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 contenu suit un cours semestriel de dernière année en conception d'engins spatiaux pour ingénieurs aérospatiaux. Il reprend les thèmes et le niveau de MIT 16.851 Satellite Engineering (gratuit sur MIT OpenCourseWare), et s'appuie sur le Systems Engineering Handbook gratuit de la NASA et le rapport Small Spacecraft Technology State of the Art, que nous citons quand ils aident. Aucun de ces auteurs, établissements ou organismes ne cautionne cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque module est relié à un travail réel avec une source publique citée (les missions Landsat 9, Europa Clipper et PACE de la NASA et l'état des lieux de la NASA sur les technologies de petits engins spatiaux), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant la mise en ligne, et chaque TP dispose d'une simulation gratuite ou d'un tableur.
>
> 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

Les satellites d'observation de la Terre sont la conception d'engins spatiaux rendue utile : puissance, thermique, pointage et communications doivent tous fonctionner pendant des années pour que les scientifiques suivent les forêts, l'eau, les cultures et le climat.

Une bonne conception signifie aussi une longue durée de vie et moins de déchets en orbite. 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 430).
- 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

- Mécanique orbitale : orbites, périodes et Δv.
- Thermodynamique : bases du transfert de chaleur et du rayonnement.
- Circuits : puissance, tension et courant.
- Dynamique du vol et commande et Structures aérospatiales : contrôle d'attitude, rigidité et charges.

Comment étudier

- Partez toujours des exigences, et tenez un bilan (masse, puissance, Δv, liaison) pour chaque sous-système.
- Prévoyez des marges et indiquez où elles se trouvent.
- Suivez les unités : watts contre wattheures, kelvins pour le rayonnement, décibels pour les liaisons.
- Comparez chaque réponse à l'ordre de grandeur d'une mission réelle.
- Esquissez l'engin spatial et son orbite avant tout calcul.
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse, et refaites les quiz quelques jours plus tard.

Ce qu'il vous faut

- Un ordinateur ou une tablette pour les simulations PhET gratuites Blackbody Spectrum et Circuit Construction Kit.
- Un tableur (n'importe quel tableur gratuit), ou Python.
- Les pages des missions de la NASA et le rapport Small Spacecraft Technology 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	Exigences de mission et ingénierie système	Exigences et bilans ; TP A	NASA SE Handbook
2	Orbites et environnement spatial	Orbites et environnement ; TP B	MIT 16.851
3	Production d'énergie : panneaux solaires	Panneaux solaires ; TP C	NASA SST SOA
4	Stockage d'énergie et bilan de puissance	Batteries et bilan de puissance ; TP D	NASA SST SOA
5	Contrôle thermique	Contrôle thermique ; TP E	MIT 16.851
6	Structures, mécanismes et charges au lancement	Structures et charges au lancement	MIT 16.851
7	Propulsion et bilan de delta-v	Bilans de Δv ; entraînement pour le partiel	MIT 16.851
8	Sous-système de détermination et de contrôle d'attitude	Exigences du SCAO	MIT 16.851
9	Sous-système de détermination et de contrôle d'attitude	Capteurs, actionneurs et moment cinétique	NASA SST SOA
10	Communications et gestion des données	Bilans de liaison	MIT 16.851
11	Communications et gestion des données	Gestion des données ; TP F	NASA Landsat 9
12	Fiabilité, essais et fin de vie	Fiabilité et redondance	NASA SE Handbook

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
13	Fiabilité, essais et fin de vie	Essais et étalonnage	NASA Landsat 9
14	Fiabilité, essais et fin de vie	Exploitation et désorbitation	NASA SE Handbook
15	Fiabilité, essais et fin de vie	Révision ; entraînement à l'examen final	MIT 16.851

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

Exigences de mission et ingénierie système

Objectifs de mission, exigences, cycle de vie du projet, études de compromis, bilans des sous-systèmes et marges de conception.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Transformer des objectifs de mission en exigences mesurables.
- Établir un bilan de masse avec marge.
- Mener une étude de compromis pondérée simple.
- Expliquer pourquoi les marges diminuent au cours d'un projet.

Notions clés

- Une mission commence par des objectifs ; les exigences les rendent mesurables et vérifiables (un nombre, une unité et un essai).
- Les projets passent par des phases, du concept à l'exploitation, avec des revues qui vérifient que les exigences sont satisfaites.
- Chaque ressource a un bilan : masse, puissance, Δv, données, pointage et coût, chacun avec une marge.
- Les premières conceptions prévoient de grandes marges (souvent 20–30%, valeurs de manuel) car les estimations sont incertaines ; les marges diminuent à mesure que le matériel mûrit.
- Les études de compromis notent les options selon des critères pondérés ; les poids comptent autant que les notes.

Équations clés

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

`m_alloc=m_est(1+M)`

Masse avec marge

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Note de compromis pondérée

$$\text{Margin} = \frac{\text{Capability} - \text{Need}}{\text{Need}}$$

`Margin=-NeedNeed`

Marge de performance

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

Les poids ont pour somme un

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 Une estimation de masse sèche est de 800 kg. Allouez avec une marge de 20% (valeurs d'exemple).

1. 800 × 1.20.

Réponse : 960 kg.

Exemple 1.2 La NASA indique que Landsat 9 devait acquérir au moins 400 scènes par jour et en acquiert 740. Trouvez la marge.

1. (740 − 400)/400.

Réponse : 85% au-dessus de l'exigence (740/400 = 1.85).

Exemple 1.3 L'option A obtient 8 (coût) et 6 (performance) ; B obtient 5 et 9. Poids 0.4 et 0.6. Laquelle l'emporte ?

1. A = 3.2 + 3.6 = 6.8.
2. B = 2.0 + 5.4 = 7.4.

Réponse : B l'emporte, 7.4 contre 6.8.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Allouez 1200 kg avec une marge de 25%.

   1500 kg.

2. Si les poids s'inversent en 0.6/0.4, qui l'emporte ?

A: 7.2 vs B: 6.6.

3. Qu’est-ce qui rend une exigence vérifiable ?

   Une valeur mesurable et un essai ou une analyse pour la contrôler.

4. Pourquoi prévoir une marge ?

   Les estimations augmentent à mesure que les conceptions mûrissent.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les exigences sont des souhaits.
En réalité : Elles sont mesurables et vérifiables.

Idée reçue : Les marges sont du gaspillage.
En réalité : Elles absorbent la croissance et les surprises.

Idée reçue : Les études de compromis sont objectives.
En réalité : Les poids portent un jugement.

Cartes mémoire

Exigence

Besoin mesurable et vérifiable.

Bilan

Allocation d’une ressource.

Marge

Réserve au-dessus de l’estimation.

Étude de compromis

Comparaison pondérée.

Cycle de vie

Phases du concept à la désorbitation.

Vérification

Preuve qu’une exigence est satisfaite.

Quiz d’autocontrôle

1. 800 kg + 20%…

960 kg

820 kg

1000 kg

640 kg

960 kg. Multiplier.

2. Scènes de Landsat 9 par jour…

740

400

100

7400

740. NASA.

3. Gagnant du compromis…

B

A

égalité

aucun des deux

B. 7.4 > 6.8.

4. Les marges au fil du temps…

diminuent

s’élèvent

disparaissent au départ

sont fixes

diminuent. Maturité.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que les exigences du programme Landsat 9 comprenaient l'acquisition d'au moins 400 scènes par jour et une durée de vie de conception de 5 ans ; Landsat 9 acquiert 740 scènes par jour, presque le double du minimum, et emporte assez de carburant pour fonctionner au moins 10 ans.

Dépasser de telles exigences prolonge un relevé des terres qui, selon la NASA, couvre plus de cinq décennies et soutient les alertes de déforestation, le suivi de la qualité de l'eau et les rapports sur les cultures.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Solutions

Sources : NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.

Regarder le cours magistral

Lecture 21: Systems Engineering for Space Shuttle Payloads (https://ocw.mit.edu/courses/16-885j-aircraft-systems-engineering-fall-2005/resources/lecture-21/) (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**

Orbites et environnement spatial

Choisir une orbite, période et vitesse, orbites héliosynchrones et géostationnaires, traces au sol et fauchées, éclipse, vide, rayonnement et oxygène atomique.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la période et la vitesse orbitales.
- Compter les orbites par jour.
- Estimer la durée d’éclipse en orbite basse.
- Lister les dangers environnementaux selon l’orbite.

Notions clés

- Période T = 2π√(a³/μ) ; vitesse circulaire v = √(μ/a).
- Les orbites héliosynchrones sont quasi polaires et précessent une fois par an, de sorte que le satellite croise l’équateur à la même heure locale chaque jour.
- Les orbites basses traversent l’ombre de la Terre ; la fraction d’éclipse d’une orbite circulaire avec le Soleil dans le plan orbital vaut environ (2/2π)·asin(R_E/a).
- L’environnement spatial comprend le vide, des températures extrêmes, des ceintures de rayonnement, l’oxygène atomique en orbite basse et les débris.
- Les orbites plus hautes voient davantage la Terre mais exigent des optiques et des antennes plus grandes pour la même résolution et le même débit.

Équations clés

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

T=2π^3/μ

Période orbitale

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

v=μ/a

Vitesse circulaire

$$f_e \approx \frac{\sin^{-1}(R_E/a)}{\pi}$$

Fraction d’éclipse (pire cas)

$$N = \frac{86400}{T}$$

`N=86400/T`

Orbites par jour

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Landsat 9 vole à 705 km. Trouvez sa période.

1. a = 6378.137 + 705 = 7083.1 km.
2. T = 2π√(7083.1³/398,600.4).

Réponse : T = 98.9 min (la NASA indique 99 min).

Exemple 2.2 Trouvez les orbites par jour et la vitesse.

1. 86,400/5932.7 s.
2. v = √(398,600.4/7083.1).

Réponse : 14.56 orbites/jour ; 7.50 km/s.

Exemple 2.3 Estimez l’éclipse dans le pire cas.

1. asin(6378.1/7083.1) = 1.121 rad.
2. f = 1.121/π = 0.357.

Réponse : Environ 35.3 min par orbite.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Pourquoi quasi polaire ?

   Pour couvrir tout le globe.

2. Inclinaison de Landsat 9 ?

   98.2°.

3. Principal danger d’érosion en orbite basse ?

L’oxygène atomique.

4. L’éclipse diminue-t-elle à plus haute altitude ?

   Oui, la fraction baisse.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L’espace est froid, donc les engins spatiaux gèlent.

En réalité : Les parties ensoleillées peuvent surchauffer ; l’équilibre compte.

Idée reçue : Plus haut est toujours mieux.

En réalité : La résolution et les liaisons en pâtissent.

Idée reçue : Héliosynchrone signifie toujours ensoleillé.

En réalité : Seules les versions aube–crépuscule évitent l’éclipse.

Cartes mémoire

Période

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

Héliosynchrone

Même heure locale de passage.

Éclipse

Temps passé dans l’ombre de la Terre.

Fauchée

Largeur au sol imagée.

Oxygène atomique

Érode les surfaces en LEO.

Ceintures de rayonnement

Particules chargées piégées.

Quiz d’autocontrôle

1. Période de Landsat 9…

≈99 min

24 h

45 min

12 h

≈99 min. NASA.

2. Orbites par jour…

≈14.5

1

100

3

≈14.5. 86,400/T.

3. Pire éclipse à 705 km…

≈35 min

0

60 min

5 min

≈35 min. Calculé.

4. Héliosynchrone donne…

la même heure locale

aucune éclipse

Vue depuis la GEO

une traînée nulle

la même heure locale. Précession.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA place Landsat 9 sur une orbite quasi polaire héliosynchrone à 705 km, avec une inclinaison de 98.2°, une période de 99 minutes, environ 14.5 orbites par jour, une fauchée de 185 km et un passage à l'équateur vers 10 h 12 heure locale.

Avec Landsat 8, il observe le même endroit tous les 8 jours. Un éclairage à la même heure de la journée permet aux scientifiques de comparer des images sur des décennies.

Sur Saving Planets : Mécanique orbitale · Observation de la Terre

Sources : NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/): Page de mission de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Production d’énergie : panneaux solaires

Flux solaire et distance, rendement des cellules, angle solaire, puissance en début et en fin de vie, dimensionnement des panneaux et puissance massique.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la puissance d’un panneau par mètre carré.
- Appliquer la loi du cosinus et la loi de l’inverse du carré.
- Dimensionner un panneau pour une charge.
- Comparer les technologies de cellules.

Notions clés

- Le flux solaire près de la Terre est d’environ 1361 W/m² (valeur de manuel) et diminue avec l’inverse du carré de la distance au Soleil.
- La puissance diminue avec le cosinus de l’angle entre la normale au panneau et le Soleil.
- L’état des lieux de la NASA sur les petits engins spatiaux indique des cellules spatiales multijonctions à un rendement nominal de 30% (jusqu’à 34%), contre environ 20% pour le silicium monojonction.
- La dégradation due au rayonnement, à la contamination et au vieillissement réduit la puissance en fin de vie ; les panneaux sont donc dimensionnés pour la fin de vie (EOL).
- La puissance massique (W/kg) conditionne souvent la faisabilité ; la NASA note que les missions à panneaux solaires se regroupent autour de 30 W/kg.

Équations clés

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

`P=S Aθ`

Puissance du panneau

$$S(r) = \frac{1361}{r^2}$$

`S(r)=(1361)/(r^2)`

Inverse du carré (r en UA)

$$A = \frac{P}{S \eta f_d}$$

`A=(P)/(S f_d)`

Surface du panneau

$$SP = \frac{P}{m}$$

`SP=P/m`

Puissance massique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Trouvez la puissance par m² de cellules à 30% face au Soleil à 1 UA.

1. 1361 × 0.30.

Réponse : 408.3 W/m².

Exemple 3.2 Trouvez la surface pour 2 kW avec un facteur de dégradation et de remplissage de 0.85 (valeur d'exemple).

1. 2000/(1361 × 0.30 × 0.85).

Réponse : 5.76 m².

Exemple 3.3 Trouvez le flux solaire à Jupiter (5.2 UA).

1. 1361/5.2².

Réponse : 50.3 W/m², 27 fois moins.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Puissance par m² inclinée de 30° ?

   353.6 W/m².

2. Flux à Mars (1.524 UA) ?

   586 W/m².

3. Puissance par m² pour du silicium à 20% ?

   272.2 W/m².

4. Masse du panneau pour 2 kW à 30 W/kg ?

   66.7 kg.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La distance compte à peine.
En réalité : Le flux diminue en 1/r².

Idée reçue : La puissance BOL suffit.
En réalité : Dimensionnez pour la fin de vie.

Idée reçue : Seul le rendement compte.
En réalité : La masse et le volume replié comptent aussi.

Cartes mémoire

Flux solaire

≈1361 W/m² à 1 UA.

Cellule multijonction

Bandes interdites empilées, ~30%.

BOL/EOL

Début/fin de vie.

Perte en cosinus

P ∝ cos θ.

Inverse du carré

S ∝ 1/r².

Puissance massique

W/kg.

Quiz d’autocontrôle

1. 30% à 1 UA par m²…

408 W

1361 W

136 W

30 W

408 W. Multiplier.

2. Flux à Jupiter…

≈50 W/m²

1361

500

5

≈50 W/m². 1/r².

3. η nominal multijonction (NASA)…

30%

10%

50%

86%

30%. Rapport SOA.

4. L'inclinaison réduit la puissance de…

cos θ

sin θ

θ²

rien

cos θ. Cosinus.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA décrit Europa Clipper comme un engin à énergie solaire qui, panneaux déployés, mesure plus de 100 pieds (environ 30 mètres) d'envergure ; lancé le 14 oct. 2024, il parcourra 1.8 milliard de miles pour atteindre Jupiter en avril 2030.

À Jupiter, la lumière solaire est environ 27 fois plus faible qu'à la Terre, d'où la taille des panneaux de Clipper : la loi de l'inverse du carré de ce module, à l'échelle d'une mission.

Sur Saving Planets : Solutions · Mécanique orbitale

Sources : NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): Chapitre gratuit de la NASA sur l'énergie.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Chaînes en série et en parallèle.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Stockage d’énergie et bilan de puissance

Listes de charges, bilan énergétique au soleil et en éclipse, dimensionnement de batterie avec profondeur de décharge, énergie massique, gestion et distribution de l’énergie.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Établir une liste de charges et la puissance moyenne sur l’orbite.
- Dimensionner une batterie pour l’éclipse.
- Calculer la masse de batterie à partir de l’énergie massique.
- Expliquer les limites de profondeur de décharge.

Notions clés

- Le bilan de puissance additionne chaque charge par mode ; le panneau doit alimenter les charges au soleil et recharger la batterie pour l’éclipse.
- Énergie de batterie = charge × durée d’éclipse ÷ profondeur de décharge (DoD) admise.
- Une DoD faible prolonge la durée de vie en cycles ; en orbite basse il y a environ 15 cycles par jour, donc la DoD est souvent maintenue basse (recommandation de manuel).
- L’état des lieux de la NASA indique des cellules Li-ion commerciales d’environ 150–270 Wh/kg et 3.6 V en moyenne.
- La gestion et la distribution de l’énergie régulent la tension du bus, commutent les charges et isolent les pannes.

Équations clés

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

`E=(P_et_e)/(DoD)`

Énergie de batterie

$$m_b = \frac{E}{e_{sp}}$$

`m_b=_sp`

Masse de batterie

$$P_{avg} = \frac{P_d t_d + P_e t_e}{T}$$

`P_avg=(P_dt_d+P_et_e)/(T)`

Charge moyenne sur l’orbite

$$Ah = \frac{Wh}{V}$$

`Ah=Wh/V`

Capacité

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Une charge de 500 W doit tenir l’éclipse de 35.3 minutes du module 2. Trouvez l’énergie consommée.

1. 500 × 35.28/60.

Réponse : 294 Wh.

Exemple 4.2 Dimensionnez la batterie pour une DoD de 30% (valeur d’exemple).

1. 294/0.30.

Réponse : 980 Wh.

Exemple 4.3 Trouvez la masse de batterie à 150 Wh/kg au niveau du pack.

1. 980/150.

Réponse : 6.53 kg.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Capacité à 28 V ?

   35 Ah.

2. Masse avec des cellules à 260 Wh/kg ?

   3.77 kg (cellules seules).

3. Cycles par jour à 14.56 orbites/jour ?

Environ 14.6.

4. Pourquoi pas 100% de DoD ?

   La durée de vie en cycles s’effondre.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Watts et wattheures, c’est pareil.

En réalité : Puissance contre énergie.

Idée reçue : Une décharge profonde ne pose pas de problème.

En réalité : Elle raccourcit la durée de vie.

Idée reçue : Énergie des cellules = énergie du pack.

En réalité : Les packs ajoutent de la masse pour la structure et la gestion.

Cartes mémoire

Liste de charges

Puissance par sous-système et par mode.

DoD

Fraction de la capacité utilisée.

Charge spécifique

Wh/kg.

PMAD

Gestion et distribution de l’énergie.

Éclipse

Pas d’énergie solaire.

Puissance moyenne sur l’orbite

Charge pondérée par le temps.

Quiz d’autocontrôle

1. Énergie d’éclipse…

294 Wh

500 Wh

35 Wh

1000 Wh

294 Wh. P × t.

2. Batterie à 30% de DoD…

980 Wh

294 Wh

88 Wh

3000 Wh

980 Wh. Divisez.

3. Tension d’une cellule Li-ion…

3.6 V

1.5 V

12 V

28 V

3.6 V. NASA.

4. Masse de batterie…

6.53 kg

65 kg

0.65 kg

1 kg

6.53 kg. 980/150.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'état des lieux de la NASA sur les technologies de petits engins spatiaux recense des cellules lithium-ion 18650 ayant volé sur des missions de la NASA, dont des cellules LG Chem INR18650-MJ1 à 260 Wh/kg pour la mission PACE de la NASA et des cellules LG Chem ICR18650 B3 à 191–205 Wh/kg pour Europa Clipper.

PACE, lancé en février 2024, mesure le phytoplancton, les aérosols et les nuages pour aider à surveiller la santé des océans, la qualité de l'air et le climat. Ses batteries le maintiennent en fonctionnement à chaque éclipse.

Sur Saving Planets : Océans · Circuits

Sources : NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/) · NASA Science: PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) (https://science.nasa.gov/mission/pace/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): Chapitre gratuit de la NASA sur l'énergie.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Contrôle thermique

Bilan radiatif, absorptivité et émissivité, température d’équilibre, dimensionnement des radiateurs, revêtements, réchauffeurs et isolation multicouche.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer une température d’équilibre.
- Dimensionner un radiateur.
- Choisir les revêtements selon α/ε.
- Expliquer les réchauffeurs et l’isolation.

Notions clés

- Dans le vide, la chaleur s’évacue surtout par rayonnement : Q = εσAT⁴.
- La lumière solaire absorbée vaut αSA_proj ; le rapport α/ε d’une surface fixe sa température d’équilibre.
- Une sphère noire à 1 UA avec α = ε se stabilise vers (S/4σ)^¼ ≈ 278 K.
- Les radiateurs rejettent la chaleur perdue ; les peintures blanches et les miroirs ont un faible α/ε et restent froids au soleil.
- L’isolation multicouche bloque le rayonnement ; des réchauffeurs gardent batteries et ergols au chaud pendant l’éclipse.

Équations clés

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4$$

`Q=σ AT^4`

Chaleur rayonnée

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

`T=((α S)/(4σ))^1/4`

Équilibre d’une sphère

$$A_r = \frac{Q}{\varepsilon \sigma T^4}$$

`A_r=(Q)/(σ T^4)`

Surface du radiateur

$$Q_{abs} = \alpha S A_p$$

`Q_abs=α SA_p`

Lumière solaire absorbée

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Trouvez la température d’équilibre d’une sphère à 1 UA avec α = ε.

1. T = (1361/(4 × 5.6704 × 10⁻⁸))^¼.

Réponse : T = 278.3 K (5 °C).

Exemple 5.2 Dimensionnez un radiateur pour rejeter 500 W à 290 K avec ε = 0.85 (en ignorant la lumière solaire absorbée).

1. A = 500/(0.85 × 5.6704 × 10⁻⁸ × 290⁴).

Réponse : A = 1.47 m².

Exemple 5.3 Comment la température d’équilibre varie-t-elle avec α/ε ?

1. T ∝ (α/ε)^¼.

Réponse : Doubler α/ε multiplie T par 2^¼ = 1.189.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. T pour α/ε = 2 ?

   331 K.

2. Radiateur à 260 K pour 500 W ?

   2.27 m².

3. Que fait le MLI ?

   Il bloque le flux de chaleur radiatif.

4. Pourquoi des réchauffeurs en éclipse ?

   Pour garder les pièces au-dessus de leurs températures minimales.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L'espace évacue la chaleur par conduction.

En réalité : Vide : le rayonnement domine.

Idée reçue : Le noir est toujours chaud.

En réalité : Cela dépend de α/ε.

Idée reçue : La thermique vient après coup.

En réalité : Elle conditionne l'aménagement et la puissance.

Cartes mémoire

Absorptivité α

Fraction de la lumière solaire absorbée.

Émissivité ε

Capacité à rayonner.

MLI

Isolation multicouche.

Radiateur

Surface qui rejette la chaleur.

Réchauffeur

Garde les pièces au chaud.

σ

5.6704×10^{-8} W/(m²·K⁴).

Quiz d'autocontrôle

1. Sphère à 1 UA…

278 K

373 K

200 K

0 K

278 K. Calculé.

2. Q = …

$\varepsilon\sigma AT^4$

$hA\Delta T$

$kA\Delta T/L$

$mc\Delta T$

$\varepsilon\sigma AT^4$. Rayonnement.

3. Exemple de surface de radiateur…

1.47 m^2

14.7 m^2

0.15 m^2

5 m^2

1.47 m^2. Calculé.

4. Surface à faible α/ε…

reste froide

chauffe

aucun effet

luit

reste froide. Équilibre.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA explique que le Thermal Infrared Sensor de Landsat 9 mesure la température de surface des terres et comprend un radiateur de cryoréfrigérateur, un écran terrestre, ainsi qu'un corps noir et une visée de l'espace profond pour l'étalonnage.

Ici, la conception thermique est l'instrument : TIRS mesure la chaleur émise par la Terre, ce qui selon la NASA aide à suivre et gérer l'utilisation de l'eau, uniquement parce que ses propres détecteurs sont maintenus froids et stables.

Sur Saving Planets : Thermodynamique · Observation de la Terre

Sources : NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: Thermal Control (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/thermal-control/): Chapitre gratuit de la NASA sur la thermique.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Rayonnement thermique.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Structures, mécanismes et charges au lancement

Charges au lancement, charges de conception quasi statiques, exigences de rigidité et de fréquence propre, matériaux, éléments déployables et plateformes éprouvées.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer une charge de lancement quasi statique.
- Calculer une fréquence propre.
- Expliquer les exigences de rigidité.
- Peser l’héritage face à une nouvelle conception.

Notions clés

- Le lancement soumet l’engin spatial à une accélération stationnaire, des vibrations, une ambiance acoustique et des chocs ; la conception part de facteurs de charge quasi statiques (souvent plusieurs g, valeurs de manuel).
- Les lanceurs exigent que la fréquence fondamentale de l’engin reste au-dessus d’un minimum pour éviter tout couplage avec la fusée.
- Pour un modèle masse-ressort simple, f = (1/2π)√(k/m) : la rigidité augmente la fréquence, la masse la diminue.
- Le nid d’abeilles en aluminium et les composites offrent de la rigidité pour peu de masse ; des mécanismes déploient panneaux, antennes et mâts.
- Réutiliser une plateforme qui a déjà volé (héritage) réduit le risque et les délais.

Équations clés

$$F = n\,m\,g_0$$

```
F=n m g_0
```

Charge quasi statique

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$$

```
f=(1)/(2π)/m
```

Pulsation propre

$$\sigma = F/A$$

Contrainte

$$k = \frac{EA}{L}$$

k=EA/L

Rigidité axiale

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Trouvez la charge de conception d’un engin de 1000 kg à 6 g (valeurs d’exemple).

1. 6 × 1000 × 9.80665.

Réponse : 58.8 kN.

Exemple 6.2 Un instrument de 100 kg sur un support de rigidité 10^6 N/m (valeurs d’exemple). Trouvez f.

1. $(1/2\pi)\sqrt{(10^6/100)}$.

Réponse : f = 15.9 Hz.

Exemple 6.3 Quelle rigidité faut-il au support pour doubler f ?

1. $f \propto \sqrt{k}$.

Réponse : 4 × 10^6 N/m (31.8 Hz).

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. f si la masse double ?

   11.3 Hz.

2. Charge à 4 g pour 500 kg ?

   19.6 kN.

3. Pourquoi une fréquence minimale ?

   Éviter le couplage avec la dynamique du lanceur.

4. Qu’est-ce qu’une plateforme héritée ?

   Une plateforme d’engin spatial qui a fait ses preuves en vol.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La résistance est le seul objectif.

En réalité : La rigidité dimensionne souvent la conception.

Idée reçue : Plus lourd est plus sûr.

En réalité : La masse abaisse la fréquence et coûte au lancement.

Idée reçue : Les éléments déployables sont simples.

En réalité : Ce sont des points de défaillance uniques fréquents.

Cartes mémoire

Charge quasi statique

g stationnaire équivalent.

Pulsation propre

$(1/2\pi)\sqrt{(k/m)}$.

Nid d’abeilles

Panneau léger et rigide.

Déployable

Se déplie en orbite.

Héritage

Conception éprouvée en vol.

Bus

Plateforme d’engin spatial.

Quiz d’autocontrôle

1. 6 g sur 1000 kg…

58.8 kN

6 kN

9.8 kN

588 kN

58.8 kN. nmg.

2. Exemple de f…

15.9 Hz

100 Hz

1 Hz

159 Hz

15.9 Hz. Formule.

3. Doubler f exige k ×…

4

2

√2

8

4. f ∝ √k.

4. L’héritage réduit…

le risque

toujours la masse

de la puissance

l’orbite

le risque. Éprouvé.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que Northrop Grumman a conçu et construit l'engin Landsat 9 en adaptant la plateforme LEOStar utilisée pour Landsat 8, a intégré les deux instruments et a mené les essais au niveau satellite.

Réutiliser une plateforme éprouvée est un choix de conception qui réduit le risque et aide à garder le relevé Landsat continu, ce qui selon la NASA constitue le plus long relevé satellitaire continu de la surface terrestre.

Sur Saving Planets : Structures aérospatiales · Observation de la Terre

Sources : NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): État des lieux technologique gratuit de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Propulsion et bilan de delta-v

Bilans de Δv pour l'injection en orbite, le maintien à poste, l'attitude et la désorbitation ; l'équation de la fusée pour la masse d'ergols ; l'assistance gravitationnelle ; et les choix de propulsion.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Établir un bilan de Δv.
- Calculer la masse d'ergols à partir du Δv.
- Calculer le Δv à partir des ergols.
- Expliquer l'assistance gravitationnelle.

Notions clés

- Un bilan de Δv liste chaque manœuvre : injection, maintien de l'orbite, contrôle d'attitude, évitement de collision et désorbitation, plus une marge.
- Ergols nécessaires : m_p = m_0(1 − e^(−Δv/v_e)).
- Les propulseurs monoergol sont simples ; le biergol offre un Isp plus élevé ; l'électrique offre un Isp très élevé à faible poussée.
- L'assistance gravitationnelle emprunte de la quantité de mouvement à une planète pour changer vitesse et direction sans ergols.
- Les ergols restants peuvent prolonger une mission au-delà de sa durée de vie de conception.

Équations clés

$$m_p = m_0 \left(1 - e^{-\Delta v / v_e}\right)$$

```
m_p=m_0(1-e^-Δ v/v_e)
```

Masse d'ergols

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f}$$

```
Δ v=v_e(m_0)/(m_f)
```

Équation de la fusée

$$v_e = I_{sp} g_0$$

```
v_e=I_spg_0
```

Vitesse d’éjection

$$\Delta v_{tot} = \sum \Delta v_i (1 + M)$$

`Δ v_tot=Δ v_i(1+M)`

Bilan avec marge

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Un engin de 1000 kg a besoin de 100 m/s avec un Isp de 300 s (valeurs d’exemple). Trouvez les ergols.

1. v_e = 2942 m/s.
2. m_p = 1000(1 − e^(−100/2942)).

Réponse : 33.4 kg.

Exemple 7.2 Quel Δv donnent 50 kg d’ergols ?

1. 2942 ln(1000/950).

Réponse : 150.9 m/s.

Exemple 7.3 Bilan : 60 m/s de correction d’injection, 30 m/s de maintien à poste, 10 m/s de désorbitation, 20% de marge.

1. 100 × 1.2.

Réponse : 120 m/s.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Ergols pour 120 m/s ?

   39.9 kg.

2. v_e pour un Isp de 220 s ?

   2157 m/s.

3. Qu’économise une assistance gravitationnelle ?

   Des ergols pour le même Δv.

4. Pourquoi budgéter le Δv de désorbitation ?

   Pour quitter l’orbite de façon responsable.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les ergols croissent linéairement avec le Δv.
En réalité : Exponentiellement.

Idée reçue : L’assistance gravitationnelle est de l’énergie gratuite.
En réalité : De la quantité de mouvement est échangée avec la planète.

Idée reçue : La désorbitation est facultative.
En réalité : Elle protège les orbites pour les autres.

Cartes mémoire

Budget de Δv

Somme des manœuvres.

Maintien à poste

Tenir une orbite.

Monoergol

Ergol unique, simple.

Biergol

Combustible + comburant.

Assistance gravitationnelle

Gain d’un survol planétaire.

Désorbitation

Rentrée ou orbite cimetière en fin de vie.

Quiz d’autocontrôle

1. m_p pour 100 m/s…

33.4 kg

100 kg

3.3 kg

334 kg

33.4 kg. Formule.

2. Δv avec 50 kg…

151 m/s

50 m/s

500 m/s

15 m/s

151 m/s. Éq. de la fusée.

3. Bilan avec marge…

120 m/s

100 m/s

80 m/s

200 m/s

120 m/s. ×1.2.

4. Le passage de Clipper près de la Terre en déc. 2026 est…

une assistance gravitationnelle

un atterrissage

un ravitaillement

un lancement

une assistance gravitationnelle. NASA.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique qu'Europa Clipper a survolé Mars en 2025 et repassera près de la Terre le 3 déc. 2026 pour une assistance gravitationnelle qui lui donnera de l'élan pour le reste de son voyage vers Jupiter, où il effectuera 49 survols rapprochés d'Europe.

Les assistances gravitationnelles font durer une charge d'ergols fixe, le même objectif que sert le bilan de Δv de ce module pour des satellites terrestres comme Landsat 9, qui selon la NASA emporte du carburant pour au moins 10 ans.

Sur Saving Planets : Mécanique orbitale · Propulsion

Sources : NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/) · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): État des lieux technologique gratuit de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Sous-système de détermination et de contrôle d’attitude

Exigences de pointage issues des charges utiles, capteurs et actionneurs, couples perturbateurs, bilans de moment cinétique et erreur de pointage au sol.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Déduire une exigence de pointage de la résolution au sol.
- Calculer l’erreur au sol à partir de l’erreur angulaire.
- Établir un bilan de moment cinétique.
- Choisir capteurs et actionneurs.

Notions clés

- Les charges utiles fixent le pointage : le pixel d’un imageur sous-tend un angle de (pixel au sol)/(altitude).
- Erreur au sol ≈ altitude × erreur angulaire (petits angles).
- Capteurs : viseurs d’étoiles, capteurs solaires, magnétomètres, gyroscopes ; actionneurs : roues de réaction, magnéto-coupleurs, propulseurs.
- Les perturbations (gradient de gravité, traînée, pression solaire, magnétique) accumulent un moment cinétique H = τt que les roues doivent stocker.
- Le moment cinétique est évacué par magnéto-coupleurs ou propulseurs avant que les roues ne saturent.

Équations clés

$$\theta = \frac{x}{h}$$

Angle d’un pixel

$$e = h\theta$$

Erreur au sol

$$H = \tau t$$

H=τ t

Moment cinétique accumulé

$$1'' = \frac{\pi}{648000}\,\mathrm{rad}$$

`1^=(π)/(648000) rad`

Seconde d’arc

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Landsat 9 a des pixels de 30 m depuis 705 km. Trouvez l’angle par pixel.

1. 30/705000 rad.

Réponse : 4.26×10^{-5} rad = 8.78 secondes d’arc.

Exemple 8.2 Une erreur de pointage de 0.01° depuis 705 km décale l’image de combien ?

1. 705,000 × 0.0001745.

Réponse : 123 m, environ quatre pixels.

Exemple 8.3 Une perturbation de 10^{-5} N·m agit pendant un quart d’une orbite de 98.9 minutes (valeur d’exemple). Trouvez le moment cinétique.

1. 10^{-5} × 1483 s.

Réponse : 0.0148 N·m·s.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Angle pour un pixel de 15 m ?

   4.39 secondes d’arc.

2. Erreur au sol pour 0.001° ?

   12.3 m.

3. Quel capteur donne l’attitude absolue ?

   Un viseur d’étoiles.

4. Comment désature-t-on les roues en LEO ?

   Par magnéto-coupleurs ou propulseurs.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La connaissance du pointage équivaut au contrôle.

En réalité : Ce sont des bilans distincts.

Idée reçue : Les roues peuvent absorber du moment cinétique indéfiniment.

En réalité : Elles saturent.

Idée reçue : Les petits angles n’ont pas d’importance.

En réalité : L’altitude les multiplie.

Cartes mémoire

Précision de pointage

Erreur de contrôle.

Connaissance du pointage

Erreur de mesure.

Viseur d’étoiles

Attitude à partir des étoiles.

Magnéto-coupleur

Bobine réagissant avec le champ terrestre.

Gradient de gravité

Couple de marée.

Désaturation

Décharger les roues.

Quiz d’autocontrôle

1. Angle d’un pixel Landsat…

8.78"

1°

0.1"

60"

8.78". 30/705 km.

2. 0.01° à 705 km…

123 m

12 m

1.2 km

1 m

123 m. hθ.

3. H = …

τt

Iα

τ/t

mv

τt. Moment cinétique.

4. Capteur d’attitude absolue…

viseur d’étoiles

gyroscope

roue

réchauffeur

viseur d’étoiles. Étoiles.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique pour Landsat 9 une résolution spatiale de 30 m pour les bandes visibles et infrarouge à ondes courtes, 15 m en panchromatique et 100 m en thermique, depuis 705 km.

Maintenir stable un pixel de 30 m depuis cette altitude exige un contrôle de l'ordre de la seconde d'arc ; c'est pourquoi les images Landsat se superposent d'une année à l'autre pour la détection des changements.

Sur Saving Planets : Dynamique du vol et commandes · Observation de la Terre

Sources : NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): État des lieux technologique gratuit de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Communications et gestion des données

Volume de données, débits de liaison descendante, bilan de liaison en décibels, affaiblissement en espace libre, gain d'antenne, et calcul et stockage à bord.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer l'affaiblissement en espace libre.
- Calculer le gain d'une antenne parabolique.
- Établir un bilan de liaison simple.
- Estimer le volume de données quotidien.

Notions clés

- L'affaiblissement en espace libre L = 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$ dB croît avec la distance et la fréquence.
- Gain d'une parabole G = $\eta(\pi D/\lambda)^2$; des paraboles plus grandes et des fréquences plus élevées donnent des faisceaux plus étroits et plus forts.
- Bilan de liaison : puissance reçue = puissance émise + gains − pertes (tout en dB) ; la marge au-dessus du besoin du récepteur doit être positive.
- Volume de données = images × bits par image ; débit × durée de contact doit le dépasser.
- Les calculateurs de commande et de gestion des données stockent les données, exécutent le logiciel et gèrent les pannes.

Équations clés

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

`L=20_10(4π d)/()`

Affaiblissement en espace libre

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

`G=((π D)/())^2`

Gain d'une parabole

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L$$

`P_r=P_t+G_t+G_r-L`

Bilan de liaison (dB)

$$\lambda = c/f$$

Longueur d’onde

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Trouvez l’affaiblissement en bande X (8.2 GHz) à 2000 km ($c = 3 \times 10^8$ m/s).

1. $\lambda = 0.03659$ m.
2. $20 \log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^6 / 0.03659)$.

Réponse : L = 176.7 dB.

Exemple 9.2 Trouvez le gain d’une parabole de 3 m à 8.2 GHz avec $\eta = 0.55$ (valeur d’exemple).

1. $0.55 \times (\pi \times 3/0.03659)^2$.

Réponse : G = 45.6 dBi.

Exemple 9.3 Que devient l’affaiblissement si la distance double ?

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

Réponse : +6.0 dB (182.8 dB à 4000 km).

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Longueur d’onde à 8.2 GHz ?

   3.66 cm.

2. Variation de gain pour une parabole de 6 m ?

   +6.0 dB.

3. Scènes de Landsat 9 par jour ?

   Environ 740.

4. Bits par pixel pour OLI de Landsat 9 ?

14.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les décibels s’additionnent comme des watts.

En réalité : Les dB s’additionnent pour des produits.

Idée reçue : Une fréquence plus élevée est toujours pire.

En réalité : L’affaiblissement augmente mais le gain de la parabole aussi.

Idée reçue : Le volume de données est faible.

En réalité : Il dimensionne souvent la conception des stations sol.

Cartes mémoire

Affaiblissement

Perte d’étalement en dB.

Gain d’antenne

Concentration du faisceau.

Marge de liaison

Reçu moins requis.

Bande X

≈8 GHz.

C&DH

Commande et gestion des données.

Volume de données

Bits par jour.

Quiz d’autocontrôle

1. Affaiblissement à 2000 km en bande X…

176.7 dB

100 dB

50 dB

250 dB

176.7 dB. Formule.

2. Gain d’une parabole de 3 m…

45.6 dBi

10 dBi

90 dBi

3 dBi

45.6 dBi. Formule.

3. Distance doublée…

+6 dB de perte

+3 dB

×2 dB

aucune

+6 dB de perte. 20 log 2.

4. Le bilan de liaison utilise…

des sommes en dB

des produits de watts seulement

des volts

des joules

des sommes en dB. Unités logarithmiques.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique qu’Europa Clipper emporte neuf instruments scientifiques ainsi qu’une expérience de gravimétrie utilisant son système de télécommunications, et montre son antenne à

grand gain de 10 pieds (3 mètres) installée en août 2023.

Plus près de nous, la NASA indique que Landsat 9 enregistre des données sur 14 bits et acquiert plus de 700 scènes par jour. Faire descendre autant de données au sol chaque jour est d'abord un problème de conception des communications.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Circuits

Sources : NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/) · NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): État des lieux technologique gratuit de la NASA.

- [ ] **J'ai terminé cette unité**

Fiabilité, essais et fin de vie

Taux de défaillance et fiabilité, redondance, essais d’environnement, étalonnage et vérification, exploitation et désorbitation responsable.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la fiabilité à partir d’un taux de défaillance.
- Calculer le bénéfice de la redondance.
- Décrire les essais d’environnement.
- Planifier la désorbitation en fin de vie.

Notions clés

- Avec un taux de défaillance constant λ, la fiabilité R(t) = e^(−λt) et le temps moyen entre défaillances vaut 1/λ.
- Deux unités en parallèle : R = 1 − (1 − R_1)² ; la redondance échange masse et coût contre fiabilité.
- « Tester comme on vole » : essais de vibration, acoustiques, de choc, de vide thermique et électromagnétiques avant le lancement.
- L’étalonnage maintient l’exactitude des données scientifiques dans le temps ; l’interétalonnage avec d’autres satellites relie les séries.
- En fin de vie, les engins spatiaux doivent être désorbités ou placés sur une orbite de rebut pour limiter les débris.

Équations clés

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

```
R(t)=e^- t
```

Fiabilité

$$R_p = 1 - (1 - R)^2$$

```
R_p=1-(1-R)^2
```

Deux en parallèle

$$MTBF = 1/\lambda$$

```
MTBF=1/
```

Temps moyen entre défaillances

$$R_s = \prod R_i$$

R_s= R_i

Système en série

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Une unité a λ = 10^{-5} par heure (valeur d’exemple). Trouvez sa fiabilité à 5 ans.

1. t = 43,800 h.
2. e^(−0.438).

Réponse : R = 0.645.

Exemple 10.2 Ajoutez une unité redondante en parallèle.

1. 1 − 0.355^2.

Réponse : R = 0.874.

Exemple 10.3 Trouvez le MTBF.

1. 1/10^{-5} h.

Réponse : 100000 h = 11.4 ans.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Fiabilité à 10 ans d’une seule unité ?

   0.416.

2. Système en série de 0.95 et 0.90 ?

   0.855.

3. Citez un essai d’environnement avant lancement.

   Vide thermique ou vibration.

4. Pourquoi interétalonner ?

   Pour garder des séries cohérentes entre satellites.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La redondance est gratuite.

En réalité : Elle coûte masse, puissance et argent.

Idée reçue : Les essais prouvent un risque nul.

En réalité : Ils réduisent le risque.

Idée reçue : La désorbitation, c'est le travail de quelqu'un d'autre.

En réalité : Elle est prévue dès le départ.

Cartes mémoire

Fiabilité

Probabilité de fonctionner.

Taux de défaillance λ

Défaillances par heure.

Redondance

Unités de secours.

Essai en vide thermique

Conditions spatiales au sol.

Étalonnage

Garder des mesures exactes.

Désorbitation

Désorbitation en fin de vie.

Quiz d'autocontrôle

1. R à 5 ans…

0.645

0.95

0.5

0.1

0.645. e^(−0.438).

2. Paire en parallèle…

0.874

0.645

0.416

1

$0.874.\ 1 - 0.355^2$.

3. MTBF…

100,000 h

10^{-5} h

1000 h

1 h

100,000 h. 1/λ.

4. But du survol par-dessous de Landsat…

interétalonnage

un ravitaillement

amarrage

désorbitation

interétalonnage. NASA.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA rapporte que juste après son lancement, Landsat 9 a volé directement sous Landsat 8 lors d'un « survol par-dessous » unique dans la mission, acquérant 2396 images du 12 au 16 novembre 2021, afin que les experts en étalonnage comparent les mesures des deux satellites et garantissent la continuité des données.

La NASA note que l'étalonnage embarqué et la redondance aident Landsat 9 à acquérir des données exactes et fiables pendant toute sa mission : l'ingénierie de la fiabilité au service d'un relevé planétaire.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Solutions

Sources : NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exercices

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

1. Exigences de mission et ingénierie système
   4 exercices
2. Orbites et environnement spatial
   4 exercices
3. Production d'énergie : panneaux solaires
   4 exercices
4. Stockage d'énergie et bilan de puissance
   4 exercices
5. Contrôle thermique
   4 exercices
6. Structures, mécanismes et charges au lancement
   4 exercices
7. Propulsion et bilan de delta-v
   4 exercices
8. Sous-système de détermination et de contrôle d'attitude
   4 exercices
9. Communications et gestion des données
   4 exercices
10. Fiabilité, essais et fin de vie
    4 exercices

Le laboratoire (Spacecraft design 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 une simulation gratuite ou un tableur ; il n'y a donc aucun danger physique. Ne construisez, ne chargez ni ne modifiez de packs de batteries pour ce cours. Faites des pauses d'écran, tenez-vous bien assis 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 : Bilans de masse et de puissance avec marge

SEMAINE 1

Objectif : Établissez dans un tableur un bilan de masse et de puissance pour un petit satellite d'observation de la Terre et appliquez des marges.

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

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

Allocation avec marge

Mode opératoire

1. Listez les sous-systèmes : charge utile, structure, énergie, thermique, SCAO, propulsion, communications, C&DH.
2. Saisissez des estimations de masse d'exemple totalisant 800 kg et des estimations de puissance totalisant 500 W.
3. Appliquez une marge de 20% à chaque total.
4. Refaites le compromis pondéré à deux options du module 1 et changez les poids.

Tableau de données

Bilan	Estimation	Avec 20% de marge
Masse sèche	800 kg	960 kg
Puissance	500 W	600 W

Valeurs d'exemple.

Exemple de calcul

1. 800 × 1.2 = 960 kg.
2. 500 × 1.2 = 600 W.

> **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 : NASA : Landsat 9 acquiert 740 scènes par jour pour une exigence de 400 scènes. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

TP B : Calculateur de période orbitale et d’éclipse

SEMAINE 2

Objectif : Calculez la période et l’éclipse dans le pire cas pour plusieurs altitudes d’orbite basse.

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

T=2π^3/μ

Période orbitale

Mode opératoire

1. Saisissez des altitudes de 400, 705 et 1000 km.
2. Calculez a, T et les orbites par jour.
3. Calculez la fraction d’éclipse et sa durée en minutes.
4. Comparez 705 km aux valeurs de la NASA pour Landsat 9.

Tableau de données

Altitude (km)	T (min)	Éclipse (min)
400	92.6	36.1
705	98.9	35.3
1000	105.1	34.9

Valeurs calculées pour le pire cas (Soleil dans le plan orbital).

Exemple de calcul

1. T(400) = 2π√(6778.1³/398600.4) = 92.6 min.
2. Éclipse(705) = 0.357 × 98.9 = 35.3 min.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

Lien avec la planète : La NASA indique pour Landsat 9 705 km et une période de 99 minutes. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

TP C : Cellules solaires en série et en parallèle

SEMAINE 3

Objectif : Câblez des sources comme des piles dans PhET Circuit Construction Kit pour voir les chaînes en série et en parallèle, puis dimensionnez des panneaux à travers le système solaire.

$$A = \frac{P}{S \eta f_d}$$

```
A=(P)/(S f_d)
```

Surface du panneau

Mode opératoire

1. Dans PhET Circuit Construction Kit, branchez des sources en série et en parallèle et notez tension et courant.
2. Dans un tableur, calculez la surface de panneau pour 500 W avec η = 0.30 et f_d = 0.85.
3. Recommencez à 1, 1.524 et 5.2 UA.
4. Expliquez pourquoi les missions vers les planètes extérieures ont besoin d'immenses panneaux.

Tableau de données

Distance (UA)	Surface pour 500 W (m²)
1	1.44
1.524	3.35
5.2	39.0

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 500/(1361 × 0.3 × 0.85) = 1.44 m².
2. 1.44 × 5.2² = 39.0 m².

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel navigateur et tableur conviennent.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

Lien avec la planète : NASA : les panneaux déployés d'Europa Clipper mesurent plus de 30 mètres d'envergure. NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

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

TP D : Dimensionnement de batterie pour l’éclipse

SEMAINE 4

Objectif : Dimensionnez des batteries pour différentes charges pendant une éclipse de 35.3 minutes.

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

```
E=(P_et_e)/(DoD)
```

Énergie de batterie

Mode opératoire

1. Utilisez l’éclipse à 705 km du TP B.
2. Saisissez des charges de 300, 500 et 800 W.
3. Calculez l’énergie de batterie à 30% de DoD et la masse à 150 Wh/kg.
4. Recommencez avec 20% de DoD et discutez de la durée de vie en cycles.

Tableau de données

Charge (W)	Batterie (Wh)	Masse (kg)
300	588	3.92
500	980	6.53
800	1568	10.45

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 300 × 0.588 h/0.3 = 588 Wh.
2. 1568/150 = 10.45 kg.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

Lien avec la planète : La NASA recense des cellules 18650 à 260 Wh/kg ayant volé sur sa mission PACE. NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/)

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

TP E : Bilan radiatif et dimensionnement de radiateur

SEMAINE 5

Objectif : Explorez le rayonnement thermique dans PhET Blackbody Spectrum, puis calculez des températures d'équilibre et des surfaces de radiateur.

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

T=((α S)/(4σ))^1/4

Équilibre d'une sphère

Mode opératoire

1. Dans PhET Blackbody Spectrum, comparez les spectres à 250, 290 et 6000 K.
2. Calculez les températures d'une sphère pour α/ε = 0.5, 1 et 2.
3. Calculez la surface de radiateur pour 500 W à 250, 290 et 320 K avec ε = 0.85.
4. Choisissez une température de radiateur et expliquez le compromis.

Tableau de données

Cas	Résultat
α/ε = 0.5	234.0 K
α/ε = 1	278.3 K
α/ε = 2	331.0 K
Radiateur à 250 K	2.66 m²
Radiateur à 320 K	0.99 m²

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. T = 278.3 × 0.5^¼ = 234.0 K.
2. A = 500/(0.85σ × 320⁴) = 0.99 m².

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel navigateur et tableur conviennent.

PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum) · NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: Thermal Control (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/thermal-control/)

Lien avec la planète : NASA : le TIRS de Landsat 9 utilise un radiateur de cryoréfrigérateur et un corps noir embarqué. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

TP F : Bilan de liaison descendante

SEMAINE 11

Objectif : Établissez un bilan de liaison en décibels et voyez comment la distance et la taille d’antenne modifient la marge.

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

`L=20_10(4π d)/()`

Affaiblissement en espace libre

Mode opératoire

1. Utilisez f = 8.2 GHz et c = 3 × 10⁸ m/s.
2. Calculez l’affaiblissement à 1000, 2000 et 4000 km.
3. Ajoutez la puissance d’émission, les gains des deux antennes et les autres pertes.
4. Trouvez la taille de parabole qui rétablit la marge à 4000 km.

Tableau de données

Distance (km)	Affaiblissement (dB)
1000	170.7
2000	176.7
4000	182.8

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. λ = 0.03659 m.
2. 20 $\log_{10}$(4π × 10⁶/0.03659) = 170.7 dB.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/)

Lien avec la planète : NASA : Europa Clipper emporte une antenne à grand gain de 3 mètres. NASA Science: Europa Clipper (https://science.nasa.gov/mission/europa-clipper/)

☐ **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. Allouez une estimation de 500 kg avec 30% de marge.
    1. 500 × 1.3.

    Réponse : 650 kg.

2. Trouvez la période d’une orbite circulaire à 550 km.
    1. a = 6928.1 km.
    2. $T = 2\pi\sqrt{(a^3/\mu)}$.

    Réponse : 95.6 min.

3. Surface de panneau pour 1 kW à 1 UA, $\eta = 0.30$, $f_d = 0.85$?
    1. $1000/(1361 \times 0.3 \times 0.85)$.

    Réponse : 2.88 m^2.

4. Batterie pour 400 W pendant 35 min à 25% de DoD ?
    1. $400 \times 35/60/0.25$.

    Réponse : 933 Wh.

5. Radiateur pour 300 W à 300 K, $\varepsilon = 0.9$?
    1. $300/(0.9\sigma \times 300^4)$.

    Réponse : 0.73 m^2.

Série d’entraînement finale (modules 1–10)

1. Fréquence propre pour $k = 4 \times 10^5$ N/m, m = 40 kg ?
    1. $(1/2\pi)\sqrt{(10^4)}$.

Réponse : 15.9 Hz.

2. Ergols pour 200 m/s sur 800 kg avec un Isp de 230 s ?

    1. 800(1 − e^(−200/2255.5)).

    Réponse : 67.9 kg.

3. Erreur au sol pour 0.005° depuis 600 km ?

    1. 600,000 × 8.727 × 10⁻⁵.

    Réponse : 52.4 m.

4. Affaiblissement à 1500 km, 8.2 GHz ?

    1. 20 log₁₀(4π × 1.5 × 10⁶/0.03659).

    Réponse : 174.2 dB.

5. Fiabilité pour λ = 2 × 10⁻⁶ /h sur 7 ans ?

    1. e^(−0.1226).

    Réponse : 0.885.

6. Paire en parallèle d’unités à 0.885 ?

    1. 1 − 0.115².

    Réponse : 0.987.

Fiche de formules

$$m_{alloc} = m_{est}(1+M),\ S = \sum w_i s_i$$

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

$$P = S\eta A\cos\theta,\ S = 1361/r^2$$

$$E = P_e t_e / DoD,\ m_b = E/e_{sp}$$

$$Q = \varepsilon\sigma A T^4,\ T = (\alpha S/4\varepsilon\sigma)^{1/4}$$

$$F = nmg_0,\ f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m}$$

$$m_p = m_0(1 - e^{-\Delta v/v_e})$$

$$\theta = x/h,\ e = h\theta,\ H = \tau t$$

$$L = 20\log_{10}(4\pi d/\lambda),\ G = \eta(\pi D/\lambda)^2$$

$$R = e^{-\lambda t},\ R_p = 1-(1-R)^2$$

Constantes

Constante	Valeur
μ de la Terre	398,600.4418 km^3/s^2
Rayon terrestre (équatorial)	6378.137 km
Flux solaire à 1 UA (valeur de manuel)	1361 W/m^2
Constante de Stefan–Boltzmann	$\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8}$ $W/(m^2 \cdot K^4)$
Vitesse de la lumière	299792458 m/s (3×10^8 utilisé dans les exemples)
Pesanteur normale	$g_0 = 9.80665$ m/s^2

Source : NIST: CODATA value, Stefan–Boltzmann constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma)

Textes et simulations gratuits

Utilisez ces cours gratuits, références de la NASA et simulations en parallèle du cours.

- MIT OpenCourseWare 16.851 Satellite Engineering (Fall 2003) (https://ocw.mit.edu/courses/16-851-satellite-engineering-fall-2003/): Cours gratuits du MIT sur l'ingénierie des satellites.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/): État des lieux technologique gratuit de la NASA.
- NASA Small Spacecraft Technology State of the Art: 3.0 Power (May 2026) (https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/): Chapitre gratuit de la NASA sur l'énergie.
- PhET: Blackbody Spectrum (https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum): Le rayonnement thermique en interactif.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Les circuits en interactif.

Glossaire

ADCS
Sous-système de détermination et de contrôle d'attitude.

Gain d'antenne
Concentration du faisceau par rapport à l'isotrope.

Bus
Plateforme d'engin spatial portant la charge utile.

C&DH
Commande et gestion des données.

Profondeur de décharge
Fraction de la capacité de batterie utilisée.

Éclipse
Temps passé dans l’ombre d’une planète.

Émissivité
Capacité à rayonner de la chaleur.

Fin de vie
Performance après dégradation.

Assistance gravitationnelle
Survol planétaire qui modifie la vitesse.

Héritage
Conception éprouvée en vol.

Bilan de liaison
Somme des gains et des pertes d’une liaison radio.

Marge
Réserve au-dessus du besoin.

Isolation multicouche
Couverture thermique qui bloque le rayonnement.

Affaiblissement
Perte par étalement du signal.

Charge utile
Instruments qui justifient la mission.

Redondance
Matériel de secours.

Exigence
Besoin mesurable et vérifiable.

Flux solaire
Puissance solaire par unité de surface.

Puissance massique
Puissance par unité de masse.

Orbite héliosynchrone
Orbite croisant à la même heure locale chaque jour.

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	Part des exigences, tient des bilans cohérents avec marges, vérifie unités et ordres de grandeur, et explique en langage clair les compromis entre sous-systèmes.
3 · Compétent	Résout les exercices avec des erreurs occasionnelles d'unités ou de marges.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais confond puissance et énergie, ou dB et valeurs linéaires.
1 · Débutant	Applique les formules sans exigence ni bilan ; doit revoir le module.

Pondération suggérée si vous voulez une note

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

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

Cours associés

- Dynamique du vol et commandes AERO 420
- Transferts thermiques AERO 440
- Propulsion AERO 410
- Tous les cours