Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 4, Printemps · 🧱 Calculateur intégré

À propos de ce cours

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

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

> Ceci est le plan d'un cours gratuit en autonomie rédigé par Saving Planets. Ce n'est pas un cours universitaire : il ne donne aucun crédit académique et aucun établissement n'y participe.
>
> Son périmètre suit un projet de fin d'études aérospatial d'un semestre en dernière année. Il s'inspire de l'approche concevoir-dimensionner-réaliser-exploiter de MIT 16.83X Space Systems Engineering (gratuit sur MIT OpenCourseWare) et du NASA Systems Engineering Handbook, que nous citons lorsqu'ils sont utiles. Ni le MIT ni la NASA n'approuvent cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : deux filières parallèles (un petit drone électrique ou un CubeSat 3U), chaque module relié à un travail réel avec une source publique citée, chaque nombre de la page recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et chaque TP dans un tableur gratuit.
>
> Suivez-le dans l'ordre, seul ou en équipe. Chaque module comporte des objectifs, des idées clés, des équations, des exemples pas à pas, des exercices avec réponses complètes, des erreurs fréquentes, des fiches et un quiz. Votre progression est enregistrée uniquement dans ce navigateur.

Comment ce cours aide à sauver la planète

Les équipes de fin d'études construisent les satellites et les aéronefs qui mesurent et protègent la planète : des CubeSats étudiants volent grâce au CubeSat Launch Initiative de la NASA, et de petits satellites comme PREFIRE étudient comment l'Arctique évacue sa chaleur.

Côté avion, le Sustainable Flight National Partnership de la NASA vise des gains d'efficacité énergétique de 25–30%. Chaque module se termine par une courte section sourcée. Les valeurs qui ne proviennent pas 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 490).
- 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

- Avionique et ingénierie système : exigences, fiabilité et vérification.
- Conception d'engins spatiaux : bilans de puissance, thermique et de liaison.
- Performances des avions : portance, traînée, autonomie et montée.
- Structures aérospatiales : contraintes, coefficients de sécurité et marges.

Comment étudier

- Tenez un seul carnet de conception ou tableur d'où découlent tous les nombres.
- Rattachez chaque choix de conception à une exigence.
- Bouclez les bilans avec marge avant d'ajouter des détails.
- Tenez de courtes revues hebdomadaires, même en travaillant seul.
- Rédigez au fil de l'eau : chaque module ajoute une section à votre rapport final.
- 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.
- Le NASA Systems Engineering Handbook gratuit dans un navigateur web.
- Un logiciel de présentation gratuit pour vos revues de conception.
- 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	Mission, parties prenantes et exigences	Mission et exigences ; TP A	NASA SE Handbook
2	Génération et sélection de concepts	Sélection du concept ; TP B	MIT 16.83X
3	Filière avion : dimensionnement en masse et autonomie	Dimensionnement en masse de l'avion	NASA SFNP
4	Filière avion : dimensionnement en masse et autonomie	Autonomie et boucle de dimensionnement ; TP C	MIT 16.83X
5	Filière avion : charge alaire et puissance	Charge alaire et puissance	NASA SFNP
6	Filière CubeSat : dimensionnement et orbite	Dimensionnement et orbite du CubeSat ; TP D	NASA PREFIRE
7	Filière CubeSat : bilans de puissance et de liaison	Bilans de puissance et de liaison ; TP E ; entraînement au partiel	NASA SST SOA
8	Vérifications structurelles et thermiques	Vérifications structurelles et thermiques	MIT 16.83X
9	Coût, calendrier et risques	OT et calendrier	NASA SE Handbook
10	Coût, calendrier et risques	Valeur acquise et risques ; TP F	NASA SE Handbook
11	Prototype, essais et vérification	Planification du prototype	MIT 16.83X
12	Prototype, essais et vérification	Essais	NASA CSLI
13	Prototype, essais et vérification	Clôture de la vérification	NASA SE Handbook
14	Revues de conception et rapport final	Revue critique de conception	MIT 16.83X
15	Revues de conception et rapport final	Rapport final ; entraînement final	NASA SE Handbook

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

Mission, parties prenantes et exigences

Choisir une filière, définir la mission, identifier les parties prenantes, rédiger des exigences vérifiables et fixer des allocations avec marge.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Rédiger un énoncé de mission en une phrase.
- Lister les parties prenantes et leurs besoins.
- Rédiger des exigences vérifiables.
- Calculer la marge par rapport à une allocation.

Notions clés

- Choisissez une filière : un petit drone électrique qui emporte un capteur, ou un CubeSat 3U qui observe la Terre.
- Un énoncé de mission dit qui a besoin de quoi et pourquoi ; les exigences le rendent mesurable.
- Les parties prenantes incluent les utilisateurs, les financeurs, les autorités de lancement ou de l’espace aérien, et l’équipe elle-même.
- Chaque exigence comporte un nombre, une unité et une méthode de vérification (essai, analyse, inspection ou démonstration).
- Les allocations incluent une marge dès le début, car les estimations augmentent à mesure que la conception mûrit.

Équations clés

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

```
Margin=(A-E)/(E)
```

Marge de l’allocation sur l’estimation

$$m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

```
m_alloc=m_est(1+M)
```

Allocation avec marge

$$m_{3U} \approx 3 \times 1.33\ \text{kg}$$

Masse admise d’un 3U (valeur de manuel)

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

Les poids ont pour somme un

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Un CubeSat 3U a une allocation de 4.0 kg (valeur de manuel) et une estimation de 3.4 kg. Marge ?

1. (4.0 − 3.4)/3.4.

Réponse : 17.6%.

Exemple 1.2 Le capteur d'un drone est estimé à 0.8 kg. Allouez avec 25% de marge (valeurs d'exemple).

1. 0.8 × 1.25.

Réponse : 1.0 kg.

Exemple 1.3 Rédigez une exigence vérifiable d'endurance pour le drone.

1. Nombre, unité, méthode.

Réponse : « Le drone doit voler au moins 30 minutes à 15 m/s, vérifié par essai en vol. »

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Marge si l'estimation passe à 3.8 kg ?

   5.26%.

2. Trois unités de 1.33 kg (valeur de manuel) ?

   3.99 kg, environ 4 kg.

3. Citez quatre parties prenantes d'un CubeSat étudiant.

Par exemple : les utilisateurs scientifiques, l'université, le lanceur et le régulateur radio.

4. « Le CubeSat doit être fiable » est-il vérifiable ?

   Non ; ajoutez un nombre et une méthode.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les exigences décrivent la conception.

En réalité : Elles expriment des besoins, pas des solutions.

Idée reçue : La marge peut être ajoutée plus tard.

En réalité : Elle coûte moins cher à garder tôt.

Idée reçue : Une seule partie prenante suffit.

En réalité : Des parties prenantes oubliées causent des surprises tardives.

Cartes mémoire

Énoncé de mission

Qui a besoin de quoi et pourquoi.

Partie prenante

Quiconque a un besoin ou son mot à dire.

Exigence

Besoin vérifiable.

Allocation

Part budgétée.

Marge

Réserve au-delà de l'estimation.

Filière

Parcours de projet drone ou CubeSat.

Quiz d'autocontrôle

1. Marge de masse...

17.6%

15%

0.6%

85%

17.6%. (4.0 − 3.4)/3.4.

2. 0.8 kg + 25%…

1.0 kg

0.85 kg

1.25 kg

0.6 kg

1.0 kg. Multiplier.

3. Méthodes de vérification…

essai, analyse, inspection, démonstration

deviner, espérer, attendre, livrer

coût, calendrier, risque, périmètre

PDR, CDR, TRR, FRR

essai, analyse, inspection, démonstration. Quatre méthodes.

4. L’énoncé de mission dit…

qui a besoin de quoi et pourquoi

la taille des boulons

seulement le budget

seulement la date de lancement

qui a besoin de quoi et pourquoi. Finalité.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le CubeSat Launch Initiative de la NASA offre aux CubeSats construits par des établissements d'enseignement et des organisations à but non lucratif américains, y compris des musées et des centres scientifiques, l'occasion de voler sur des lancements à venir ; la NASA indique avoir lancé plus de 150 CubeSats.

La NASA indique que son appel à partenariats est généralement publié chaque mois d'août avec des propositions attendues en novembre, si bien qu'un projet de fin d'études peut prendre la forme d'une vraie proposition.

Sur Saving Planets : Conception d'engins spatiaux · Avionique et ingénierie des systèmes

Sources : NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/): NASA CSLI.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Génération et sélection de concepts

Remue-méninges, tableaux morphologiques, matrices de Pugh, matrices de décision pondérées et sensibilité aux poids.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Générer plusieurs concepts.
- Construire un tableau morphologique.
- Noter des concepts dans une matrice pondérée.
- Tester la sensibilité aux poids.

Notions clés

- Générez de nombreux concepts avant d'en juger aucun ; la quantité d'abord, la qualité ensuite.
- Un tableau morphologique liste les options pour chaque fonction et les combine en concepts.
- Une matrice de Pugh compare des concepts à une référence avec +, 0 et −.
- Une matrice de décision pondérée multiplie les notes par les poids et les additionne.
- Si de petits changements de poids inversent le gagnant, la décision a besoin de plus de données.

Équations clés

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Score pondéré

$$N = \prod n_i$$

`N= n_i`

Combinaisons morphologiques

$$P = n_+ - n_-$$

`P=n_+-n_-`

Score net de Pugh

$$\sum w_i = 1$$

$w_i=1$

Poids normalisés

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Le concept A obtient 6 (coût), 9 (performance), 5 (risque) ; B obtient 8, 6, 8. Poids 0.3, 0.5, 0.2. Gagnant ?

1. A = 1.8 + 4.5 + 1.0 = 7.3.
2. B = 2.4 + 3.0 + 1.6 = 7.0.

Réponse : A, 7.3 contre 7.0.

Exemple 2.2 Changez les poids en 0.4, 0.3, 0.3.

1. A = 2.4 + 2.7 + 1.5 = 6.6.
2. B = 3.2 + 1.8 + 2.4 = 7.4.

Réponse : B gagne : le choix est sensible aux poids.

Exemple 2.3 Un tableau a 3 options d'alimentation, 2 structures et 4 capteurs. Combinaisons ?

1. 3 × 2 × 4.

Réponse : 24.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Pugh : 4 plus, 1 moins. Net ?

   +3.

2. Combinaisons pour 2 × 3 × 3 × 2 ?

   36.

3. Pourquoi tester la sensibilité aux poids ?

   Pour voir si le gagnant est robuste.

4. Pourquoi un remue-méninges avant de noter ?

   Juger trop tôt tue les bonnes idées.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le score le plus élevé a toujours raison.

En réalité : Vérifiez la sensibilité et les hypothèses.

Idée reçue : Les poids sont objectifs.

En réalité : Ils traduisent un jugement.

Idée reçue : Un seul concept suffit.

En réalité : Comparez-en plusieurs.

Cartes mémoire

Tableau morphologique

Options par fonction.

Matrice de Pugh

Comparer à une référence.

Référence

Concept de référence.

Matrice pondérée

Notes multipliées par les poids.

Sensibilité

Comment les résultats changent avec les entrées.

Sélection

Choix d’un concept.

Quiz d’autocontrôle

1. Score de A…

7.3

7.0

6.6

20

7.3. Somme pondérée.

2. Score de B…

7.0

7.3

7.4

22

7.0. Somme pondérée.

3. Après repondération…

B gagne

A gagne

égalité

aucun des deux

B gagne. 7.4 > 6.6.

4. Combinaisons…

24

9

12

48

24. 3 × 2 × 4.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le Sustainable Flight National Partnership de la NASA travaille sur trois axes : les technologies avancées de véhicules, l'efficacité des opérations des compagnies aériennes et les carburants d'aviation durables.

Arbitrer entre de tels axes est un problème de sélection de concept : les bons poids dépendent de ce que valorisent les parties prenantes, y compris les émissions.

Sur Saving Planets : Solutions · Performances des avions

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

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.

Regarder le cours magistral

Session 4: System Architecture and Concept Generation (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-4-system-architecture-and-concept-generation/) (en anglais)

MIT 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015), 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**

Filière avion : dimensionnement en masse et autonomie

Estimation de la masse au décollage à partir de fractions de masse, équation de Bréguet de l'autonomie, et effet des gains d'efficacité sur l'autonomie et le carburant.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Estimer la masse au décollage à partir des fractions.
- Appliquer l'équation de Bréguet.
- Montrer comment L/D change l'autonomie.
- Itérer une boucle de dimensionnement.

Notions clés

- La masse au décollage vaut la charge utile divisée par un moins les fractions à vide et d'énergie.
- Si les fractions à vide et d'énergie approchent 1, la conception ne boucle pas.
- Pour les avions à réaction, l'autonomie de Bréguet vaut (V/c)(L/D) ln(W_i/W_f).
- L'autonomie est proportionnelle à L/D : un gain de 30% sur L/D donne 30% d'autonomie en plus à fraction de carburant égale.
- Le dimensionnement est itératif : estimer, calculer, mettre à jour les fractions, recommencer jusqu'à convergence de la masse.

Équations clés

$$W_0 = \frac{W_{pay}}{1 - W_e/W_0 - W_f/W_0}$$

`W_0=_pay1-W_e/W_0-W_f/W_0`

Masse au décollage

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

`R=V/cL/D(W_i)/(W_f)`

Distance franchissable de Breguet (réacteur)

$$R \propto L/D$$

L'autonomie varie comme L/D

$$W = mg$$

$W=mg$

Poids

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Un drone emporte 1 kg de charge utile avec une fraction à vide de 0.5 et une fraction batterie de 0.3 (valeurs d'exemple). Masse au décollage ?

1. $1/(1 - 0.5 - 0.3)$.

Réponse : 5 kg.

Exemple 3.2 Un avion de transport vole à 230 m/s avec c = 0.6 par heure, L/D = 17 et $W_i/W_f = 1.25$ (valeurs de manuel). Autonomie ?

1. $c = 1.667 \times 10^{-4}\ s^{-1}$.
2. $R = (230/1.667 \times 10^{-4}) \times 17 \times \ln 1.25 = 1.38 \times 10^{6} \times 17 \times 0.2231$.

Réponse : Environ 5235 km.

Exemple 3.3 Augmentez L/D de 30%.

1. L'autonomie varie comme L/D.

Réponse : Environ 6805 km.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Masse au décollage si la fraction batterie passe à 0.35 ?

   6.67 kg.

2. Poids du drone de 5 kg ?

   49.0 N.

3. Pourquoi les fractions ne peuvent-elles pas totaliser 1 ?

   Il ne resterait rien pour la charge utile.

4. ln 1.25?

   0.223.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Plus de batterie signifie toujours plus d’autonomie.

En réalité : Cela augmente aussi la masse ; c’est la fraction qui compte.

Idée reçue : Bréguet convient aux avions électriques.

En réalité : Les batteries ne s’allègent pas ; utilisez une forme énergétique.

Idée reçue : Un seul passage suffit.

En réalité : Itérer jusqu’à convergence de la masse.

Cartes mémoire

Fraction à vide

Masse à vide sur masse au décollage.

Fraction de carburant

Carburant rapporté à la masse au décollage.

Breguet

Équation de la distance franchissable.

L/D

Rapport portance/traînée.

TSFC

Consommation spécifique de carburant par unité de poussée.

Boucle de dimensionnement

Itérer jusqu’à convergence.

Quiz d’autocontrôle

1. Masse au décollage du drone…

5 kg

2 kg

1.25 kg

10 kg

5 kg. 1/0.2.

2. Autonomie de l’avion de transport...

≈ 5235 km

≈ 523 km

≈ 52,000 km

≈ 1380 km

≈ 5235 km. Breguet.

3. Avec +30% de L/D...

≈ 6805 km

≈ 5235 km

≈ 4027 km

≈ 10,470 km

≈ 6805 km. × 1.3.

4. L’autonomie varie comme...

L/D

c

W_f

à la traînée

L/D. Breguet.

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.

Sa pièce maîtresse est un démonstrateur X-plane à l'échelle réelle qui teste une conception aérodynamique ultra-efficace, avec un premier vol au plus tôt fin 2026 ; une meilleure finesse L/D est exactement le levier que récompense l'équation de Bréguet de ce module.

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 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Filière avion : charge alaire et puissance

Dimensionnement par contraintes : charge alaire à partir de la vitesse de décrochage, surface alaire et puissance de montée pour un petit avion électrique.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Trouver la charge alaire à partir de la vitesse de décrochage.
- Dimensionner la surface alaire.
- Calculer la puissance de montée.
- Tracer un diagramme de contraintes simple.

Notions clés

- La vitesse de décrochage fixe la charge alaire maximale : W/S = ½ρV_s²C_Lmax.
- La surface alaire découle du poids divisé par la charge alaire.
- La puissance à l’arbre en montée couvre la traînée (W V/(L/D)) plus le terme de montée (W × vitesse ascensionnelle), divisés par le rendement propulsif.
- Chaque exigence trace une ligne sur un graphique W/S en fonction du rapport puissance/poids ; le point de conception se trouve dans la région qui les satisfait toutes.
- Les petits drones volent à faible nombre de Reynolds, vérifiez donc les données de profil à petite échelle.

Équations clés

$$\frac{W}{S} = \frac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max}$$

`W/S=12ρ V_s^2C_L,max`

Charge alaire au décrochage

$$S = \frac{W}{W/S}$$

`S=(W)/(W/S)`

Surface alaire

$$P = \frac{W}{\eta}\left(\frac{V}{L/D} + RC\right)$$

`P=(W)/()((V)/(L/D)+RC)`

Puissance de montée

$$q = \frac{1}{2}\rho V^2$$

q=12ρ V^2

Pression dynamique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Décrochage à 12 m/s, C_Lmax = 1.2, niveau de la mer. Charge alaire ?

1. ½ × 1.225 × 144 × 1.2.

Réponse : 105.8 N/m².

Exemple 4.2 Surface alaire pour le drone de 5 kg ?

1. 49.03/105.84.

Réponse : 0.463 m².

Exemple 4.3 Puissance de montée à 15 m/s, L/D = 10, montée à 2 m/s, η = 0.7 ?

1. 49.03 × (1.5 + 2) = 171.6 W.
2. 171.6/0.7.

Réponse : 245 W.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Charge alaire pour un décrochage à 10 m/s ?

   73.5 N/m².

2. Puissance sans le terme de montée ?

   105.1 W.

3. Pression dynamique à 15 m/s ?

137.8 Pa.

4. Pourquoi le décrochage fixe-t-il un W/S maximal ?

   Un W/S plus élevé exige une vitesse de décrochage plus élevée.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Des ailes plus grandes sont toujours meilleures.

En réalité : Elles ajoutent masse et traînée.

Idée reçue : La puissance de montée est faible.

En réalité : Elle peut dominer pour les petits drones.

Idée reçue : $\eta = 1$.

En réalité : Les hélices et les moteurs perdent de l'énergie.

Cartes mémoire

Charge alaire

Poids par surface alaire.

de C_Lmax

Coefficient de portance maximal.

Diagramme de contraintes

Les exigences sur un seul graphique.

Taux de montée

Vitesse verticale.

Rendement propulsif

Fraction de puissance utile.

Vitesse de décrochage

Vitesse stabilisée minimale.

Quiz d'autocontrôle

1. W/S...

105.8 N/m²

88.2

1058

10.6

105.8 N/m². ½ρV²C_L.

2. Surface alaire…

0.463 m²

4.63 m²

0.0463 m²

1 m²

0.463 m². W/(W/S).

3. Puissance de montée…

245 W

171.6 W

49 W

490 W

245 W. Divisez par η.

4. Le point de conception se trouve…

là où toutes les contraintes sont satisfaites

sur n’importe quelle ligne

à l’origine

à l’extérieur

là où toutes les contraintes sont satisfaites. Région admissible.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le Sustainable Flight National Partnership de la NASA vise aussi l'efficacité des opérations des compagnies et des trajectoires optimales, là où les choix de puissance et de montée rencontrent la consommation de carburant.

De petits drones électriques bien dimensionnés comme dans ce module servent déjà à surveiller cultures, forêts et littoraux. Les valeurs de ce module sont des valeurs d'exemple.

Sur Saving Planets : Performances des avions · Aérodynamique I

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 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Filière CubeSat : dimensionnement et orbite

Formats de CubeSat, masse admise, période orbitale, passages par jour et fraction d’éclipse en orbite terrestre basse.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Dimensionner le bilan de masse d’un CubeSat 3U.
- Calculer la période orbitale.
- Calculer le nombre d’orbites par jour.
- Calculer l’éclipse dans le pire cas.

Notions clés

- Les CubeSats se déclinent en unités (U) de 10 cm ; un 3U mesure environ 10 × 10 × 34 cm (valeur de manuel).
- La masse admise est d’environ 1.33 kg par U (valeur de manuel) ; confirmez auprès du fournisseur de lancement.
- La période orbitale ne dépend que du demi-grand axe : T = 2π√(a³/μ).
- Dans le pire cas (Soleil dans le plan de l’orbite), la fraction d’éclipse vaut asin(R_E/a)/π.
- Les orbites basses se dégradent plus vite à cause de la traînée ; la plupart des CubeSats étudiants rentrent dans l’atmosphère en quelques années.

Équations clés

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

T=2π^3/μ

Période orbitale

$$f_e = \frac{1}{\pi}\sin^{-1}\frac{R_E}{a}$$

f_e=(1)/(π)^-1(R_E)/(a)

Fraction d’éclipse dans le pire cas

$$n = 1440/T$$

n=1440/T

Orbites par jour (T en min)

$$a = R_E + h$$

a=R_E+h

Demi-grand axe

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Période à 500 km d’altitude ?

1. a = 6878.1 km.
2. T = 2π√(6878.1³/398,600.4).

Réponse : 94.6 min.

Exemple 5.2 Orbites par jour ?

1. 1440/94.6.

Réponse : 15.2.

Exemple 5.3 Éclipse dans le pire cas ?

1. asin(6378.1/6878.1)/π = 0.378.
2. 0.378 × 94.6.

Réponse : 35.8 min.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Masse admise d’un 3U à 1.33 kg/U ?

   3.99 kg.

2. Temps ensoleillé par orbite ?

   58.9 min.

3. La période dépend-elle de la masse du CubeSat ?

No.

4. Pourquoi les orbites basses se dégradent-elles ?

   La traînée atmosphérique.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les satellites plus lourds orbitent plus lentement.

En réalité : La période ne dépend que de a.

Idée reçue : L'éclipse vaut toujours 50%.

En réalité : Elle dépend de l'altitude et de l'angle du Soleil.

Idée reçue : Utiliser l'altitude dans la loi de Kepler.

En réalité : Utilisez a = R_E + h.

Cartes mémoire

CubeSat

Petit satellite standard en unités de 10 cm.

3U

CubeSat à trois unités.

Période

Durée d'une orbite.

Fraction d'éclipse

Part de l'orbite à l'ombre.

Demi-grand axe

R_E + h pour les orbites circulaires.

Dégradation orbitale

Perte d'orbite due à la traînée.

Quiz d'autocontrôle

1. Période...

94.6 min

90 min

100 min

84.4 min

94.6 min. $2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

2. Orbites par jour…

15.2

14.5

16

24

15.2. 1440/T.

3. Éclipse…

35.8 min

47 min

20 min

0 min

35.8 min. 0.378 × 94.6.

4. Masse d’un 3U…

≈ 4 kg

≈ 1.33 kg

≈ 12 kg

≈ 40 kg

≈ 4 kg. 3 × 1.33.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que PREFIRE utilise une paire de minuscules satellites, des CubeSats lancés en mai 2024, pour mesurer une part peu étudiée de l'énergie radiative émise par la Terre, en quête d'indices sur la perte de banquise, la fonte des calottes et le réchauffement de l'Arctique.

La NASA qualifie l'Arctique de région qui se comporte comme le thermostat de notre planète, en évacuant l'excès d'énergie reçu sous les tropiques ; c'est pourquoi une paire de petits satellites y compte.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Mécanique orbitale

Sources : NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): NASA PREFIRE.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rapport gratuit de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Filière CubeSat : bilans de puissance et de liaison

Production des panneaux solaires, puissance moyenne sur l'orbite, dimensionnement de la batterie pour l'éclipse, affaiblissement d'une liaison UHF et volume de données quotidien.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la production des panneaux au soleil.
- Calculer la puissance moyenne sur l'orbite.
- Dimensionner une batterie pour l'éclipse.
- Estimer l'affaiblissement de propagation et les données par jour.

Notions clés

- La puissance des panneaux vaut flux solaire × rendement des cellules × surface × cos(angle).
- La production moyenne sur l'orbite est réduite par la fraction d'éclipse (et en pratique par le pointage).
- La batterie couvre la charge pendant l'éclipse ; limiter la profondeur de décharge prolonge sa durée de vie en cycles.
- L'affaiblissement en espace libre croît comme 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$; les bandes UHF radioamateurs sont courantes pour les CubeSats étudiants.
- Le volume de données par jour vaut débit × durée de passage × nombre de passages.

Équations clés

$$P = S\eta A\cos\theta$$

P=S Aθ

Production des panneaux

$$\bar{P} = P(1 - f_e)$$

P=P(1-f_e)

Production moyenne sur l'orbite

$$E = \frac{P_e t_e}{DoD}$$

E=(P_et_e)/(DoD)

Capacité de la batterie

$$L = 20 \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

L=20_10(4π d)/()

Affaiblissement

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Des panneaux de 0.06 m² avec des cellules à 28% font face au Soleil (valeurs d’exemple). Production ?

1. 1361 × 0.28 × 0.06.

Réponse : 22.9 W.

Exemple 6.2 Moyenne sur l’orbite avec la fraction d’éclipse de 0.378 du module 5 ?

1. 22.86 × 0.622.

Réponse : 14.2 W.

Exemple 6.3 Batterie pour 8 W pendant une éclipse de 35.8 min à 30% de profondeur de décharge ?

1. 8 × 35.75/60 = 4.77 Wh.
2. 4.77/0.3.

Réponse : 15.9 Wh.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Affaiblissement à 437 MHz sur 1000 km ?

   λ = 0.686 m; L = 145.3 dB.

2. Données par jour à 9600 bit/s, quatre passages de 10 minutes ?

   23.04 Mbit = 2.88 MB.

3. Production avec un angle solaire de 60° ?

11.4 W.

4. Pourquoi limiter la profondeur de décharge ?

   Plus de cycles avant l’usure de la batterie.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La puissance solaire est constante sur l’orbite.

En réalité : L’éclipse et le pointage la réduisent.

Idée reçue : Batterie = énergie de l’éclipse.

En réalité : Divisez par la DoD.

Idée reçue : Plus de bits par seconde, c’est gratuit.

En réalité : Il faut plus de marge de liaison.

Cartes mémoire

Puissance moyenne sur l’orbite

Production sur une orbite complète.

DoD

Profondeur de décharge.

Affaiblissement

Perte par dispersion.

UHF

Bande ultra-haute fréquence.

Passage

Durée pendant laquelle une station sol voit le satellite.

Volume de données

Bits transmis vers le sol par jour.

Quiz d’autocontrôle

1. Production des panneaux…

22.9 W

2.29 W

229 W

38 W

22.9 W. SηA.

2. Moyenne sur l’orbite…

14.2 W

22.9 W

8.6 W

11.4 W

14.2 W. × 0.622.

3. Batterie…

15.9 Wh

4.77 Wh

47.7 Wh

8 Wh

15.9 Wh. ÷ 0.3.

4. Affaiblissement de propagation…

145.3 dB

125 dB

165 dB

14.5 dB

145.3 dB. 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le rapport de la NASA sur les petits engins spatiaux indique qu'à la parution de sa première édition en 2013, 247 CubeSats et 105 autres petits engins de moins de 50 kg avaient été lancés dans le monde, soit moins de 2% de la masse lancée en orbite.

La NASA indique que les petits engins spatiaux sont depuis devenus le principal moyen d'accès à l'espace pour les institutions commerciales, gouvernementales, privées et universitaires ; des bilans de puissance et de liaison soignés soutiennent donc aujourd'hui une grande part de l'observation de la Terre.

Sur Saving Planets : Conception d'engins spatiaux · Observation de la Terre

Sources : NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rapport gratuit de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Vérifications structurelles et thermiques

Facteurs de charge, marges de sécurité, charges de lancement et de vol, et une première estimation d’équilibre thermique pour les deux filières.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer une charge de dimensionnement à partir d’un facteur de charge.
- Calculer une marge de sécurité.
- Estimer la température d’équilibre.
- Décider ce qui nécessite une analyse détaillée.

Notions clés

- Les charges de dimensionnement valent le poids multiplié par un facteur de charge (lancement ou manœuvre), multiplié par un coefficient de sécurité.
- La marge de sécurité MS = admissible/(FS × appliquée) − 1 doit être positive.
- L’aluminium 6061-T6 a une limite d’élasticité proche de 276 MPa (valeur de manuel), un choix courant pour les drones comme pour les structures de CubeSat.
- Une première estimation thermique équilibre la lumière solaire absorbée et l’infrarouge émis ; pour α = ε, un corps ensoleillé près de la Terre se situe en moyenne vers 278 K.
- Les vérifications à la main trouvent les cas critiques ; les modèles par éléments finis et thermiques les affinent ensuite.

Équations clés

$$F = nmg$$

```
F=nmg
```

Charge à partir du facteur de charge

$$MS = \frac{\sigma_{allow}}{FS \cdot \sigma} - 1$$

```
MS=σ_allowFS·σ-1
```

Marge de sécurité

$$T = \left(\frac{\alpha S}{4 \varepsilon \sigma} \right)^{1/4}$$

```
T=((α S)/(4σ))^1/4
```

Température d’équilibre moyenne

$$\sigma = F/A$$

Contrainte normale

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Un CubeSat de 4 kg subit 10 g (facteur de charge d’exemple). Charge ?

1. 10 × 4 × 9.80665.

Réponse : 392 N.

Exemple 7.2 Un rail subit 80 MPa ; la limite d’élasticité est de 276 MPa ; FS = 1.25. MS ?

1. 276/(1.25 × 80) − 1.

Réponse : 1.76, positive.

Exemple 7.3 Température d’équilibre moyenne avec α = ε ?

1. (1361/(4 × 5.670374419 × 10⁻⁸))^¼.

Réponse : 278 K.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. MS si la contrainte monte à 200 MPa ?

   0.10.

2. Charge à 6 g sur 5 kg ?

   294 N.

3. En °C, 278.3 K valent ?

   5.2 °C.

4. Pourquoi un coefficient de sécurité ?

   Incertitudes sur les charges, les matériaux et l’analyse.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : MS = 0, c’est acceptable.

En réalité : Gardez-la positive.

Idée reçue : L’espace est froid, donc pas de problème thermique.

En réalité : Les parties ensoleillées peuvent surchauffer.

Idée reçue : Les vérifications à la main remplacent l’analyse.

En réalité : Elles la guident.

Cartes mémoire

Facteur de charge

Multiple du poids.

Coefficient de sécurité

Multiplicateur appliqué aux charges.

Marge de sécurité

Admissible sur requis moins un.

Limite d’élasticité

Contrainte provoquant une déformation permanente.

Température d’équilibre

Absorbé = émis.

FEA

Analyse par éléments finis.

Quiz d’autocontrôle

1. Charge…

392 N

39 N

3920 N

40 N

392 N. nmg.

2. MS…

1.76

2.76

0.76

−0.24

1.76. 276/100 − 1.

3. T d’équilibre…

278 K

255 K

300 K

373 K

278 K. (S/4σ)^¼.

4. La MS doit être…

positif

négatif

zéro

supérieure à 10

positif. Définition.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que les deux CubeSats de PREFIRE mesurent l'émission infrarouge lointaine de la Terre, le même rayonnement que ce module équilibre dans son estimation thermique.

La NASA rapporte que la mission PREFIRE a été prolongée pour que les deux satellites fonctionnent au moins jusqu'en septembre 2026, en élargissant leur champ des pôles à toute la planète, fruit d'une conception qui a survécu au lancement et à l'orbite.

Sur Saving Planets : Structures aérospatiales · Transferts thermiques

Sources : NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.

Regarder le cours magistral

Lecture 5: Orbiter Structure + Thermal Protection System (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-5/) (en anglais)

MIT 16.885J Aircraft Systems Engineering (Fall 2005), 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**

Coût, calendrier et risques

Organigrammes des tâches, calendriers par chemin critique, valeur acquise, matrices de risques et plans d'atténuation.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Construire un organigramme des tâches.
- Trouver le chemin critique.
- Calculer le CPI, le SPI et l'estimation à l'achèvement.
- Noter et atténuer les risques.

Notions clés

- Un organigramme des tâches découpe le projet en livrables qui peuvent être estimés et attribués.
- Le chemin critique est la plus longue chaîne de tâches dépendantes ; tout retard sur celui-ci retarde le projet.
- La valeur acquise compare la valeur planifiée, la valeur acquise et le coût réel.
- CPI = EV/AC et SPI = EV/PV ; des valeurs inférieures à 1 signifient un dépassement de budget ou un retard.
- Les risques sont notés probabilité × conséquence et suivis avec des responsables et des mesures d'atténuation.

Équations clés

$$CPI = EV / AC$$

`CPI=EV/AC`

Indice de performance des coûts

$$SPI = EV / PV$$

`SPI=EV/PV`

Indice de performance des délais

$$EAC = BAC / CPI$$

`EAC=BAC/CPI`

Estimation à l'achèvement

$$R = L \times C$$

R=L× C

Note de risque

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 PV = \$50k, EV = \$45k, AC = \$48k (valeurs d'exemple). CPI et SPI ?

1. CPI = 45/48.
2. SPI = 45/50.

Réponse : CPI = 0.9375, SPI = 0.90.

Exemple 8.2 Le budget à l'achèvement est de \$100k. EAC ?

1. 100/0.9375.

Réponse : \$106.7k.

Exemple 8.3 Des tâches en séquence durent 3, 4, 5 et 2 semaines dans un semestre de 15 semaines. Marge ?

1. Chemin = 14 semaines.
2. 15 − 14.

Réponse : 1 semaine.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Note de risque pour une probabilité de 4 et une conséquence de 5 ?

   20 sur 25.

2. Que signifie CPI = 1.1 ?

   Sous le budget.

3. Écart à l'achèvement pour un EAC de \$106.7k ?

−$6.7k.

4. Qu’est-ce qu’un OT ?

   Organigramme des tâches.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Dépenser selon le plan signifie être dans les délais.

En réalité : Comparez la valeur acquise, pas les dépenses.

Idée reçue : Chaque tâche est critique.

En réalité : Seul le plus long chemin l’est.

Idée reçue : Les risques disparaissent une fois listés.

En réalité : Ils ont besoin de responsables et d’actions.

Cartes mémoire

WBS

Organigramme des tâches.

Chemin critique

Plus longue chaîne de dépendances.

Valeur acquise

Valeur du travail réalisé.

CPI

EV/AC.

SPI

EV/PV.

Matrice des risques

Probabilité × conséquence.

Quiz d’autocontrôle

1. CPI…

0.9375

0.90

1.067

0.96

0.9375. EV/AC.

2. SPI...

0.90

0.9375

1.11

0.96

0.90. EV/PV.

3. EAC...

$106.7k

$100k

$93.8k

$111k

$106.7k. BAC/CPI.

4. Marge...

1 semaine

0 semaine

14 semaines

3 semaines

1 semaine. 15 − 14.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le Systems Engineering Handbook de la NASA comprend une section entière sur la gestion technique transversale, à côté de la conception système et de la réalisation des produits.

Les projets qui tiennent budget et calendrier sont lancés plus tôt, et les données d'observation de la Terre arrivent plus tôt. Les coûts de ce module sont des valeurs d'exemple.

Sur Saving Planets : Solutions · Avionique et ingénierie des systèmes

Sources : NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA, section 6.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Prototype, essais et vérification

Matrices de vérification, planification des essais, statistiques de mesure, comparaison des résultats aux prédictions et clôture des exigences.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Construire une matrice de vérification.
- Calculer la moyenne et l’écart-type.
- Comparer une mesure à une allocation.
- Clore une exigence ou accorder une dérogation.

Notions clés

- Une matrice de vérification liste chaque exigence, sa méthode, l’essai ou l’analyse, et le résultat.
- Répétez les mesures pour estimer la moyenne et la dispersion ; indiquez les deux.
- Comparez les résultats aux prédictions ; de grands écarts révèlent tôt les erreurs de modèle.
- Testez comme vous volez : utilisez des configurations et procédures représentatives du vol.
- Le 16.83X du MIT suit les phases concevoir, dimensionner, réaliser et exploiter, et se termine par des essais dans l’environnement visé.

Équations clés

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i$$

```
x=1n x_i
```

Moyenne

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

```
s=((x_i- x)^2)/(n-1)
```

Écart-type d’échantillon

$$\text{Margin} = \frac{A - \bar{x}}{\bar{x}}$$

```
Margin=(A- x)/( x)
```

Marge mesurée

$$e = \frac{x_m - x_p}{x_p}$$

`e=(x_m-x_p)/(x_p)`

Erreur de prédiction

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Cinq mesures de masse : 3.38, 3.42, 3.40, 3.45, 3.35 kg. Moyenne ?

1. Sum 17.00/5.

Réponse : 3.40 kg.

Exemple 9.2 Écart-type d'échantillon ?

1. Écarts −0.02, 0.02, 0, 0.05, −0.05.
2. √(0.0058/4).

Réponse : 0.038 kg.

Exemple 9.3 Marge par rapport à l'allocation de 4.0 kg ?

1. (4.0 − 3.40)/3.40.

Réponse : 17.6% : l'exigence est close.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Prédit 3.30 kg, mesuré 3.40 kg. Erreur ?

   +3.03%.

2. Pourquoi répéter les mesures ?

   Pour estimer la dispersion et repérer les erreurs.

3. Que signifie « tester comme on vole » ?

   Utiliser du matériel et des procédures représentatifs du vol.

4. Qui approuve une dérogation ?

   Le comité de revue du projet ou le client.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une seule mesure suffit.

En réalité : Indiquez la moyenne et la dispersion.

Idée reçue : Les essais prouvent qu'une conception est parfaite.

En réalité : Ils montrent qu'elle satisfait les exigences dans les conditions d'essai.

Idée reçue : Des données discordantes sont mauvaises.

En réalité : Elles vous apprennent quelque chose sur le modèle.

Cartes mémoire

Matrice de vérification

Tableau exigence-preuve.

Moyenne

Moyenne.

Écart-type

Dispersion.

Tester comme on vole

Essais représentatifs du vol.

Dérogation

Exception approuvée.

CDIO

Concevoir, dimensionner, réaliser, exploiter.

Quiz d'autocontrôle

1. Moyenne...

3.40 kg

3.38 kg

3.45 kg

17 kg

3.40 kg. Sum/n.

2. Écart-type…

0.038 kg

0.38 kg

0.0058 kg

0.1 kg

0.038 kg. Formule d’échantillon.

3. Marge…

17.6%

15%

0.6%

−15%

17.6%. (4 − 3.4)/3.4.

4. Erreur de prédiction…

+3.03%

−3.03%

+0.1%

+30%

+3.03%. 0.1/3.3.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

MIT OpenCourseWare décrit le 16.83X comme suivant un modèle concevoir-dimensionner-réaliser-exploiter, avec une phase finale où le système est testé et préparé pour son environnement visé.

Le CubeSat Launch Initiative de la NASA fait voler des satellites étudiants qui passent ce type d'essais, transformant des projets de fin d'études en instruments opérationnels en orbite.

Sur Saving Planets : Avionique et ingénierie des systèmes · Probabilités et statistiques

Sources : MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/) · NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA, section 5.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Revues de conception et rapport final

Revues de conception préliminaire et critique, présentation des compromis et des bilans, réponses aux questions et rédaction du rapport final.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Planifier une revue de conception.
- Présenter les bilans avec leurs marges.
- Suivre les actions issues des revues.
- Rédiger un rapport final clair.

Notions clés

- Une revue de conception préliminaire montre que le concept satisfait les exigences avec marge ; une revue critique de conception montre que la conception détaillée est prête à être fabriquée.
- Commencez par les exigences, puis la conception, puis les bilans, les risques, les plans d’essai et les points ouverts.
- Chaque revue produit des actions avec des responsables et des échéances.
- Le rapport final raconte l’histoire du besoin jusqu’à la conception vérifiée, avec des nombres qui remontent au tableur.
- Discuter honnêtement de ce qui n’a pas marché fait partie d’une bonne ingénierie.

Équations clés

$$t_{talk} = n_{slides} \times t_{slide}$$

```
t_talk=n_slides× t_slide
```

Durée de l’exposé

$$\text{Closure} = \frac{n_{closed}}{n_{total}}$$

```
Closure=_closedn_total
```

Clôture des actions

$$\text{Margin} = \frac{A - E}{E}$$

```
Margin=(A-E)/(E)
```

Marge du bilan

$$\text{Coverage} = \frac{n_{verified}}{n_{req}}$$

`Coverage=_verifiedn_req`

Couverture de la vérification

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Une revue de 20 minutes à raison de 1.5 minute par diapositive. Combien de diapositives ?

1. 20/1.5.

Réponse : Environ 13.

Exemple 10.2 Une revue laisse 12 actions ; 9 sont closes. Taux de clôture ?

1. 9/12.

Réponse : 75%.

Exemple 10.3 30 exigences sur 32 sont vérifiées. Couverture ?

1. 30/32.

Réponse : 93.75%.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Diapositives pour une revue de 30 minutes à 2 min chacune ?

   15.

2. Qu’est-ce qui suit la PDR ?

   CDR.

3. Taux de clôture avec 11 actions closes sur 12 ?

   91.7%.

4. Pourquoi montrer les points ouverts ?

   Les relecteurs peuvent aider, et cela crée la confiance.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les revues sont des examens.

En réalité : Elles aident le projet.

Idée reçue : Plus de diapositives, c'est mieux.

En réalité : La clarté l'emporte sur le volume.

Idée reçue : Cacher les problèmes.

En réalité : Montrez-les avec des plans.

Cartes mémoire

PDR

Revue de conception préliminaire.

CDR

Revue critique de conception.

Action

Tâche issue d'une revue.

Rapport final

Récit du besoin à la vérification.

Couverture

Part des exigences vérifiées.

Retour d'expérience

Ce qu'il faut faire autrement.

Quiz d'autocontrôle

1. Diapositives...

≈ 13

20

30

5

≈ 13. 20/1.5.

2. Taux de clôture…

75%

9%

25%

133%

75%. 9/12.

3. Couverture…

93.75%

30%

96%

6.25%

93.75%. 30/32.

4. La CDR montre…

une conception prête à fabriquer

la première idée

le lancement effectué

le budget seulement

une conception prête à fabriquer. Conception critique.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que son Sustainable Flight National Partnership soutient l'objectif de la communauté aéronautique de zéro émission nette de carbone d'ici 2050.

La NASA indique que la mission prolongée de PREFIRE observe désormais toute la planète ; de bonnes revues et de bons rapports sont la façon dont les conceptions d'étudiants comme de professionnels atteignent ce type d'impact.

Sur Saving Planets : Solutions · Observation de la Terre

Sources : NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/) · NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

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

1. Mission, parties prenantes et exigences
   4 exercices
2. Génération et sélection de concepts
   4 exercices
3. Filière avion : dimensionnement en masse et autonomie
   4 exercices
4. Filière avion : charge alaire et puissance
   4 exercices
5. Filière CubeSat : dimensionnement et orbite
   4 exercices
6. Filière CubeSat : bilans de puissance et de liaison
   4 exercices
7. Vérifications structurelles et thermiques
   4 exercices
8. Coût, calendrier et risques
   4 exercices
9. Prototype, essais et vérification
   4 exercices
10. Revues de conception et rapport final

4 exercices

Le laboratoire (Design studio)

L’atelier de conception est la partie pratique du cours. Ici, il est gratuit et réservé à l’entraînement, sans crédits.

Chaque TP est un outil de conception sur tableur, il n’y a donc aucun danger. Pour ce cours, ne construisez ni ne faites voler un vrai drone, ne chargez pas de batteries lithium et ne manipulez pas de matériel de lancement sans encadrement qualifié et dans le respect des règles locales. 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 : Suivi des exigences et des marges

SEMAINE 1

Objectif : Construisez le tableur d'exigences que tout votre projet utilisera, avec des marges calculées en direct.

$$\text{Margin} = (A - E)/E$$

```
Margin=(A-E)/E
```

Marge

Mode opératoire

1. Listez 10–20 exigences avec nombre, unité et méthode de vérification.
2. Saisissez une allocation de masse de 4.0 kg (valeur de manuel pour un 3U) ou une allocation de 5 kg pour le drone.
3. Saisissez des estimations de 3.4, 3.6 et 3.8 kg et calculez la marge.
4. Colorez en rouge les marges inférieures à 10%.

Tableau de données

Estimation (kg)	Marge
3.4	17.6%
3.6	11.1%
3.8	5.26%

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. (4.0 − 3.6)/3.6 = 11.1%.
2. (4.0 − 3.8)/3.8 = 5.26%.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Lien avec la planète : Le CubeSat Launch Initiative de la NASA a lancé plus de 150 CubeSats. NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/)

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

TP B : Matrice de sélection de concept avec sensibilité

SEMAINE 2

Objectif : Notez deux concepts et testez comment les poids changent le gagnant.

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Score pondéré

Mode opératoire

1. Saisissez les notes du module 2 : A (6, 9, 5), B (8, 6, 8).
2. Notez avec trois jeux de poids.
3. Tracez le gagnant en fonction du poids de la performance.
4. Rédigez un paragraphe pour défendre votre choix.

Tableau de données

Poids (coût, perf., risque)	**A**	**B**
0.3, 0.5, 0.2	7.3	7.0
0.4, 0.3, 0.3	6.6	7.4
0.2, 0.6, 0.2	7.6	6.8

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. A = 0.2 × 6 + 0.6 × 9 + 0.2 × 5 = 7.6.
2. B = 0.2 × 8 + 0.6 × 6 + 0.2 × 8 = 6.8.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

Lien avec la planète : Le SFNP de la NASA couvre véhicules, opérations et carburants durables.
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 : Boucle de dimensionnement du drone

SEMAINE 4

Objectif : Dimensionnez la masse au décollage de la filière drone pour plusieurs fractions batterie.

$$W_0 = W_{pay}/(1 - f_e - f_b)$$

```
W_0=W_pay/(1-f_e-f_b)
```

Masse au décollage

Mode opératoire

1. Saisissez 1 kg de charge utile et une fraction à vide de 0.5.
2. Calculez la masse au décollage pour des fractions batterie de 0.25, 0.30 et 0.35.
3. Ajoutez la surface alaire à partir de W/S = 105.84 N/m².
4. Choisissez un point de conception et justifiez-le.

Tableau de données

Fraction batterie	Masse au décollage (kg)
0.25	4.0
0.30	5.0
0.35	6.67

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 1/(1 − 0.5 − 0.25) = 4.0 kg.
2. 1/(1 − 0.5 − 0.35) = 6.67 kg.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/)

Lien avec la planète : Le SFNP de la NASA vise des gains d'efficacité énergétique de 25–30%. 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 : Orbite et éclipse du CubeSat

SEMAINE 6

Objectif : Calculez la période et l'éclipse dans le pire cas pour des altitudes candidates.

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

T=2π^3/μ

Période

Mode opératoire

1. Saisissez les altitudes 400, 500 et 600 km.
2. Calculez T et le nombre d'orbites par jour.
3. Calculez les minutes d'éclipse dans le pire cas.
4. Choisissez une altitude et notez le compromis avec la durée de vie liée à la traînée.

Tableau de données

Altitude (km)	T (min)	Éclipse (min)
400	92.6	36.1
500	94.6	35.8
600	96.7	35.5

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. T(600) = 2π√(6978.1³/398600.4) = 96.7 min.
2. Éclipse(400) = 0.390 × 92.6 = 36.1 min.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Lien avec la planète : NASA : les CubeSats de PREFIRE ont été lancés en mai 2024. NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/)

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

TP E : Bilan de puissance et de données

SEMAINE 7

Objectif : Bouclez les bilans de puissance et de données du CubeSat avec marge.

$$V = R_b t_p n_p$$

`V=R_bt_pn_p`

Volume de données quotidien

Mode opératoire

1. Saisissez une production des panneaux de 22.9 W et une moyenne orbitale de 14.2 W.
2. Listez les charges et comparez-les à la moyenne orbitale.
3. Calculez les données par jour à 9600 bit/s pour 2, 4 et 6 passages de dix minutes.
4. Comparez avec les données quotidiennes de votre charge utile.

Tableau de données

Passages par jour	Données (Mbit)
2	11.52
4	23.04
6	34.56

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 9600 × 600 × 2 = 11.52 Mbit.
2. 9600 × 600 × 6 = 34.56 Mbit.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

Lien avec la planète : NASA : les petits engins spatiaux sont désormais le principal moyen d’accès à l’espace pour de nombreux groupes. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.

nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/)

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

TP F : Suivi de la valeur acquise

SEMAINE 10

Objectif : Suivez la performance en coût et en délai sur trois dates d’avancement.

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV$$

`CPI=EV/AC,\ SPI=EV/PV`

Indices de performance

Mode opératoire

1. Saisissez PV, EV et AC pour trois dates.
2. Calculez CPI et SPI.
3. Calculez l’EAC avec BAC = $100k.
4. Rédigez un état d’avancement d’une ligne pour chaque date.

Tableau de données

PV, EV, AC ($k)	CPI	SPI
20, 20, 22	0.909	1.00
50, 45, 48	0.9375	0.90
80, 76, 80	0.95	0.95

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 20/22 = 0.909.
2. 76/80 = 0.95.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

Lien avec la planète : Le manuel de la NASA couvre la gestion technique transversale. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

- [ ] **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. Marge d’une allocation de 4.0 kg sur une estimation de 3.6 kg ?

    1. 0.4/3.6.

    Réponse : 11.1%.

2. Masse au décollage pour 2 kg de charge utile, fraction à vide 0.45, batterie 0.3 ?

    1. 2/0.25.

    Réponse : 8 kg.

3. Charge alaire pour un décrochage à 14 m/s, C_Lmax 1.3 ?

    1. ½ × 1.225 × 196 × 1.3.

    Réponse : 156.1 N/m².

4. Période à 400 km ?

    1. a = 6778.1 km.

    Réponse : 92.6 min.

5. Autonomie de Bréguet avec L/D = 20 au lieu de 17 (valeurs du module 3) ?

    1. 5235 × 20/17.

    Réponse : 6159 km.

Série d’entraînement finale (modules 1–10)

1. Panneau de 0.09 m² à 30% de rendement ?

    1. 1361 × 0.3 × 0.09.

    Réponse : 36.7 W.

2. Batterie pour 10 W pendant 36 min à 25% de DoD ?

1. 10 × 0.6/0.25.

Réponse : 24 Wh.

3. MS pour 100 MPa, limite d’élasticité 276 MPa, FS 1.4 ?

1. 276/140 − 1.

Réponse : 0.971.

4. EAC avec BAC $200k, EV 60, AC 64 ?

1. CPI = 0.9375.
2. 200/0.9375.

Réponse : $213.3k.

5. Moyenne et écart-type d’échantillon de 2, 4, 6 ?

1. Moyenne 4.
2. √(8/2).

Réponse : 4 et 2.

6. Couverture de vérification, 45 sur 50 ?

1. 45/50.

Réponse : 90%.

Fiche de formules

$$\text{Margin} = (A - E)/E,\ m_{alloc} = m_{est}(1 + M)$$

$$S = \sum w_i s_i,\ N = \prod n_i$$

$$W_0 = W_{pay}/(1 - f_e - f_b),\ R = (V/c)(L/D)\ln(W_i$$

$$W/S = \tfrac{1}{2}\rho V_s^2 C_{L,max},\ P = W(V/(L/D) + RC)/\eta$$

$$T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu},\ f_e = \sin^{-1}(R_E/a)/\pi$$

$$P = S\eta A\cos\theta,\ E = P_e t_e/DoD,\ L = 20\log_{10}(4\pi d$$

$$F = nmg,\ MS = \sigma_{allow}/(FS\,\sigma) - 1$$

$$CPI = EV/AC,\ SPI = EV/PV,\ EAC = BAC$$

$$\bar{x} = \sum x_i/n,\ s = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2/(n-1)}$$

$$\text{Coverage} = n_{verified}/n_{req}$$

Constantes

Constante	Valeur
Paramètre gravitationnel de la Terre (valeur de manuel)	$\mu = 398{,}600.4418\ km^3/s^2$
Rayon équatorial de la Terre (valeur de manuel)	6378.137 km
Pesanteur normale	$g = 9.80665\ m/s^2$
Constante solaire (valeur de manuel)	$1361\ W/m^2$
Masse volumique de l'air au niveau de la mer (valeur de manuel)	$1.225\ kg/m^3$
Vitesse de la lumière	c = 299792458 m/s (exact)

Source : NIST: CODATA value, speed of light in vacuum (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c)

Textes et ressources gratuits

Utilisez ces manuels, cours et pages de mission gratuits en parallèle du cours.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.83X Space Systems Engineering (Spring 2002 – Spring 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-83x-space-systems-engineering-spring-2002-spring-2003/): Supports gratuits du projet de fin d'études du MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): Rapport gratuit de la NASA sur les petits engins spatiaux.
- NASA: CubeSat Launch Initiative (https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/): Opportunités de lancement de la NASA.
- NASA Science: PREFIRE (Polar Radiant Energy in the Far-InfraRed Experiment) (https://science.nasa.gov/mission/prefire/): Mission CubeSat de la NASA.
- NASA Aeronautics: Sustainable Flight National Partnership (https://www.nasa.gov/aeronautics/sustainable-flight-national-partnership/): Aviation durable à la NASA.

Glossaire

Action
Tâche attribuée lors d'une revue.

Allocation
Part budgétée d'une ressource.

Équation de Breguet
Équation de distance franchissable d'un avion.

CDR

Revue critique de conception.

CPI
Indice de performance des coûts.

Diagramme de contraintes
Exigences tracées en fonction de la charge alaire.

Chemin critique
Plus longue chaîne de tâches dépendantes.

CubeSat
Petit satellite construit en unités de 10 cm.

Profondeur de décharge
Part de la capacité de la batterie utilisée.

Valeur acquise
Valeur budgétée du travail effectué.

Fraction d'éclipse
Part d'une orbite passée dans l'ombre.

Marge de sécurité
Admissible sur requis moins un.

Tableau morphologique
Options pour chaque fonction.

PDR
Revue de conception préliminaire.

Matrice de Pugh
Comparaison avec un concept de référence.

Exigence
Énoncé vérifiable d'un besoin.

SPI
Indice de performance des délais.

Matrice de vérification
Tableau exigence-preuve.

Charge alaire
Poids par surface alaire.

Organigramme des tâches
Projet découpé en livrables.

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	Livre une conception qui relie chaque nombre à une exigence, boucle tous les bilans avec marge, vérifie les exigences par des preuves et présente clairement compromis, risques et enseignements.
3 · Compétent	Boucle la plupart des bilans avec marge et présente une conception claire avec des lacunes mineures.
2 · En progression	A un concept et quelques bilans, mais une traçabilité des exigences faible ou des marges manquantes.
1 · Débutant	Présente une conception sans exigences, bilans ni vérification ; 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

- Avionique et ingénierie des systèmes AERO 450
- Aviation durable AERO 470
- Propulsion AERO 410
- Tous les cours