Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 4, Automne

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 cours de dernière année d'un semestre en avionique et ingénierie système. Il s'inspire des thèmes et du niveau de MIT 16.842 Fundamentals of 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 : chaque module est relié à un travail réel avec une source publique citée (Landsat 9, Hubble, Dragonfly et le système de trafic aérien de la FAA), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et chaque TP dispose d'une simulation gratuite ou d'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, les engins météorologiques et un trafic aérien efficace dépendent tous d'une avionique qui fonctionne pendant des années sans intervention, et d'une ingénierie système qui fait fonctionner des milliers de pièces comme un tout.

De bonnes exigences, la redondance et les essais permettent à un satellite de continuer à mesurer forêts, glaces et océans bien au-delà de sa durée de vie nominale. 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 450).
- 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

- Circuits : tension, courant, résistance et signaux numériques.
- Probabilités et statistiques : règles de probabilité, loi exponentielle et variance.
- Dynamique du vol et commandes : rétroaction, capteurs et actionneurs.
- Introduction à la programmation : boucles, fonctions et temporisation.

Comment étudier

- Partez toujours de l'exigence que sert le problème.
- Dessinez les schémas-blocs et les interfaces avant tout calcul.
- Gardez les probabilités entre 0 et 1 et vérifiez qu'elles y restent.
- Suivez les unités : bits, octets, secondes, hertz, décibels.
- Demandez-vous « que se passe-t-il si cette pièce tombe en panne ? » pour chaque bloc que vous dessinez.
- 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 la simulation gratuite PhET Circuit Construction Kit: DC.
- Un tableur (n'importe quel tableur gratuit), ou Python.

- Le NASA Systems Engineering Handbook gratuit 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	Le cycle de vie de l'ingénierie système et les exigences	Cycle de vie et exigences	NASA SE Handbook
2	Architecture, interfaces et intégration	Architecture et interfaces ; TP A	MIT 16.842
3	Fiabilité et redondance	Modèles de fiabilité	NASA SE Handbook
4	Fiabilité et redondance	Redondance ; TP B	NASA Hubble
5	Analyse de sécurité : AMDE et arbres de défaillance	AMDE et arbres de défaillance ; TP C	NASA SE Handbook
6	Avionique numérique et bus de données	Avionique numérique	MIT 16.842
7	Avionique numérique et bus de données	Bus de données ; TP D ; entraînement au partiel	NASA Landsat 9
8	Capteurs de navigation : centrales inertielles, GNSS, caméras et lidar	Capteurs de navigation	NASA Dragonfly
9	Fusion de capteurs et filtre de Kalman	Fusion de capteurs et filtres de Kalman ; TP E	MIT 16.842
10	Communication et surveillance : ADS-B	Communication et ADS-B	FAA ADS-B
11	Logiciel de vol temps réel	Logiciel temps réel	MIT 16.842
12	Logiciel de vol temps réel	Protection contre les pannes ; TP F	NASA Hubble
13	Intégration, vérification et opérations	Intégration et vérification	NASA SE Handbook
14	Intégration, vérification et opérations	Bancs d'essai et injection de pannes	NASA Dragonfly

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
15	Intégration, vérification et opérations	Révision ; entraînement à l’examen final	MIT 16.842

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

Le cycle de vie de l’ingénierie système et les exigences

Parties prenantes, cycle en V, phases du cycle de vie et revues, bonnes exigences, mesures de performance technique et marges.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Décrire le cycle en V.
- Rédiger des exigences vérifiables.
- Calculer des marges par rapport à une exigence.
- Suivre une mesure de performance technique.

Notions clés

- L’ingénierie système transforme les besoins des parties prenantes en un système qui fonctionne, dans les délais et le budget, sur toute sa durée de vie.
- Le cycle en V descend à gauche (exigences, architecture, conception) et remonte à droite (intégration, vérification, validation).
- Une bonne exigence est nécessaire, claire, réalisable et vérifiable, avec un nombre, une unité et une méthode d’essai.
- Les mesures de performance technique comme la masse, la puissance et le débit de données sont suivies par rapport aux allocations avec une marge.
- Les revues (concept, conception préliminaire, conception détaillée) conditionnent chaque phase ; les étudiants de MIT 16.842 préparent une conception au niveau d’une revue de conception préliminaire.

Équations clés

$$\text{Margin} = \frac{C - N}{N}$$

```
Margin=(C-N)/(N)
```

Marge sur le besoin

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

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

Allocation avec marge

$$S = \sum w_i s_i$$

`S= w_is_i`

Note de compromis pondérée

$$\sum w_i = 1$$

`w_i=1`

Les poids ont pour somme un

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 La NASA exige que Landsat 9 collecte au moins 400 scènes par jour ; il en collecte 740. Trouvez la marge.

1. (740 − 400)/400.

Réponse : 85% au-dessus de l'exigence.

Exemple 1.2 Un boîtier avionique est estimé à 12 kg. Allouez avec 25% de marge (valeurs d'exemple).

1. 12 × 1.25.

Réponse : 15 kg.

Exemple 1.3 L'option A obtient 7 (coût) et 8 (fiabilité) ; B obtient 9 et 6. Poids 0.3 et 0.7. Laquelle l'emporte ?

1. A = 2.1 + 5.6 = 7.7.
2. B = 2.7 + 4.2 = 6.9.

Réponse : A, 7.7 contre 6.9.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. La durée de vie nominale de Landsat 9 est de 5 ans et les consommables durent 10 ans. Rapport ?

   2.

2. Allouez 400 W de puissance avec 30% de marge.

520 W.

3. Réécrivez « la radio doit être rapide » sous forme d’exigence vérifiable.

   Par exemple : « La radio doit transmettre en liaison descendante au moins 300 Mbit/s, vérifié par essai. »

4. Quel côté du V contient la vérification ?

   Le côté droit.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les exigences décrivent la conception.
En réalité : Elles disent ce qui est nécessaire, pas comment.

Idée reçue : La marge est du gaspillage.
En réalité : Elle absorbe la croissance et les imprévus.

Idée reçue : Vérification et validation sont la même chose.
En réalité : Vérification : bien construit ; validation : la bonne chose construite.

Cartes mémoire

Cycle en V

Décomposer en descendant, intégrer et vérifier en remontant.

Exigence

Besoin vérifiable.

TPM

Mesure de performance technique suivie.

PDR

Revue de conception préliminaire.

Vérification

Bien construit.

Validation

La bonne chose construite.

Quiz d’autocontrôle

1. Marge de Landsat 9…

85%

74%

40%

185%

85%. (740 − 400)/400.

2. 12 kg + 25%…

15 kg

13 kg

12.25 kg

16 kg

15 kg. Multiplier.

3. Gagnant du compromis…

A

B

égalité

aucun des deux

A. 7.7 > 6.9.

4. Une bonne exigence est…

vérifiable

vague

une conception

facultative

vérifiable. Testable.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA liste les exigences de Landsat 9, dont au moins 400 scènes par jour et une durée de vie nominale de 5 ans ; Landsat 9 collecte 740 scènes par jour, presque le double du minimum, et emporte assez de carburant pour fonctionner au moins 10 ans.

Avec Landsat 8, il observe le même endroit tous les 8 jours, ce qui permet des alertes quasi hebdomadaires de déforestation tropicale, le suivi de la qualité de l'eau et des rapports sur les cultures, fruits d'exigences rédigées et tenues avec marge.

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

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, sections 3–4.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): 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**

Architecture, interfaces et intégration

Architecture fonctionnelle et physique, maîtrise des interfaces, diagrammes N², ingénierie système basée sur les modèles et pourquoi les interfaces croissent vite.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Associer les fonctions aux composants.
- Compter les interfaces potentielles.
- Lire un diagramme N².
- Expliquer l’ingénierie système basée sur les modèles.

Notions clés

- Une architecture fonctionnelle dit ce que fait le système ; une architecture physique dit quels boîtiers le font.
- Chaque paire de composants peut nécessiter une interface, donc les interfaces potentielles croissent comme n(n − 1)/2.
- Un diagramme N² place les composants sur la diagonale et les données ou l’alimentation qui circulent entre eux hors de la diagonale.
- Les documents de contrôle d’interface fixent connecteurs, signaux, temporisation et formats de données pour que les équipes construisent en parallèle.
- La NASA indique que la mise à jour de son manuel inclut l’ingénierie système basée sur les modèles (MBSE), qui garde exigences, architecture et analyses dans un seul modèle connecté.

Équations clés

$$I = \frac{n(n-1)}{2}$$

```
I=(n(n-1))/(2)
```

Interfaces bidirectionnelles potentielles

$$N_{cells} = n(n-1)$$

```
N_cells=n(n-1)
```

Cellules N² hors diagonale

$$B = \sum_{i} r_i$$

`B=_i r_i`

Charge totale du bus

$$U = B/B_{max}$$

`U=B/B_max`

Taux d’occupation du bus

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 Une suite avionique compte 8 boîtiers. Combien d’interfaces potentielles ?

1. 8 × 7/2.

Réponse : 28.

Exemple 2.2 Ajoutez 4 boîtiers (n = 12).

1. 12 × 11/2.

Réponse : 66, plus du double.

Exemple 2.3 Trois boîtiers envoient 20, 35 et 15 kbit/s sur un bus à 100 kbit/s. Taux d’occupation ?

1. 70/100.

Réponse : 70%.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Cellules N^2 hors diagonale pour n = 8 ?

   56.

2. Interfaces pour n = 4 ?

   6.

3. Pourquoi garder l’occupation du bus sous 100% ?

De la place pour la croissance, les réémissions et la gigue temporelle.

4. Qu’est-ce qu’un ICD ?

   Document de contrôle d’interface.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les interfaces croissent linéairement.

En réalité : Elles croissent à peu près comme n^2.

Idée reçue : L’architecture n’est qu’une liste de pièces.

En réalité : Elle inclut fonctions et connexions.

Idée reçue : La MBSE remplace les ingénieurs.

En réalité : Elle relie leur travail.

Cartes mémoire

Architecture

Fonctions associées aux composants.

Diagramme N²

Matrice d’interfaces.

ICD

Document de contrôle d’interface.

MBSE

Ingénierie système basée sur les modèles.

Intégration

Assemblage des composants.

Charge du bus

Somme des débits de données.

Quiz d’autocontrôle

1. Interfaces pour 8 boîtiers…

28

56

16

64

28. n(n − 1)/2.

2. Pour 12 boîtiers…

66

132

24

144

66. 12 × 11/2.

3. Occupation du bus…

70%

35%

100%

7%

70%. 70/100.

4. MBSE signifie…

ingénierie système basée sur les modèles

bilan de masse

référence de mission

erreur moyenne de bus

ingénierie système basée sur les modèles. NASA.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que son Systems Engineering Handbook a été mis à jour pour inclure l'ingénierie système basée sur les modèles, en s'appuyant sur les leçons de missions et d'incidents.

Des interfaces claires permettent aux équipes instruments et plateforme de construire en parallèle, et c'est ainsi que des missions d'observation de la Terre comme Landsat 9 arrivent en orbite dans les délais.

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

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 4.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Cours gratuits du MIT.

Regarder le cours magistral

Session 8: Systems Integration and Interface Management (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/resources/session-8-systems-integration-and-interface-management/) (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**

Fiabilité et redondance

Taux de défaillance, fiabilité exponentielle, MTBF, systèmes série et parallèle, triple redondance modulaire, systèmes k parmi n et disponibilité.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la fiabilité à partir d’un taux de défaillance.
- Combiner des blocs série et parallèle.
- Calculer la fiabilité d’un vote 2 parmi 3.
- Calculer la disponibilité.

Notions clés

- Avec un taux de défaillance constant λ, la fiabilité décroît comme e^(−λt) et le temps moyen entre pannes vaut 1/λ.
- Les systèmes série tombent en panne si une seule pièce lâche, donc les fiabilités se multiplient.
- Les systèmes parallèles (redondants) ne tombent en panne que si toutes les pièces lâchent.
- La triple redondance modulaire vote 2 parmi 3 ; elle bat une unité seule en début de vie, mais plus une fois R sous 0.5.
- La disponibilité est la fraction du temps où un système fonctionne : MTBF/(MTBF + MTTR).

Équations clés

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

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

Fiabilité exponentielle

$$R_s = \prod R_i,\ R_p = 1 - \prod (1 - R_i)$$

```
R_s= R_i,\ R_p=1-(1-R_i)
```

Série et parallèle

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

```
R_2/3=3R^2-2R^3
```

Vote deux parmi trois

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

`A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)`

Disponibilité

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 Une unité a $\lambda = 10^{-5}$ par heure. Fiabilité sur 10000 h ?

1. e^(−0.1).

Réponse : 0.905.

Exemple 3.2 Deux unités de ce type en parallèle ?

1. $1 - (1 - 0.9048)^2$.

Réponse : 0.991.

Exemple 3.3 Trois unités votant 2 parmi 3 ?

1. $3(0.9048)^2 - 2(0.9048)^3$.

Réponse : 0.975.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. MTBF pour $\lambda = 10^{-5}$ /h ?

   100,000 h.

2. Unité seule, double et TMR à 50000 h ?

   0.607, 0.845, 0.657.

3. Disponibilité avec un MTBF de 1000 h et un MTTR de 2 h ?

   0.998.

4. Hubble a besoin d’un gyroscope sur trois en état de marche. Quel modèle ?

   1 parmi 3 (parallèle).

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La redondance aide toujours.

En réalité : La TMR perd face à une unité seule dès que R < 0.5.

Idée reçue : Le MTBF est une durée de vie garantie.

En réalité : C’est une moyenne ; beaucoup tombent en panne plus tôt.

Idée reçue : La fiabilité série s’additionne.

En réalité : Elle se multiplie.

Cartes mémoire

Taux de défaillance

Défaillances par heure.

MTBF

Temps moyen entre défaillances.

Redondance

Unités de secours.

TMR

Triple redondance modulaire, vote 2 parmi 3.

Disponibilité

Fraction du temps en fonctionnement.

k parmi n

Fonctionne si k sur n fonctionnent.

Quiz d’autocontrôle

1. R(10,000 h)...

0.905

0.990

0.1

0.5

0.905. e^(−0.1).

2. Paire en parallèle…

0.991

0.819

0.905

1

0.991. 1 − 0.0952^2.

3. TMR…

0.975

0.905

0.991

0.857

0.975. $3R^2 - 2R^3$.

4. MTBF…

100,000 h

10,000 h

1000 h

10^{-5} h

100,000 h. 1/λ.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que Hubble a reçu six nouveaux gyroscopes en 2009, que trois sont restés opérationnels, et que lorsqu'un a renvoyé des mesures erronées, la NASA a passé Hubble en mode à un gyroscope en gardant un autre en réserve.

Lancé en 1990, Hubble a plus que doublé sa durée de vie prévue ; une redondance prévue des décennies plus tôt maintient en orbite un observatoire opérationnel au lieu d'un remplaçant.

Sur Saving Planets : Dynamique du vol et commandes · Conception d'engins spatiaux

Sources : NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): Article de la NASA sur les gyroscopes de Hubble.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Analyse de sécurité : AMDE et arbres de défaillance

Dangers, analyse des modes de défaillance et de leurs effets, indices de priorité de risque, arbres de défaillance avec portes ET et OU, et conception critique pour la sécurité.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Mener une AMDE simple.
- Calculer un indice de priorité de risque.
- Évaluer des portes ET et OU.
- Choisir des mesures d'atténuation.

Notions clés

- L'AMDE procède de bas en haut : pour chaque pièce, listez comment elle peut défaillir, l'effet, et comment ce sera détecté.
- Un indice de priorité de risque multiplie les notes de gravité, d'occurrence et de détection (chacune de 1–10, échelle de manuel).
- Un arbre de défaillance procède de haut en bas à partir d'un événement redouté ; les portes OU ajoutent du risque, les portes ET (redondance) le réduisent.
- Pour de petites probabilités indépendantes, une porte OU vaut à peu près la somme et une porte ET le produit.
- Les leçons des accidents façonnent la pratique ; la NASA indique que son manuel s'est appuyé sur le Columbia Accident Investigation Board et d'autres rapports.

Équations clés

$$RPN = S \times O \times D$$

```
RPN=S× O× D
```

Indice de priorité de risque

$$P_{OR} = 1 - \prod (1 - p_i)$$

```
P_OR=1-(1-p_i)
```

Porte OU

$$P_{AND} = \prod p_i$$

```
P_AND= p_i
```

Porte ET

$$P_{OR} \approx \sum p_i$$

Approximation des événements rares

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 Une défaillance de capteur obtient S = 8, O = 4, D = 5. IPR ?

1. 8 × 4 × 5.

Réponse : 160.

Exemple 4.2 L'une ou l'autre de deux pannes ($p = 10^{-3}$ et 2×10^{-3}) entraîne une perte de données. Probabilité ?

1. 1 − (0.999)(0.998).

Réponse : 2.998×10^{-3}.

Exemple 4.3 La perte exige les deux pannes (conception redondante).

1. $10^{-3} \times 2 \times 10^{-3}$.

Réponse : 2×10^{-6}.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Une meilleure détection fait baisser D à 2. Nouvel IPR ?

   64.

2. Approximation des événements rares pour la porte OU ?

   3×10^{-3}.

3. Quelle porte la redondance crée-t-elle ?

   AND.

4. Descendant ou ascendant : arbre de défaillance ?

   Descendant.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L’IPR est une probabilité.

En réalité : C’est un score de classement.

Idée reçue : Les portes OU multiplient.

En réalité : Ce sont les portes ET qui multiplient.

Idée reçue : Les pièces redondantes tombent en panne indépendamment.

En réalité : Des causes communes peuvent faire tomber les deux.

Cartes mémoire

FMEA

Analyse des modes de défaillance et de leurs effets.

RPN

Gravité × occurrence × détection.

Arbre de défaillance

Logique descendante de la défaillance.

Porte OU

N’importe quelle entrée provoque l’événement.

Porte ET

Toutes les entrées sont nécessaires.

Cause commune

Un événement qui fait défaillir plusieurs pièces.

Quiz d’autocontrôle

1. RPN…

160

17

40

320

160. 8 × 4 × 5.

2. Porte OU…

≈ 3×10^{-3}

2×10^{-6}

10^{-3}

0.5

≈ 3×10^{-3}. 1 − ∏(1 − p).

3. Porte ET…

2×10^{-6}

3×10^{-3}

10^{-3}

2×10^{-3}

2×10^{-6}. Produit.

4. L’AMDE fonctionne…

de bas en haut

de haut en bas

de côté

au hasard

de bas en haut. Pièce par pièce.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que les leçons documentées par le Columbia Accident Investigation Board, la NASA Integrated Action Team et d'autres, ainsi que les incidents lors d'opérations au sol et de vols spatiaux commerciaux, ont façonné son manuel d'ingénierie système.

Les mêmes outils de sécurité protègent les satellites qui suivent incendies, tempêtes et banquise. Les probabilités de ce module sont des valeurs d'exemple.

Sur Saving Planets : Solutions · Observation de la Terre

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 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Cours gratuits du MIT.

- [ ] **J'ai terminé cette unité**

Avionique numérique et bus de données

Données binaires, conversion analogique-numérique, quantification, bus de données série (ARINC 429, MIL-STD-1553), temporisation des messages et volume de données.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la résolution et le SNR d’un CAN.
- Calculer le temps de transmission d’un message.
- Comparer des types de bus.
- Estimer un volume de données.

Notions clés

- Un convertisseur à N bits divise sa plage d’entrée en 2^N niveaux ; un pas correspond au bit de poids faible.
- Le SNR de quantification idéal vaut environ 6.02N + 1.76 dB.
- ARINC 429 est un bus à un émetteur et plusieurs récepteurs à 100 kbit/s en haute vitesse (valeur de manuel) ; MIL-STD-1553 est un bus commande/réponse à 1 Mbit/s (valeur de manuel).
- Le temps d’un message est le nombre de bits divisé par le débit ; l’en-tête et les intervalles s’y ajoutent.
- Une meilleure résolution radiométrique (plus de bits) montre des différences plus fines mais produit plus de données.

Équations clés

$$\Delta V = \frac{V_{FS}}{2^N}$$

`Δ V=_FS2^N`

Pas du CAN

$$SNR \approx 6.02N + 1.76 \text{ dB}$$

SNR de quantification

$$t = \frac{bits}{R_b}$$

`t=(bits)/(R_b)`

Temps de transmission

$$L = 2^N$$

`L=2^N`

Nombre de niveaux

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 Un CAN 12 bits couvre 10 V. Taille du pas ?

1. 10/4096.

Réponse : 2.44 mV.

Exemple 5.2 Son SNR idéal ?

1. 6.02 × 12 + 1.76.

Réponse : 74.0 dB.

Exemple 5.3 Combien de temps prend un mot ARINC 429 de 32 bits à 100 kbit/s ?

1. 32/100,000.

Réponse : 0.32 ms.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Landsat 9 a une résolution radiométrique de 14 bits. Niveaux ?

   16,384.

2. SNR pour 8 bits ?

   49.9 dB.

3. Même mot de 32 bits sur un bus à 1 Mbit/s ?

   0.032 ms.

4. Pas pour 16 bits sur 10 V ?

0.153 mV.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Plus de bits signifie automatiquement plus de précision.

En réalité : Le bruit et l’étalonnage la limitent aussi.

Idée reçue : Le débit binaire est égal au débit de données utiles.

En réalité : L’en-tête en prend une part.

Idée reçue : Un seul bus convient à tout.

En réalité : Choisissez selon la temporisation, l’intégrité et le coût.

Cartes mémoire

ADC

Convertisseur analogique-numérique.

LSB

Pas du bit de poids faible.

ARINC 429

Bus avionique unidirectionnel.

MIL-STD-1553

Bus commande/réponse.

Quantification

Arrondi à des niveaux.

Débit binaire

Bits par seconde.

Quiz d’autocontrôle

1. Pas 12 bits sur 10 V…

2.44 mV

24.4 mV

0.244 mV

10 mV

2.44 mV. 10/4096.

2. SNR 12 bits…

74.0 dB

72 dB

49.9 dB

98 dB

74.0 dB. 6.02N + 1.76.

3. Durée d’un mot ARINC…

0.32 ms

3.2 ms

32 ms

0.032 ms

0.32 ms. $32/10^5$.

4. Niveaux sur 14 bits…

16,384

4096

65,536

14

16,384. 2^{14}.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique pour Landsat 9 une résolution radiométrique de 14 bits, 11 bandes spectrales et plus de 700 scènes par jour, chacune de 185 km sur 180 km.

Des pas radiométriques fins permettent aux scientifiques de voir des changements subtils de qualité de l'eau et de santé de la végétation, au prix de davantage de données à stocker et transmettre par l'avionique.

Sur Saving Planets : Observation de la Terre · Circuits

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

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Capteurs de navigation : centrales inertielles, GNSS, caméras et lidar

Gyroscopes et accéléromètres, dérive de la navigation inertielle, mesure de distance par navigation satellitaire, et capteurs de vision et lidar pour l'autonomie.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la dérive due à un biais d'accéléromètre.
- Relier l'erreur de temps à l'erreur de distance.
- Comparer les points forts des capteurs.
- Expliquer pourquoi on combine les capteurs.

Notions clés

- Une centrale inertielle (IMU) mesure les vitesses de rotation (gyroscopes) et la force spécifique (accéléromètres).
- Intégrer deux fois transforme un petit biais d'accéléromètre en une erreur de position qui croît comme t².
- La navigation satellitaire mesure la distance à partir du temps de trajet du signal ; 1 µs d'erreur d'horloge représente environ 300 m de distance.
- Les caméras et le lidar mesurent directement l'environnement et donnent des informations de position et de danger qui ne dérivent pas.
- Aucun capteur ne suffit seul : les IMU sont rapides mais dérivent ; les capteurs externes sont plus lents mais bornés.

Équations clés

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

`e=12bt^2`

Erreur de position due au biais d'accéléromètre

$$\rho = c\,\Delta t$$

`ρ=c Δ t`

Distance à partir du temps de trajet

$$\theta_e = \omega_b t$$

`θ_e=ω_bt`

Erreur de cap due au biais de gyroscope

$$b = 10^{-3} g$$

`b=10^-3g`

Biais d’exemple de 1 milli-g

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Un biais d’accéléromètre de 1 milli-g (9.807×10^{-3} m/s²) n’est pas corrigé pendant 60 s. Erreur de position ?

1. $\frac{1}{2} \times 9.807 \times 10^{-3} \times 60^2$.

Réponse : 17.7 m.

Exemple 6.2 Après 600 s ?

1. $\frac{1}{2} \times 9.807 \times 10^{-3} \times 600^2$.

Réponse : 1765 m, 100 fois pire pour 10 fois plus de temps.

Exemple 6.3 L’horloge d’un récepteur est décalée de 1 µs. Erreur de distance ?

1. $299{,}792{,}458 \times 10^{-6}$.

Réponse : 300 m.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Erreur après 10 s avec le même biais ?

   0.49 m.

2. Biais de gyroscope de 0.01°/h pendant 10 h ?

   0.1° de cap.

3. Pourquoi Dragonfly a-t-il besoin d’un lidar sur Titan ?

   Pour mesurer l’altitude et la pente du terrain et repérer les dangers.

4. Erreur d’horloge pour 3 m de distance ?

   10 ns.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Les IMU n’ont jamais besoin de correction.
En réalité : Leurs erreurs croissent avec le temps.

Idée reçue : Le GNSS fonctionne partout.
En réalité : Pas en intérieur, sous l’eau ni sur Titan.

Idée reçue : La dérive croît linéairement.
En réalité : La dérive due au biais croît comme t^2.

Cartes mémoire

IMU

Gyroscopes et accéléromètres.

Navigation à l’estime

Navigation par intégration.

GNSS

Navigation par satellite.

Lidar

Télémétrie laser.

Biais

Décalage constant du capteur.

Pseudo-distance

Distance incluant l’erreur d’horloge.

Quiz d’autocontrôle

1. Erreur à 60 s…

17.7 m

0.59 m

1765 m

35 m

17.7 m. ½bt².

2. Erreur à 600 s…

1765 m

177 m

17.7 km

600 m

1765 m. 100×.

3. Erreur d’horloge de 1 µs…

300 m

3 m

30 km

0.3 m

300 m. c Δt.

4. Capteur qui dérive…

IMU

lidar

corrélation avec une carte par caméra

GNSS

IMU. Intégration.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que le récent essai de « premier vol » de Dragonfly a fait tourner le logiciel de vol et une avionique représentative du vol avec des données simulées de ses caméras de navigation, de ses centrales inertielles et de son lidar.

Le lidar mesure l'altitude et la pente du terrain et identifie les dangers, ce qui permet au giravion de choisir un site d'atterrissage sûr sur Titan, où il doit arriver en 2034.

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

Sources : NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Article de la NASA sur Dragonfly.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Cours gratuits du MIT.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Fusion de capteurs et filtre de Kalman

Combinaison de mesures bruitées, pondération par l'inverse de la variance, filtre de Kalman scalaire et son cycle prédiction-mise à jour.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Fusionner deux mesures selon leur variance.
- Calculer un gain de Kalman.
- Effectuer une étape prédiction-mise à jour.
- Expliquer pourquoi la fusion bat chacun des capteurs.

Notions clés

- Deux estimations indépendantes se combinent au mieux en pondérant chacune par l'inverse de sa variance.
- La variance fusionnée est plus petite que chacune des variances d'entrée.
- Le filtre de Kalman prédit l'état vers l'avant, puis le corrige par une mesure avec un gain K.
- K = P/(P + R) : faites davantage confiance à la mesure quand la prédiction est incertaine (P grand) et le capteur bon (R petit).
- Les systèmes de navigation fusionnent les prédictions rapides de l'IMU avec des mises à jour plus lentes de caméra, lidar ou GNSS.

Équations clés

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

Variance fusionnée

$$K = \frac{P}{P + R}$$

K=(P)/(P+R)

Gain de Kalman scalaire

$$\hat{x}^+ = \hat{x}^- + K(z - \hat{x}^-)$$

x^+= x^-+K(z- x^-)

Mise à jour

$$P^{+} = (1 - K)P$$

P^+=(1-K)P

Variance mise à jour

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Des capteurs avec σ = 4 m et 3 m sont fusionnés. σ fusionné ?

1. σ² = 16 × 9/25 = 5.76.
2. σ = √5.76.

Réponse : 2.4 m.

Exemple 7.2 Variance de prédiction P = 16 m², mesure R = 9 m². Gain ?

1. 16/25.

Réponse : 0.64.

Exemple 7.3 Prédiction 100 m, mesure 105 m. Mise à jour et nouvelle variance ?

1. x = 100 + 0.64 × 5 = 103.2 m.
2. P = 0.36 × 16.

Réponse : 103.2 m avec une variance de 5.76 m².

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Fusionnez deux capteurs identiques de σ = 2 m.

   σ = 1.41 m.

2. Gain si R = 0 ?

   1 : faire entièrement confiance à la mesure.

3. Gain si R est énorme ?

Proche de 0 : garder la prédiction.

4. Qu’est-ce qui fait croître P entre les mises à jour ?

   Le bruit de processus dans la prédiction.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Moyenner les capteurs à poids égal.

En réalité : Pondérez par l’inverse de la variance.

Idée reçue : La fusion ne peut pas battre le meilleur capteur.

En réalité : Elle bat les deux.

Idée reçue : Les filtres de Kalman suppriment toute erreur.

En réalité : Ils minimisent la variance sous certaines hypothèses.

Cartes mémoire

Fusion de capteurs

Combinaison de mesures.

Gain de Kalman

Poids donné à la mesure.

Covariance

Incertitude de l’estimation.

Prédiction

Propager l’état.

Mise à jour

Corriger avec une mesure.

Innovation

Mesure moins prédiction.

Quiz d’autocontrôle

1. σ fusionné…

2.4 m

3.5 m

1 m

5 m

2.4 m. √5.76.

2. Gain de Kalman...

0.64

0.36

1.78

0.5

0.64. P/(P + R).

3. Estimation mise à jour...

103.2 m

105 m

100 m

102.5 m

103.2 m. 100 + 0.64 × 5.

4. Nouvelle variance...

5.76 m^2

16 m^2

9 m^2

25 m^2

5.76 m^2. (1 − K)P.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA rapporte que l'équipe de Dragonfly a ajouté capteurs et fonctions pas à pas, en terminant par le lidar, dernière pièce nécessaire pour simuler entièrement ce que le giravion rencontrera sur Titan.

Un émulateur de caméra a rendu chaque scène simulée de Titan avec des temps d'exposition d'environ 20 à 70 millisecondes, ceux qu'utiliseront les caméras, afin que le logiciel de fusion voie une temporisation réaliste. Les variances de ce module sont des valeurs d'exemple.

Sur Saving Planets : Dynamique du vol et commandes · Conception d'engins spatiaux

Sources : NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Article de la NASA sur Dragonfly.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Communication et surveillance : ADS-B

Radios d’aéronef, portée en visibilité directe, affaiblissement en espace libre, ADS-B Out et In, et comment la surveillance soutient le contrôle aérien.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer la portée de l’horizon radio.
- Calculer l’affaiblissement en espace libre.
- Expliquer ADS-B Out et In.
- Mettre à l’échelle les chiffres de trafic de la FAA.

Notions clés

- La VHF et les fréquences plus élevées se propagent en visibilité directe, donc la portée dépend de la hauteur des antennes.
- L’affaiblissement en espace libre croît avec la distance et la fréquence, 20 $\log_{10}(4\pi d/\lambda)$.
- Avec l’ADS-B Out, un aéronef diffuse sa position obtenue par satellite ; l’ADS-B In permet aux autres aéronefs et au sol de la recevoir.
- La FAA qualifie l’ADS-B en temps réel de méthode de surveillance privilégiée pour le contrôle aérien dans le National Airspace System.
- Aux États-Unis, les aéronefs doivent être équipés de l’ADS-B Out pour voler dans l’espace aérien défini par le 14 CFR 91.225.

Équations clés

$$d \approx 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ km}$$

Horizon radio (h en m)

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

```
L=20_10(4π d)/()
```

Affaiblissement en espace libre

$$\lambda = c/f$$

Longueur d’onde

$$\bar{n} = N/24$$

`n=N/24`

Nombre moyen de vols par heure

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Un aéronef à 10000 m et une antenne au sol à 10 m. Horizon radio ?

1. 4.12(100 + 3.162).

Réponse : 425 km.

Exemple 8.2 Affaiblissement à 1090 MHz sur 200 km.

1. $\lambda = 0.2750$ m.
2. $20 \log_{10}(4\pi \times 2 \times 10^{5}/0.2750)$.

Réponse : 139.2 dB.

Exemple 8.3 La FAA gère plus de 44000 vols par jour. Moyenne par heure ?

1. 44,000/24.

Réponse : Environ 1833.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Doublez la distance : affaiblissement supplémentaire ?

   6.02 dB.

2. Longueur d’onde à 1090 MHz ?

   0.275 m.

3. Passagers par vol à partir de 3 millions et 44000 ?

   Environ 68.

4. Qu’exige l’ADS-B Out à bord ?

   Un émetteur qui diffuse la position.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La portée radio est illimitée.

En réalité : La visibilité directe la limite.

Idée reçue : L'ADS-B utilise le radar.

En réalité : Les aéronefs diffusent leur propre position.

Idée reçue : L'affaiblissement est linéaire en distance.

En réalité : Il croît comme $20 \log_{10} d$.

Cartes mémoire

ADS-B

Surveillance dépendante automatique en mode diffusion.

ADS-B Out

Diffuse sa propre position.

ADS-B In

Reçoit le trafic et la météo.

Affaiblissement

Perte par étalement du signal.

Horizon radio

Limite de visibilité directe.

NAS

Système national de l'espace aérien des États-Unis.

Quiz d'autocontrôle

1. Horizon radio…

425 km

42.5 km

4250 km

100 km

425 km. 4.12 × 103.2.

2. Affaiblissement de propagation…

139.2 dB

119 dB

160 dB

13.9 dB

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

3. Vols par heure…

≈ 1833

≈ 440

≈ 44,000

≈ 183

≈ 1833. 44,000/24.

4. L’ADS-B Out sert à…

diffuser la position

brouiller le radar

suivre la météo uniquement

poser l’avion

diffuser la position. FAA.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La FAA indique que l’ADS-B améliore la sécurité et l’efficacité en vol et sur les pistes, réduit les coûts et atténue les effets nocifs sur l’environnement.

L’Air Traffic Organization de la FAA gère plus de 44000 vols et plus de 3 millions de passagers aériens par jour sur plus de 29 millions de miles carrés d’espace aérien (chiffres FY24), donc de petits gains d’efficacité s’additionnent.

Sur Saving Planets : Performances des avions · Solutions

Sources : FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb) · FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers)

Ressources d’apprentissage gratuites

- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): Présentation de la FAA.
- FAA: Air Traffic By The Numbers (https://www.faa.gov/air_traffic/by_the_numbers): Chiffres de la FAA.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Logiciel de vol temps réel

Tâches, périodes et échéances, taux d’utilisation du processeur, ordonnancement à priorités monotones par fréquence, cadences d’image, chiens de garde et protection contre les pannes.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le taux d’utilisation du processeur.
- Appliquer la borne rate-monotonic.
- Relier cadence d’image et période.
- Décrire la protection contre les pannes.

Notions clés

- Le logiciel de vol exécute des tâches périodiques qui doivent finir avant leur échéance, pas seulement vite en moyenne.
- Le taux d’utilisation est la somme, pour chaque tâche, de sa durée d’exécution divisée par sa période.
- L’ordonnancement rate-monotonic donne une priorité plus haute aux périodes plus courtes ; il est garanti quand U ≤ n(2^(1/n) − 1).
- Les temporisateurs chiens de garde réinitialisent un processeur qui ne répond plus ; la protection contre les pannes met un engin spatial en mode sûr.
- L’autonomie compte quand l’aide au sol est lointaine ; la NASA indique que Dragonfly doit voler sans aide en temps réel depuis la Terre.

Équations clés

$$U = \sum \frac{C_i}{T_i}$$

`U=(C_i)/(T_i)`

Taux d’utilisation

$$U \leq n(2^{1/n} - 1)$$

Borne rate-monotonic

$$f = 1/T$$

`f=1/T`

Cadence d’image

$$\text{slack} = 1 - U$$

`slack=1-U`

Capacité disponible

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Des tâches durent 2, 3 et 5 ms avec des périodes de 10, 20 et 50 ms. Taux d'utilisation ?

1. 0.2 + 0.15 + 0.1.

Réponse : 0.45.

Exemple 9.2 Borne rate-monotonic pour trois tâches ?

1. 3(2^(1/3) − 1).

Réponse : 0.780, donc 0.45 est garanti ordonnançable.

Exemple 9.3 Les expositions des caméras de Dragonfly durent environ 20 à 70 ms. Cadences d'image correspondantes ?

1. 1/0.07 et 1/0.02.

Réponse : Environ 14.3 à 50 Hz.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Borne pour n = 2 ?

   0.828.

2. Borne pour n = 4 ?

   0.757.

3. Marge avec U = 0.45 ?

   0.55.

4. Pourquoi un mode sûr ?

   Pour garder le véhicule stable et attendre de l’aide ou un correctif.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Être rapide en moyenne suffit.

En réalité : Chaque échéance compte.

Idée reçue : U ≤ 1 signifie toujours ordonnançable en RMS.

En réalité : Seule la borne le garantit.

Idée reçue : Le mode sûr signifie une panne.

En réalité : Il protège la mission.

Cartes mémoire

Échéance

Instant de fin au plus tard.

Taux d’utilisation

Fraction du processeur utilisée.

Rate-monotonic

Période plus courte, priorité plus haute.

Chien de garde

Temporisateur de réinitialisation.

Mode de survie

Configuration de protection.

Autonomie

Agir sans aide du sol.

Quiz d’autocontrôle

1. Taux d’utilisation…

0.45

0.10

1.0

0.78

0.45. Sum C/T.

2. Borne RM pour n = 3…

0.780

0.693

0.828

1

0.780. n(2^(1/n) − 1).

3. Image de 70 ms…

14.3 Hz

70 Hz

7 Hz

50 Hz

14.3 Hz. 1/0.07.

4. Le chien de garde…

réinitialise un processeur bloqué

compte les bits

mesure les gyroscopes

refroidit les boîtiers

réinitialise un processeur bloqué. Temporisateur.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA rapporte que Hubble est passé plusieurs fois en mode sûr lorsqu'un gyroscope donnait des mesures erronées, suspendant la science en attendant des instructions ; la protection contre les pannes l'a gardé en sécurité.

La NASA indique que les ingénieurs de Dragonfly introduiront délibérément des pannes lors des essais pour que le giravion puisse réagir de façon autonome, car tout ce qu'il fait sur Titan doit se faire sans aide en temps réel depuis la Terre.

Sur Saving Planets : Introduction à la programmation · Dynamique du vol et commandes

Sources : NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/) · NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Cours gratuits du MIT.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Article de la NASA sur Dragonfly.

- [ ] **J'ai terminé cette unité**

Intégration, vérification et opérations

Intégration incrémentale, méthodes de vérification, essais avec matériel dans la boucle, injection de pannes, mise en service et prolongation de vie.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Nommer les quatre méthodes de vérification.
- Planifier une intégration incrémentale.
- Expliquer les essais avec matériel dans la boucle.
- Relier les opérations à la durée de la mission.

Notions clés

- Les exigences sont vérifiées par essai, analyse, inspection ou démonstration.
- L’intégration se fait pas à pas, pour qu’un problème puisse être attribué au dernier élément ajouté.
- Le matériel dans la boucle et les bancs représentatifs du vol font tourner le vrai logiciel de vol face à des capteurs simulés.
- Les essais d’injection de pannes prouvent que le système réagit correctement quand quelque chose casse.
- De bonnes opérations, des pièces de rechange et des consommables peuvent prolonger une mission bien au-delà de sa durée de vie nominale.

Équations clés

$$t_{arr} = t_{launch} + t_{cruise}$$

```
t_arr=t_launch+t_cruise
```

Année d’arrivée

$$L_{ext} = \frac{L_{actual}}{L_{design}}$$

```
L_ext=_actualL_design
```

Rapport de prolongation de vie

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

```
A=(MTBF)/(MTBF+MTTR)
```

Disponibilité

$$V = \{T, A, I, D\}$$

V=,A,I,D\

Méthodes de vérification

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 La NASA indique que Dragonfly sera lancé au plus tôt en 2028 pour un voyage de six ans. Arrivée au plus tôt ?

1. 2028 + 6.

Réponse : 2034, comme l’indique la NASA.

Exemple 10.2 Les consommables de Landsat 9 durent au moins 10 ans pour une durée de vie nominale de 5 ans. Rapport de prolongation ?

1. 10/5.

Réponse : 2.

Exemple 10.3 Dragonfly passera trois ans à voler sur Titan. Fin de mission au plus tôt ?

1. 2034 + 3.

Réponse : 2037 (calculé).

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Nommer les quatre méthodes de vérification.

   Essai, analyse, inspection, démonstration.

2. Pourquoi intégrer de façon incrémentale ?

   Pour attribuer les problèmes au dernier changement.

3. Hubble a été lancé en 1990 ; son 34e anniversaire tombait quelle année ?

2024.

4. Qu’est-ce que l’injection de pannes ?

   Provoquer délibérément des pannes en essai.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Tout tester à la fin.

En réalité : Intégrer et tester par étapes.

Idée reçue : L’analyse vaut moins qu’un essai.

En réalité : Chaque méthode convient à des exigences différentes.

Idée reçue : La durée de vie nominale est la fin.

En réalité : Les missions durent souvent plus longtemps.

Cartes mémoire

Vérification par essai

Le mesurer.

Analyse

Prouver par le calcul.

Inspection

L’examiner.

Démonstration

Montrer que cela fonctionne.

HIL

Matériel dans la boucle.

Mise en service

Recette après le lancement.

Quiz d’autocontrôle

1. Arrivée de Dragonfly…

2034

2028

2030

2040

2034. 2028 + 6.

2. Rapport de Landsat 9...

2

0.5

5

10

2. 10/5.

3. Nombre de méthodes...

4

2

3

6

4. T, A, I, D.

4. Banc d'essai avec le vrai logiciel...

matériel dans la boucle

FMEA

Diagramme N^2

étude de compromis

matériel dans la boucle. HIL.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La NASA indique que l'équipe de Dragonfly a construit les capacités de vol de façon incrémentale, de la rotation d'un seul rotor jusqu'à un premier vol simulé complet, et prévoit de recommencer sur le véritable système de vol.

La NASA note que l'étalonnage embarqué et la redondance de Landsat 9 gardent ses données exactes et fiables pendant toute la mission, prolongeant la plus longue série d'observations de la Terre.

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

Sources : NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/) · 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, section 5.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): 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. Le cycle de vie de l'ingénierie système et les exigences
   4 exercices
2. Architecture, interfaces et intégration
   4 exercices
3. Fiabilité et redondance
   4 exercices
4. Analyse de sécurité : AMDE et arbres de défaillance
   4 exercices
5. Avionique numérique et bus de données
   4 exercices
6. Capteurs de navigation : centrales inertielles, GNSS, caméras et lidar
   4 exercices
7. Fusion de capteurs et filtre de Kalman
   4 exercices
8. Communication et surveillance : ADS-B
   4 exercices
9. Logiciel de vol temps réel

4 exercices

10. Intégration, vérification et opérations
    4 exercices

Le laboratoire (Avionics and systems 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 risque électrique. N'ouvrez ni ne modifiez l'électronique d'un vrai avion, drone ou véhicule pour ce cours. Faites des pauses d'écran, tenez-vous bien droit et gardez les câbles hors des passages.

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

TP A : Croissance des interfaces et diagramme N²

SEMAINE 2

Objectif : Construisez un diagramme N² pour une petite suite avionique et voyez comment les interfaces potentielles croissent avec le nombre de boîtiers.

$$I = n(n-1)/2$$

`I=n(n-1)/2`

Interfaces potentielles

Mode opératoire

1. Listez les boîtiers : calculateur de vol, IMU, récepteur GNSS, radio, écran, bloc d'alimentation, données air, pilote automatique.
2. Tracez une grille 8 × 8 avec les boîtiers sur la diagonale et marquez les paires qui échangent des données.
3. Calculez n(n − 1)/2 pour n = 4, 8 et 12.
4. Comptez vos cellules marquées et comparez au maximum.

Tableau de données

Boîtiers n	Interfaces potentielles
4	6
8	28
12	66

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. 8 × 7/2 = 28.
2. 12 × 11/2 = 66.

> **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 : la mise à jour de son manuel inclut l'ingénierie système basée sur les modèles. NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/)

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

TP B : Fiabilité d’unités simples, doubles et triples

SEMAINE 4

Objectif : Comparez dans un tableur une unité seule, une paire en parallèle et un vote 2 parmi 3 au fil du temps.

$$R_{2/3} = 3R^2 - 2R^3$$

R_2/3=3R^2-2R^3

Vote deux parmi trois

Mode opératoire

1. Saisissez λ = 10⁻⁵ par heure.
2. Calculez R = e^(−λt) pour t = 1000, 10000 et 50000 h.
3. Calculez la paire en parallèle et le vote 2 parmi 3.
4. Trouvez où le 2 parmi 3 passe sous l’unité seule (R = 0.5).

Tableau de données

t (h)	Simple	Double	2 parmi 3
1000	0.990	0.9999	0.9997
10,000	0.905	0.991	0.975
50,000	0.607	0.845	0.657

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. R(50,000) = e^(−0.5) = 0.607.
2. 2 parmi 3 = 3(0.607)² − 2(0.607)³ = 0.657.

> **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 : Hubble peut faire des observations scientifiques avec un seul gyroscope en état de marche. NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/)

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

TP C : Circuits redondants

SEMAINE 5

Objectif : Utilisez PhET Circuit Construction Kit: DC pour comparer des ampoules en série et en parallèle quand l’une tombe en panne.

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)

Résistance en parallèle

Mode opératoire

1. Montez deux ampoules de 10 Ω en série sur une pile de 12 V, puis coupez un fil.
2. Remontez-les en parallèle et coupez une branche.
3. Mesurez le courant avant et après chaque panne.
4. Reliez le résultat à la fiabilité série et parallèle.

Tableau de données

Circuit	Résistance (Ω)	Courant à 12 V (A)
Parallèle, les deux bonnes	5	2.4
Parallèle, une en panne	10	1.2
Série, les deux bonnes	20	0.6

Valeurs d’exemple calculées.

Exemple de calcul

1. 10 × 10/20 = 5 Ω.
2. 12/5 = 2.4 A.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- Fonctionne dans un navigateur web.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Lien avec la planète : NASA : la redondance embarquée de Landsat 9 garde ses données fiables.
NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

TP D : Résolution du CAN et volume de données

SEMAINE 7

Objectif : Calculez la taille du pas et le SNR pour plusieurs résolutions de convertisseur.

$$\Delta V = V_{FS}/2^N$$

Δ V=V_FS/2^N

Pas du CAN

Mode opératoire

1. Saisissez une pleine échelle de 10 V.
2. Calculez le pas et le SNR pour 8, 12 et 16 bits.
3. Calculez la durée d'un mot de 32 bits à 100 kbit/s et à 1 Mbit/s.
4. Discutez de la raison pour laquelle Landsat 9 utilise 14 bits.

Tableau de données

Bits	Pas (mV)	SNR (dB)
8	39.06	49.9
12	2.441	74.0
16	0.1526	98.1

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. 10/256 = 39.06 mV.
2. 6.02 × 16 + 1.76 = 98.1 dB.

> **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 : NASA : Landsat 9 a une résolution radiométrique de 14 bits. NASA Science: Landsat 9 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-overview/)

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

TP E : Dérive inertielle et fusion de capteurs

SEMAINE 9

Objectif : Modélisez la dérive de position due à un biais d'accéléromètre, puis fusionnez deux capteurs de position.

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2$$

```
e=12bt^2
```

Dérive due au biais

Mode opératoire

1. Saisissez b = 9.807 × 10⁻³ m/s² (1 milli-g).
2. Calculez l'erreur à 10, 60 et 600 s.
3. Fusionnez des capteurs de σ = 4 m et 3 m et calculez le gain de Kalman pour P = 16, R = 9.
4. Ajoutez du bruit avec une colonne de nombres aléatoires et observez le filtre.

Tableau de données

t (s)	Erreur (m)
10	0.49
60	17.65
600	1765

Valeurs d'exemple calculées.

Exemple de calcul

1. ½ × 9.807 × 10⁻³ × 100 = 0.49 m.
2. σ fusionné = √5.76 = 2.4 m.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N'importe quel tableur convient.

NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

Lien avec la planète : NASA : l'essai de Dragonfly a utilisé des données simulées de caméra, d'IMU et de lidar. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

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

TP F : Ordonnançabilité rate-monotonic

SEMAINE 12

Objectif : Calculez les bornes d’utilisation et testez des ensembles de tâches dans un tableur.

$$U \leq n(2^{1/n} - 1)$$

Borne rate-monotonic

Mode opératoire

1. Calculez la borne pour n = 1 à 4.
2. Saisissez l’ensemble de tâches du module 9 et calculez U.
3. Ajoutez une tâche jusqu’à ce que U dépasse la borne.
4. Discutez de ce qu’il faut faire quand la borne n’est pas respectée.

Tableau de données

n	Borne
1	1.000
2	0.828
3	0.780
4	0.757

Valeurs calculées.

Exemple de calcul

1. 2(√2 − 1) = 0.828.
2. 4(2^(1/4) − 1) = 0.757.

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

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/)

Lien avec la planète : NASA : Dragonfly doit voler de façon autonome, sans aide en temps réel depuis la Terre. NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/)

☐ **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. Interfaces potentielles pour 10 boîtiers ?

    1. 10 × 9/2.

    Réponse : 45.

2. Paire en parallèle, $\lambda = 2 \times 10^{-5}$ /h sur 5000 h ?

    1. R = e^(−0.1) = 0.905.
    2. $1 - 0.095^2$.

    Réponse : 0.991.

3. IPR pour S = 6, O = 3, D = 7 ?

    1. 6 × 3 × 7.

    Réponse : 126.

4. Pas d’un CAN 10 bits sur 5 V ?

    1. 5/1024.

    Réponse : 4.88 mV.

5. SNR idéal pour 10 bits ?

    1. 6.02 × 10 + 1.76.

    Réponse : 62.0 dB.

Série d’entraînement finale (modules 1–10)

1. Dérive après 30 s avec un biais de 2 milli-g ?

    1. ½ × 0.01961 × 900.

Réponse : 8.83 m.

2. Fusionnez deux capteurs de σ = 5 m.

    1. $\sigma^2 = 12.5$.

    Réponse : 3.54 m.

3. Gain de Kalman pour P = 4, R = 1 ?

    1. 4/5.

    Réponse : 0.8.

4. Horizon radio de 1000 m vers une antenne à 10 m ?

    1. 4.12(31.62 + 3.162).

    Réponse : 143.3 km.

5. Taux d'utilisation pour les tâches 1/5, 2/10, 3/30 ms ?

    1. 0.2 + 0.2 + 0.1.

    Réponse : 0.5.

6. Disponibilité, MTBF 500 h, MTTR 5 h ?

    1. 500/505.

    Réponse : 0.990.

Fiche de formules

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

$$I = n(n-1)/2,\ U_{bus} = B/B_{max}$$

$$R = e^{-\lambda t},\ R_p = 1 - \prod(1 - R_i),\ R_{2/3} = 3R^2 - 2R$$

$$RPN = SOD,\ P_{OR} = 1 - \prod(1 - p_i),\ P_{AND} = \prod$$

$$\Delta V = V_{FS}/2^N,\ SNR = 6.02N + 1.76$$

$$e = \tfrac{1}{2} b t^2,\ \rho = c\Delta t$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2\sigma_2^2/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2),\ K = P/(P + R)$$

$$d = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),\ L = 20\log_{10}(4\pi d/\lambda)$$

$$U = \sum C_i/T_i \le n(2^{1/n} - 1)$$

$$A = MTBF/(MTBF + MTTR)$$

Constantes

Constante	Valeur
Vitesse de la lumière	c = 299792458 m/s (exact)
Pesanteur normale	g = 9.80665 m/s²
Fréquence ADS-B (valeur de manuel)	1090 MHz
ARINC 429 haute vitesse (valeur de manuel)	100 kbit/s
MIL-STD-1553 (valeur de manuel)	1 Mbit/s
Heures par an	8760 h

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

Textes et simulations gratuits

Utilisez ces textes, cours et simulations gratuits en parallèle du cours.

- NASA Systems Engineering Handbook (https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/): Manuel gratuit de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.842 Fundamentals of Systems Engineering (Fall 2015) (https://ocw.mit.edu/courses/16-842-fundamentals-of-systems-engineering-fall-2015/): Cours gratuits du MIT.
- FAA: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) (https://www.faa.gov/air_traffic/technology/adsb): Présentation de la FAA.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Circuits et redondance.
- NASA Science: Dragonfly completes first simulated flight (Oct. 23, 2026) (https://science.nasa.gov/blogs/dragonfly/2026/10/23/nasas-dragonfly-completes-first-simulated-flight/): Article sur les essais d'avionique.
- NASA Science: NASA to change how it points Hubble Space Telescope (https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-to-change-how-it-points-hubble-space-telescope/): La redondance en pratique.

Glossaire

ADS-B
Surveillance dépendante automatique en mode diffusion.

ARINC 429
Bus de données avionique unidirectionnel.

Disponibilité
Fraction du temps où un système fonctionne.

FMEA
Analyse des modes de défaillance et de leurs effets.

Arbre de défaillance
Logique de défaillance descendante.

Matériel dans la boucle
Vrai logiciel et vrai matériel avec des entrées simulées.

IMU
Centrale inertielle.

Document de contrôle d’interface
Accord sur une interface.

Filtre de Kalman
Estimateur récursif optimal.

Lidar
Télémétrie laser.

MBSE
Ingénierie système basée sur les modèles.

MIL-STD-1553
Bus de données commande/réponse.

MTBF
Temps moyen entre défaillances.

Diagramme N²
Matrice d’interfaces.

Ordonnancement rate-monotonic
La période la plus courte obtient la priorité la plus haute.

Redondance
Unités supplémentaires de secours.

Exigence
Énoncé vérifiable d’un besoin.

Mode de survie
Configuration de protection d’un engin spatial.

Cycle en V
Décomposer, puis intégrer et vérifier.

Temporisateur chien de garde
Réinitialise un processeur bloqué.

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	Rattache chaque choix de conception à une exigence, vérifie les interfaces et les cas de panne, garde des unités et des probabilités cohérentes, et explique les compromis en termes simples.
3 · Compétent	Résout les séries d'exercices et d'examens avec de petites erreurs et vérifie les unités.
2 · En progression	Suit les exemples résolus mais confond fiabilité série et parallèle, ou portes OU et ET.
1 · Débutant	Calcule sans exigence ni schéma-bloc ; 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

- Transferts thermiques AERO 440
- Projet de synthèse (avion ou CubeSat) AERO 490
- Propulsion AERO 410
- Tous les cours