent sur des trajets courts. Les densités énergétiques ici sont des valeurs de manuel.

Sur Saving Planets : Circuits · Solutions

Sources : NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Avions à hydrogène

Énergie de l’hydrogène par masse et par volume, dimensionnement des réservoirs, émissions d’eau et compromis de conception.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Comparer l’hydrogène et le carburéacteur en masse et en volume.
- Dimensionner le volume d’un réservoir d’hydrogène.
- Calculer l’eau produite.
- Expliquer les compromis de conception.

Notions clés

- L’hydrogène contient environ 120 MJ/kg, 2.8 fois le carburéacteur, mais l’hydrogène liquide ne pèse qu’environ 70.8 kg/m³ (valeurs de manuel).
- Par litre, l’hydrogène liquide contient environ 8.5 MJ contre environ 34.4 MJ pour le carburéacteur, donc les réservoirs sont environ quatre fois plus grands.
- Brûler l’hydrogène ou l’utiliser dans une pile à combustible produit de l’eau, environ 8.9 kg par kg d’hydrogène, et aucun CO_2 au niveau de l’avion.
- Les réservoirs cryogéniques sont encombrants et lourds, et façonnent tout l’avion.
- L’hydrogène vert dépend d’une électricité propre pour l’électrolyse.

Équations clés

$$e_v = \rho\, e_m$$

`e_v=ρ e_m`

Énergie par volume

$$V = \frac{E}{e_v}$$

`V=(E)/(e_v)`

Volume du réservoir

$$m_{H_2O} = 8.94\, m_{H_2}$$

`m_H_20=8.94 m_H_2`

Eau issue de l’hydrogène

$$\frac{e_{H_2}}{e_{jet}} = \frac{120}{43}$$

`_H_2e_jet=120/43`

Rapport de masse

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Hydrogène contre carburéacteur en masse ?

1. 120/43.

Réponse : 2.79 fois plus par kg.

Exemple 8.2 Énergie volumique de l’hydrogène liquide ?

1. 70.8 × 120/1000.

Réponse : 8.50 MJ/L.

Exemple 8.3 Rapport de volume de réservoir par rapport au carburéacteur (0.8 kg/L, manuel) ?

1. 34.4/8.50.

Réponse : Environ 4.05 fois plus grand.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Eau produite par 100 kg d’hydrogène ?

   Environ 894 kg.

2. Énergie volumique du carburéacteur ?

   0.8 × 43 = 34.4 MJ/L.

3. Pourquoi les réservoirs d’hydrogène sont-ils lourds ?

   Parois cryogéniques isolées.

4. Quand l’hydrogène est-il bas carbone ?

   Quand il est produit avec une énergie propre.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L’hydrogène est léger, donc les réservoirs sont petits.

En réalité : Une faible masse volumique impose de grands réservoirs.

Idée reçue : Les avions à hydrogène n’émettent rien.

En réalité : Ils émettent de la vapeur d’eau, qui peut former des traînées.

Idée reçue : Tout l’hydrogène est vert.

En réalité : La plupart est aujourd’hui produit à partir de gaz fossile.

Cartes mémoire

LH_2

Hydrogène liquide.

Cryogénique

Stockage à très basse température.

Pile à combustible

Source d’énergie électrochimique.

Électrolyse

Décomposition de l’eau par l’électricité.

Énergie volumique

Énergie par volume.

Hydrogène vert

Produit avec une électricité propre.

Quiz d’autocontrôle

1. Rapport de masse...

2.79

0.36

4.05

120

2.79. 120/43.

2. MJ/L de LH_2…

8.50

34.4

120

0.85

8.50. 70.8 × 0.12.

3. Rapport des réservoirs…

≈ 4

≈ 0.25

≈ 1

≈ 40

≈ 4. 34.4/8.5.

4. Eau par kg de H_2…

≈ 8.9 kg

≈ 1 kg

≈ 18 kg

0

≈ 8.9 kg. 18.015/2.016.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le Sustainable Flight National Partnership de la NASA couvre les technologies avancées de véhicules, les opérations efficaces et les carburants d'aviation durables ; ce module ajoute l'hydrogène comme option supplémentaire, où le volume des réservoirs est le principal défi de conception.

Les valeurs relatives à l'hydrogène dans ce module sont des valeurs de manuel, pas des chiffres de la NASA.

Sur Saving Planets : Chimie générale I · Thermodynamique

Sources : NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Opérations, bruit et qualité de l’air

Roulage et trajectoires efficaces, arithmétique des décibels, bruit aéroportuaire, qualité de l’air locale et essence d’aviation au plomb.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Estimer les économies de carburant au roulage.
- Additionner des niveaux sonores en décibels.
- Appliquer la loi en carré inverse.
- Expliquer le problème du carburant au plomb.

Notions clés

- Les opérations comptent : roulage sur un moteur, descentes continues et trajectoires optimales réduisent le carburant avec les avions actuels.
- Les décibels s’additionnent de façon logarithmique : deux sources égales sont plus fortes de 3 dB, pas de deux fois le nombre.
- En champ libre, le niveau sonore baisse d’environ 6 dB à chaque doublement de la distance.
- Les NOx, particules et CO des moteurs affectent la qualité de l’air près des aéroports.
- L’EPA indique que la plupart des avions utilisant du carburant au plomb sont des avions à moteur à pistons transportant 2–10 passagers ; les avions de ligne n’utilisent pas de carburant au plomb.

Équations clés

$$L = 10 \log_{10} \sum 10^{L_i/10}$$

`L=10_1010^L_i/10`

Addition de niveaux sonores

$$\Delta L = 20 \log_{10}(r_2/r_1)$$

`Δ L=20_10(r_2/r_1)`

Propagation sphérique

$$m_f = \dot{m}_f t$$

`m_f= m_ft`

Carburant consommé

$$m_{CO_2} = 3.16\, m_f$$

```
m_CO_2=3.16 m_f
```

CO_2 par kg de carburant (manuel)

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Deux sources de 80 dB ensemble ?

1. $10 \log_{10}(2 \times 10^8)$.

Réponse : 83.0 dB.

Exemple 9.2 Baisse de niveau quand la distance double ?

1. $20 \log_{10} 2$.

Réponse : 6.02 dB.

Exemple 9.3 Rouler 10 minutes sur un moteur au lieu de deux à 0.1 kg/s chacun (exemple). Carburant et CO_2 économisés ?

1. 0.1 × 600 = 60 kg.
2. 60 × 3.16.

Réponse : 60 kg de carburant, environ 190 kg de CO_2.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Dix sources égales de 70 dB ?

   80 dB.

2. Baisse quand la distance quadruple ?

   12.0 dB.

3. Carburant pour deux moteurs pendant 10 minutes ?

120 kg.

4. Quels avions utilisent du carburant au plomb (EPA) ?

   Surtout les avions à moteur à pistons.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les décibels s'additionnent linéairement.
En réalité : Ils s'additionnent de façon logarithmique.

Idée reçue : Les opérations ne peuvent pas réduire les émissions.
En réalité : Elles réduisent le carburant dès aujourd'hui.

Idée reçue : Les avions de ligne brûlent du carburant au plomb.
En réalité : L'EPA dit que les avions de ligne non.

Cartes mémoire

Décibel

Mesure logarithmique du son.

Loi en carré inverse

L'intensité baisse avec r^2.

Roulage sur un moteur

Rouler sur un seul moteur.

Descente continue

Descente au ralenti sans paliers.

NOx

Oxydes d'azote.

Avgas

Essence d'aviation.

Quiz d'autocontrôle

1. Two 80 dB...

83.0 dB

160 dB

80 dB

86 dB

83.0 dB. +3 dB.

2. Doublement de la distance…

−6.02 dB

−3 dB

−10 dB

−20 dB

−6.02 dB. 20 log 2.

3. CO_2 économisé au roulage…

≈ 190 kg

≈ 60 kg

≈ 19 kg

≈ 600 kg

≈ 190 kg. 60 × 3.16.

4. Utilisateurs de carburant au plomb…

avions à pistons

avions de ligne

aux fusées

hélicoptères uniquement

avions à pistons. EPA.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L’EPA indique que la majorité des avions fonctionnant au carburant au plomb sont des avions à moteur à pistons, transportant généralement 2–10 passagers, et que les avions à réaction de transport commercial n’utilisent pas de carburant au plomb.

L’EPA a rendu une décision finale selon laquelle les émissions de plomb de certains moteurs d’avion mettent en danger la santé et le bien-être publics, ce qui oblige l’EPA et la FAA à fixer des normes.

Sur Saving Planets : Solutions · Performances des avions

Sources : U.S. EPA: Regulations for lead emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-lead-emissions-aircraft)

Ressources d’apprentissage gratuites

- U.S. EPA: Regulations for lead emissions from aircraft (https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-lead-emissions-aircraft): Page de l’EPA.
- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Cours gratuit du MIT.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Trajectoires vers le zéro net

Croissance du trafic, efficacité, SAF, nouveaux avions et compensations combinés en scénarios à l’horizon 2050.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Projeter la croissance du trafic.
- Combiner les réductions de façon multiplicative.
- Construire un scénario simple par tranches.
- Discuter des instruments politiques.

Notions clés

- Émissions = trafic × énergie par unité de trafic × carbone par unité d’énergie.
- La croissance se compose : 3% par an double le trafic en environ 24 ans (taux d’exemple).
- Les réductions se multiplient : (1 − gain d’efficacité) × (1 − économie SAF sur le cycle de vie).
- Les émissions restantes exigent de nouveaux avions, plus de SAF ou des absorptions.
- Le DOE note que le CORSIA de l’OACI plafonne le CO_2 net de l’aviation internationale aux niveaux de 2020 jusqu’en 2035.

Équations clés

$$E = T \times \frac{MJ}{T} \times \frac{CO_2}{MJ}$$

```
E=T×MJ/T×(CO_2)/(MJ)
```

Identité des émissions

$$T_n = T_0(1+g)^n$$

```
T_n=T_0(1+g)^n
```

Croissance du trafic

$$E' = E(1-a)(1-b)$$

```
E^=E(1-a)(1-b)
```

Réductions combinées

$$n_2 = \frac{\ln 2}{\ln(1+g)}$$

`n_2=(2)/((1+g))`

Temps de doublement

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Le trafic croît de 3% par an de 2026 à 2050 (exemple). Facteur de croissance ?

1. 1.03^{24}.

Réponse : 2.03.

Exemple 10.2 Avec un gain d'efficacité de 25%, émissions par rapport à aujourd'hui ?

1. 2.033 × 0.75.

Réponse : 1.52.

Exemple 10.3 Ajoutez des SAF avec une économie de 50% sur le cycle de vie à l'échelle de la flotte.

1. 1.525 × 0.5.

Réponse : 0.762, encore 76% du niveau actuel.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Temps de doublement à 3% ?

   23.4 ans.

2. Économie nécessaire pour passer de 0.762 à 0 ?

   Tout le reste : nouveaux avions, plus de SAF et absorptions.

3. Années de 2026 à 2050 ?

   24.

4. Que plafonne le CORSIA ?

Le CO_2 net de l'aviation internationale aux niveaux de 2020 jusqu'en 2035.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les réductions s'additionnent.

En réalité : Elles se multiplient.

Idée reçue : L'efficacité seule atteint le zéro net.

En réalité : La croissance la dépasse.

Idée reçue : Les compensations réduisent les émissions au moteur.

En réalité : Elles compensent ailleurs.

Cartes mémoire

Zéro net

Émissions équilibrées par des absorptions.

Tranche

Part d'un plan de réduction.

CORSIA

Dispositif de compensation de l'OACI.

Croissance du trafic

Hausse des passagers-km.

Absorption

Retirer du CO_2 de l'air.

Scénario

Ensemble cohérent d'hypothèses.

Quiz d'autocontrôle

1. Facteur de croissance...

2.03

1.72

1.03

3.0

2.03. 1.03^{24}.

2. Avec l’efficacité…

1.52

2.03

0.76

1.0

1.52. × 0.75.

3. Avec aussi les SAF…

0.762

0.25

1.52

0

0.762. × 0.5.

4. Année cible du zéro net…

2050

2030

2035

2100

2050. NASA.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que son Sustainable Flight National Partnership travaille avec l'industrie, le monde académique et d'autres agences vers l'objectif du secteur aérien de zéro émission nette de carbone d'ici 2050.

Le DOE note que le CORSIA de l'OACI plafonne le CO_2 net de l'aviation internationale aux niveaux de 2020 jusqu'en 2035.

Sur Saving Planets : Solutions · Capstone Design

Sources : NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/) · U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): NASA SFNP.
- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): Page SAF du DOE.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

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

1. Aviation et climat : compter le CO_2
   4 exercices
2. Indicateurs d'efficacité
   4 exercices
3. Efficacité aérodynamique
   4 exercices
4. Efficacité des moteurs
   4 exercices
5. Carburants d'aviation durables
   4 exercices
6. Traînées de condensation et effets hors CO_2
   4 exercices
7. Propulsion électrique et hybride
   4 exercices
8. Avions à hydrogène
   4 exercices
9. Opérations, bruit et qualité de l'air
   4 exercices
10. Trajectoires vers le zéro net
    4 exercices

Le laboratoire (Sustainable aviation lab)

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

Chaque TP se fait dans un tableur ou une simulation gratuite, donc sans danger lié au carburant, aux batteries ou à l'hydrogène. Ne manipulez ni carburants, ni batteries, ni gaz sous pression pour ce cours. Faites des pauses d'écran, tenez-vous bien droit et gardez les câbles hors des passages.

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

TP A : Calculateur de CO_2 d'un vol

SEMAINE 1

Objectif : Construisez un tableur qui convertit le carburant brûlé en CO_2 et en CO_2 par passager-km.

$$m = 9.75V$$

`m=9.75V`

Facteur EIA

Mode opératoire

1. Saisissez le carburant en gallons pour trois vols d'exemple.
2. Calculez le CO_2 avec les 9.75 kg/gal de l'EIA.
3. Divisez par passagers × km.
4. Comparez vols courts et longs.

Tableau de données

Carburant (gal)	**CO_2 (kg)**
1000	9750
5000	48,750
20,000	195,000

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 5000 × 9.75 = 48,750 kg.
2. 20,000 × 9.75 = 195,000 kg.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)

Lien avec la planète : EIA : 9.75 kg de CO_2 par gallon de carburéacteur. U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php)

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

TP B : L/D et consommation

SEMAINE 4

Objectif : Voyez comment la finesse modifie le carburant pour un trajet de 3000 km.

$$W_f/W_i = 1 - e^{-Rc/(V\ L/D)}$$

`W_f/W_i=1-e^-Rc/(V L/D)`

Fraction de carburant

Mode opératoire

1. Saisissez R = 3000 km, V = 230 m/s, c = 0.6 /h.
2. Calculez la fraction de carburant pour L/D = 15, 17 et 20.
3. Calculez l’économie par rapport à L/D = 17.
4. Ajoutez les effets de l’allongement sur la traînée induite.

Tableau de données

L/D	Fraction de carburant
15	0.135
17	0.120
20	0.103

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 1 − e^(−0.1449) = 0.135.
2. 1 − e^(−0.1087) = 0.103.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

Lien avec la planète : Le démonstrateur X-plane de la NASA teste une conception aérodynamique ultra-efficace. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

TP C : Explorateur du rendement propulsif

SEMAINE 5

Objectif : Calculez les rendements propulsif et global pour différentes vitesses d’éjection.

$$\eta_p = 2/(1 + V_e/V_0)$$

_p=2/(1+V_e/V_0)

Rendement propulsif

Mode opératoire

1. Saisissez V_0 = 230 m/s et η_th = 0.5.
2. Calculez η_p pour V_e = 400, 350 et 300 m/s.
3. Calculez le rendement global.
4. Reliez-le au taux de dilution.

Tableau de données

V_e (m/s)	η_p	η_o
400	0.730	0.365
350	0.793	0.397
300	0.868	0.434

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 2/(1 + 350/230) = 0.793.
2. 0.5 × 0.793 = 0.397.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

Lien avec la planète : NASA : Hybrid Thermally Efficient Core développe des cœurs de turbine à haute densité de puissance. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

TP D : Calculateur de mélange SAF

SEMAINE 7

Objectif : Calculez les économies sur le cycle de vie selon les mélanges et les réductions des SAF.

$$s = b \times r$$

s=b× r

Économie du mélange

Mode opératoire

1. Saisissez des mélanges de 10%, 30% et 50%.
2. Saisissez une réduction SAF sur le cycle de vie de 50%, puis de 80%.
3. Calculez l'économie et le CO_2 évité pour 1000 gallons.
4. Comparez avec les objectifs du Grand Challenge.

Tableau de données

Mélange	Économie pour r = 50%	kg de CO_2 évités pour 1000 gal
10%	5%	487.5
30%	15%	1462.5
50%	25%	2437.5

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 0.3 × 0.5 = 15%.
2. 9750 × 0.25 = 2437.5 kg.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

Lien avec la planète : DOE : les SAF peuvent être mélangés de 10% à 50% selon la filière. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel)

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

TP E : Autonomie d’un avion électrique

SEMAINE 10

Objectif : Calculez l’autonomie électrique sur batterie pour plusieurs densités énergétiques.

$$R = (e\eta/g)(L/D)(m_b/m)$$

`R=(e/g)(L/D)(m_b/m)`

Distance électrique

Mode opératoire

1. Saisissez η = 0.8, L/D = 15, fraction batterie 0.3.
2. Calculez l’autonomie pour 250, 400 et 500 Wh/kg.
3. Comparez avec une liaison régionale de 300 km.
4. Modifiez la fraction batterie.

Tableau de données

e (Wh/kg)	Distance (km)
250	330
400	529
500	661

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 400 × 3600 × 0.8/9.80665 × 15 × 0.3 = 529 km.
2. 500 Wh/kg doublent l’autonomie obtenue avec 250 Wh/kg.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/)

Lien avec la planète : NASA : la propulsion électrifiée peut réduire la consommation de carburant et d'énergie. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

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

TP F : Modèle de tranches vers le zéro net

SEMAINE 14

Objectif : Explorez le réchauffement dans PhET Greenhouse Effect, puis construisez un scénario aérien 2026–2050.

$$E = (1+g)^n(1-a)(1-b)$$

E=(1+g)^n(1-a)(1-b)

Émissions du scénario

Mode opératoire

1. Dans PhET Greenhouse Effect, ajoutez des gaz à effet de serre et observez la réaction de la température.
2. Saisissez une croissance du trafic de 3% sur 24 ans.
3. Appliquez un gain d'efficacité de 25% et une économie SAF de 50%.
4. Trouvez le taux de croissance pour lequel les deux mesures stabilisent les émissions.

Tableau de données

Cas	Émissions par rapport à aujourd'hui
Croissance seule	2.03
+ efficacité	1.52
+ SAF	0.762

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. $1.03^{24} = 2.033$.
2. $2.033 \times 0.75 \times 0.5 = 0.762$.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect)

Lien avec la planète : NASA : l'objectif du secteur aérien est le zéro émission nette de carbone d'ici 2050. NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/)

☐ **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. CO_2 pour 2000 gallons de carburéacteur ?
    1. 2000 × 9.75.

    Réponse : 19,500 kg.
2. g de CO_2 par passager-km pour 19500 kg, 150 passagers, 1000 km ?
    1. 19,500,000/150,000.

    Réponse : 130 g.
3. Fraction de carburant pour 3000 km à L/D = 15 (valeurs du module 3) ?
    1. 1 − e^(−0.1449).

    Réponse : 0.135.
4. η_p pour V_0 = 250, V_e = 350 m/s ?
    1. 2/(1 + 1.4).

    Réponse : 0.833.
5. Économie d'un mélange à 40% avec 70% de réduction sur le cycle de vie ?
    1. 0.4 × 0.7.

    Réponse : 28%.

Série d'entraînement finale (modules 1–10)

1. Cristaux de glace après une baisse de 60% à partir de 10^{15} par kg ?
    1. 10^{15} × 0.4.

Réponse : 4 × 10^{14} par kg.

2. Autonomie électrique avec 300 Wh/kg (valeurs du module 7) ?

    1. 330.4 × 1.2.

    Réponse : Environ 396 km.

3. Volume d’hydrogène liquide pour 1000 MJ ?

    1. 1000/8.50.

    Réponse : 118 L.

4. Trois sources égales de 75 dB ?

    1. 75 + 10 $\log_{10} 3$.

    Réponse : 79.8 dB.

5. Facteur de croissance à 2% sur 24 ans ?

    1. 1.02^{24}.

    Réponse : 1.61.

6. Émissions par rapport à aujourd’hui avec 2% de croissance, 25% d’efficacité, 50% de SAF ?

    1. 1.608 × 0.75 × 0.5.

    Réponse : 0.603.

Fiche de formules

$$m_{CO_2} = 9.75 V_{gal},\; m_{CO_2} = 3.16 m_f$$

$$\mathrm{CO_2/pkm} = m_{CO_2} / (n_{pax} d)$$

$$W_f / W_i = 1 - e^{-Rc/(V\,L/D)},\; C_{D_i} = C_L^2 / (\pi e A R)$$

$$\eta_p = 2/(1 + V_e/V_0),\; \eta_o = \eta_{th}\eta_p$$

$$s = b\,r$$

$$N = EI\,m_f,\; N' = N(1 - r)$$

$$R = (e\eta/g)(L/D)(m_b/m)$$

$$e_v = \rho e_m,\; m_{H_2O} = 8.94 m_{H_2}$$

$$L = 10 \log_{10} \sum 10^{L_i/10},\; \Delta L = 20 \log_{10}(r_2/r_1)$$

$$E = (1+g)^n (1-a)(1-b)$$

Constantes

Constante	Valeur
Pesanteur normale	$g = 9.80665\ m/s^2$
CO_2 du carburéacteur (EIA)	9.75 kg de CO_2 par gallon (21.50 lb)
Pouvoir calorifique du carburéacteur (valeur de manuel)	43 MJ/kg
Pouvoir calorifique de l'hydrogène (valeur de manuel)	120 MJ/kg
Masse volumique de l'hydrogène liquide (valeur de manuel)	$70.8\ kg/m^3$
Gallon	3.785411784 L

Source : NIST: CODATA value, standard acceleration of gravity (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gn)

Textes et sources gratuits

Utilisez ces cours, pages de données et simulations gratuits en parallèle du cours.

- MIT OpenCourseWare 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2004), Lecture 8: Environmental Factors (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2004/pages/lecture-notes/): Notes de cours gratuites du MIT.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): Programme de la NASA.
- U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Sustainable aviation fuel (https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel): Données SAF du DOE.
- U.S. EIA: Carbon dioxide emissions coefficients (https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php): Facteurs d'émission de l'EIA.
- NASA: NASA-DLR study finds sustainable aviation fuel can reduce contrails (2021) (https://www.nasa.gov/news-release/nasa-dlr-study-finds-sustainable-aviation-fuel-can-reduce-contrails/): Étude de la NASA sur les traînées.
- PhET: Greenhouse Effect (https://phet.colorado.edu/en/simulations/greenhouse-effect): Bilan radiatif.

Glossaire

Allongement
Carré de l'envergure divisé par la surface alaire.

Avgas
Essence d'aviation pour moteurs à pistons.

Limite de mélange
Part maximale de SAF dans le carburéacteur.

CORSIA
Dispositif de compensation carbone de l'OACI.

Traînée de condensation
Traînée de condensation formée de cristaux de glace.

Décibel
Mesure logarithmique du son.

Propulsion électrifiée
Propulsion électrique ou hybride des avions.

Facteur d’émission
CO_2 par unité de carburant.

Intensité énergétique
Énergie par passager-km.

Traînée induite
Traînée causée par la portance.

Émissions sur le cycle de vie
CO_2 du puits au sillage.

Hydrogène liquide
Hydrogène cryogénique comme carburant.

Facteur de charge
Passagers divisés par sièges.

Zéro net
Émissions équilibrées par des absorptions.

Effets hors CO_2
Réchauffement dû aux traînées, aux NOx et aux particules.

Passager-km
Un passager transporté sur un km.

Rendement propulsif
Part de la puissance du jet produisant la poussée.

SAF
Carburant d’aviation durable.

Suie
Particules de carbone dans les gaz d’échappement.

Charge spécifique
Énergie par unité de masse.

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	Comptabilise les effets du CO_2 et hors CO_2 avec les bonnes unités et références, combine correctement les réductions et explique simplement les compromis entre options.
3 · Compétent	Résout les séries d'exercices et d'examens avec de petites erreurs et vérifie les unités.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais confond CO_2 de combustion et sur le cycle de vie, ou additionne les réductions au lieu de les multiplier.
1 · Débutant	Cite des économies sans référence ni unités ; doit revoir les modules.

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

- Projet de synthèse (avion ou CubeSat) AERO 490
- Propulsion AERO 410
- Dynamique du vol et commandes AERO 420
- Tous les cours