

Vaisseau spatial: apprendre à penser en système

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Vaisseau spatial: apprendre à penser en système: comment « Construire une matrice d'interfaces » agit-il sur « Une interface possède aussi un propriétaire et un essai », et quel repère issu de « Dimensionner un radiateur avec Stefan-Boltzmann comme première intuition » permet de vérifier la décision?

Intuition. Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications. Placez-les en lignes et colonnes d'un tableau.

1

Construire une matrice d'interfaces

Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications.

2

Une interface possède aussi un propriétaire et un essai

Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications.

3

Dimensionner un radiateur avec Stefan-Boltzmann comme première intuition

Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications.

Repère concret. « Bus 28 V » ne suffit pas si l'on ignore ondulation, courant de pointe, transitoire, tolérance et comportement en sous-tension.

- Construire une matrice d'interfaces — Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications.
- Une interface possède aussi un propriétaire et un essai — Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications.
- Dimensionner un radiateur avec Stefan-Boltzmann comme première intuition — Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications.

Vaisseau : penser en services et interfaces

Les budgets relient les sous-systèmes



Delta-Sierra · Bible Mars

Vaisseau : penser en services et interfaces

Les budgets relient les sous-systèmes



Delta-Sierra · Bible Mars



Les boucles de fluides combinent pompes, filtres, réservoirs, capteurs et automatismes; leur disponibilité dépend autant de la **maintenance** que du rendement nominal.

Un vaisseau interplanétaire n'est pas une collection d'équipements. C'est un **système de systèmes**: énergie, thermique, structure, **avionique**, propulsion, communications, **support-vie** et équipage partagent masse, volume, chaleur, puissance, données et modes de panne. Ce module apprend à lire une architecture par ses budgets et ses interfaces.

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 09

Comprendre avant de calculer

Le véhicule doit assurer structure, énergie, thermique, communications, propulsion, navigation et survie sans qu'un **sous-système** optimise sa performance au détriment des autres.

Progression du module — système; sous-système; budget de masse; marge.

système

Définition. Un système est un ensemble d'éléments en interaction organisé pour produire des fonctions et performances définies.

Exemple. Un vaisseau combine réservoirs, structure, avionique, énergie et équipage; une décision sur la masse affecte plusieurs domaines.

Piège. Une collection de composants compatibles individuellement n'est pas encore un système intégré.

Contrôle mental. Tracez sa frontière: si une fonction vitale dépend d'un élément laissé hors du périmètre, votre définition du **système** est incomplète.

Exercice guidé — système

Situation à reconnaître. Un système est un ensemble d'éléments en interaction organisé pour produire des fonctions et performances définies.

Vérification demandée. Tracez sa frontière: si une fonction vitale dépend d'un élément laissé hors du périmètre, votre définition du système est incomplète.

Erreur à écarter. Une collection de composants compatibles individuellement n'est pas encore un système intégré.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un système est un ensemble d'éléments en interaction organisé pour produire des fonctions et performances définies.

Test du cas

Tracez sa frontière: si une fonction vitale dépend d'un élément laissé hors du périmètre, votre définition du système est incomplète.

Piège exclu

Une collection de composants compatibles individuellement n'est pas encore un système intégré.

Conséquence opérationnelle

L'usage de cette notion en mission exige un second regard: Une collection de composants compatibles individuellement n'est pas encore un système intégré.. Ce point transforme la notion théorique en règle de validation avant engagement du système.

Quantification

système: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

système: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

sous-système

Définition. Un sous-système regroupe des fonctions cohérentes à l'intérieur du système global, par exemple [puissance électrique](#) ou [contrôle thermique](#).

Exemple. Le sous-système thermique dépend de l'énergie et influence la structure et l'avionique.

Piège. Les frontières de sous-systèmes sont des outils d'organisation; les phénomènes physiques traversent souvent ces frontières.

Contrôle mental. Vérifiez ses interfaces d'entrée et de sortie: un [sous-système](#) ne peut pas être analysé correctement si énergie, matière, commande ou données disparaissent du bilan.

Exercice guidé — sous-système

Situation à reconnaître. Un sous-système regroupe des fonctions cohérentes à l'intérieur du système global, par exemple puissance électrique ou contrôle thermique.

Vérification demandée. Vérifiez ses interfaces d'entrée et de sortie: un sous-système ne peut pas être analysé correctement si énergie, matière, commande ou données disparaissent du bilan.

Erreur à écarter. Les frontières de sous-systèmes sont des outils d'organisation; les phénomènes physiques traversent souvent ces frontières.

Corrigé raisonné

Sens précis

Un sous-système regroupe des fonctions cohérentes à l'intérieur du système global, par exemple puissance électrique ou contrôle thermique.

Test du cas

Vérifiez ses interfaces d'entrée et de sortie: un sous-système ne peut pas être analysé correctement si énergie, matière, commande ou données disparaissent du bilan.

Piège exclu

Les frontières de sous-systèmes sont des outils d'organisation; les phénomènes physiques traversent souvent ces frontières.

Conséquence opérationnelle

Dans le cas ce point, l'équipe doit retenir le point suivant: Les frontières de sous-systèmes sont des outils d'organisation; les phénomènes physiques traversent souvent ces frontières.. Toute violation de cette limite impose de requalifier l'état du système avant de poursuivre.

Quantification

sous-système: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

sous-système: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

budget de masse

Définition. Le budget de masse répartit la masse autorisée entre éléments et conserve une [marge](#) jusqu'à la limite du lanceur ou de l'architecture.

Exemple. Ajouter 200 kg de blindage peut nécessiter de réduire une autre masse ou d'accepter une performance de propulsion différente.

Piège. Additionner des [masses](#) nominales sans marge ni croissance historique sous-estime le risque de dépassement.

Contrôle mental. La somme des masses allouées, des réserves et des marges doit rester compatible avec la capacité de lancement; toute ligne sans propriétaire ou sans unité doit être rejetée.

Exercice guidé — budget de masse

Situation à reconnaître. Le budget de masse répartit la masse autorisée entre éléments et conserve une marge jusqu'à la limite du lanceur ou de l'architecture.

Vérification demandée. La somme des masses allouées, des réserves et des marges doit rester compatible avec la capacité de lancement; toute ligne sans propriétaire ou sans unité doit être rejetée.

Erreur à écarter. Additionner des masses nominales sans marge ni croissance historique sous-estime le risque de dépassement.

Corrigé raisonné

Sens précis

Le budget de masse répartit la masse autorisée entre éléments et conserve une marge jusqu'à la limite du lanceur ou de l'architecture.

Test du cas

La somme des masses allouées, des réserves et des marges doit rester compatible avec la capacité de lancement; toute ligne sans propriétaire ou sans unité doit être rejetée.

Piège exclu

Additionner des masses nominales sans marge ni croissance historique sous-estime le risque de dépassement.

Conséquence opérationnelle

Ajouter 200 kg de blindage peut nécessiter de réduire une autre masse ou d'accepter une performance de propulsion différente.

marge

Définition. Une marge réserve une capacité au-delà de l'estimation courante afin d'absorber croissance, [incertitude](#) et évolution de conception selon des règles définies.

Exemple. Une marge de puissance permet d'accepter des charges supplémentaires sans redimensionner immédiatement la source.

Piège. Une marge arbitraire appliquée partout peut masquer une mauvaise compréhension; elle doit avoir une logique de gestion.

Contrôle mental. Une [marge](#) doit diminuer lorsque le besoin augmente à capacité constante; si votre tableau montre l'inverse, contrôlez la convention utilisée pour la calculer.

Exercice guidé — marge

Situation à reconnaître. Une marge réserve une capacité au-delà de l'estimation courante afin d'absorber croissance, incertitude et évolution de conception selon des règles définies.

Vérification demandée. Une marge doit diminuer lorsque le besoin augmente à capacité constante; si votre tableau montre l'inverse, contrôlez la convention utilisée pour la calculer.

Erreur à écarter. Une marge arbitraire appliquée partout peut masquer une mauvaise compréhension; elle doit avoir une logique de gestion.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une marge réserve une capacité au-delà de l'estimation courante afin d'absorber croissance, incertitude et évolution de conception selon des règles définies.

Test du cas

Une marge doit diminuer lorsque le besoin augmente à capacité constante; si votre tableau montre l'inverse, contrôlez la convention utilisée pour la calculer.

Piège exclu

Une marge arbitraire appliquée partout peut masquer une mauvaise compréhension; elle doit avoir une logique de gestion.

Conséquence opérationnelle

Le garde-fou associé à ce point est concret: Une marge arbitraire appliquée partout peut masquer une mauvaise compréhension; elle doit avoir une logique de gestion.. Si ce risque apparaît, la valeur calculée ne doit pas être utilisée seule pour valider la configuration.

Architecture du vaisseau : mini-leçons canoniques

Ces mini-leçons constituent la référence quantitative canonique du module. Les exemples numériques sont pédagogiques et doivent rester distingués des données de mission.

Marge relative capacité/besoin

$$m_rel = (C - B) / B$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $m_rel = (C - B) / B$ » dans le contexte de «Marge relative capacité/besoin» ?

2 — Intuition sans symboles

La marge relative compare l'excédent de capacité au besoin de référence, et non à la capacité totale.

3 — Grandeurs

m_rel : marge relative ; C : capacité ; B : besoin.

4 — Formule

$$m_rel = (C - B) / B$$

5 — Lecture

Lire la relation « $m_rel = (C - B) / B$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

m_rel : marge relative ; C : capacité ; B : besoin.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

C et B dans la même unité ; m_rel sans dimension ou en %.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

On calcule d'abord l'excédent $C-B$ puis on le rapporte au besoin B.

11 — Hypothèses

Même périmètre et même définition pour capacité et besoin.

12 — Contrôle d'unités

C et B dans la même unité ; m_rel sans dimension ou en %. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $C = 50$ t et $B = 43$ t, $m_rel = 7/43 = 0,1628 = 16,3$ %.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

On calcule d'abord l'excédent $C-B$ puis on le rapporte au besoin B.

15 — Contrôle algébrique

$B \times (1 + m_rel)$ doit retrouver environ 50 t.

16 — Estimation mentale

7 t sur un besoin de 43 t représente un peu plus d'un sixième, donc environ 16 %.

17 — Interprétation

La marge donne une réserve relative à la référence choisie ; changer de dénominateur change le pourcentage.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

À besoin fixe, augmenter C augmente linéairement la marge ; à capacité fixe, un besoin plus élevé la réduit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. C = 20 000 kg et B = 17 000 kg.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$m_{rel} = 3\,000/17\,000 = 0,1765 = 17,6\%$.

Exercice autonome. C = 12 000 kg et B = 10 000 kg.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$m_{rel} = 2\,000/10\,000 = 0,20 = 20\%$.

21 — Décision mission

Déclarer explicitement la base de marge avant toute décision de masse ou capacité.

Énergie consommée par une charge

$$E = P \times t$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $E = P \times t$ » dans le contexte de «Énergie consommée par une charge» ?

2 — Intuition sans symboles

Une puissance maintenue pendant une durée produit une demande énergétique égale au produit des deux.

3 — Grandeurs

E : énergie ; P : puissance ; t : durée.

4 — Formule

$$E = P \times t$$

5 — Lecture

Lire la relation « $E = P \times t$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

E : énergie ; P : puissance ; t : durée.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

$W \times h = Wh$ ou $W \times s = J$, selon la base choisie.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

La puissance est un débit d'énergie ; multiplier par le temps donne l'énergie totale.

11 — Hypothèses

Puissance moyenne représentative et durée cohérente.

12 — Contrôle d'unités

$W \times h = Wh$ ou $W \times s = J$, selon la base choisie. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Une charge de 800 W pendant 3 h demande $E = 800 \times 3 = 2\,400 \text{ Wh} = 2,4 \text{ kWh}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La puissance est un débit d'énergie ; multiplier par le temps donne l'énergie totale.

15 — Contrôle algébrique

E/t doit redonner 800 W.

16 — Estimation mentale

0,8 kW pendant 3 h donne 2,4 kWh.

17 — Interprétation

Le résultat sert au dimensionnement de stockage et de génération.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

E varie linéairement avec P et avec t .

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $P = 1,2 \text{ kW}$ pendant 5 h.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

$E = 1,2 \times 5 = 6,0 \text{ kWh}$.

Exercice autonome. $P = 0,5 \text{ kW}$ pendant 8 h.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

$E = 0,5 \times 8 = 4,0 \text{ kWh}$.

21 — Décision mission

Vérifier l'énergie sur les phases sans génération et non la seule puissance de pointe.

Capacité nominale de batterie

$C_{\text{nom}} = E_{\text{utile}} / (\text{DoD} \times \eta)$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $C_{\text{nom}} = E_{\text{utile}} / (\text{DoD} \times \eta)$ » dans le contexte de «Capacité nominale de batterie» ?

2 — Intuition sans symboles

La batterie doit être plus grande que l'énergie utile demandée parce qu'on ne veut pas utiliser toute sa profondeur et qu'il existe des pertes.

3 — Grandeurs

C_{nom} : capacité nominale ; E_{utile} : énergie utile ; DoD : profondeur de décharge utilisable ; η : rendement global.

4 — Formule

$C_{\text{nom}} = E_{\text{utile}} / (\text{DoD} \times \eta)$

5 — Lecture

Lire la relation « $C_{\text{nom}} = E_{\text{utile}} / (\text{DoD} \times \eta)$ » en nommant explicitement chaque opération.

6 — Symboles et sens

C_{nom} : capacité nominale ; E_{utile} : énergie utile ; DoD : profondeur de décharge utilisable ; η : rendement global.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

C_{nom} et E_{utile} dans la même unité d'énergie ; DoD et η sans dimension.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

- 10 — Pourquoi cette opération
L'énergie réellement disponible vaut $C_{\text{nom}} \times \text{DoD} \times \eta$; on inverse cette relation pour dimensionner C_{nom} .
- 11 — Hypothèses
DoD et rendement représentatifs des conditions de mission considérées.
- 12 — Contrôle d'unités
 C_{nom} et E_{utile} dans la même unité d'énergie ; DoD et η sans dimension. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.
- 13 — Cas numérique
Pour $E_{\text{utile}} = 40 \text{ kWh}$, $\text{DoD} = 0,80$ et $\eta = 0,90$, $C_{\text{nom}} = 40/(0,72) = 55,56 \text{ kWh}$.
- 14 — Pourquoi le calcul fonctionne
L'énergie réellement disponible vaut $C_{\text{nom}} \times \text{DoD} \times \eta$; on inverse cette relation pour dimensionner C_{nom} .
- 15 — Contrôle algébrique
 $55,56 \times 0,80 \times 0,90$ doit redonner environ 40 kWh.
- 16 — Estimation mentale
Diviser par 0,72 augmente la capacité d'environ 39 % par rapport à l'énergie utile.
- 17 — Interprétation
Le résultat est un minimum énergétique avant vieillissement, température et marge système.
- 18 — Ce que le résultat ne prouve pas
Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.
- 19 — Sensibilité
Une baisse de DoD ou de η augmente la capacité nominale nécessaire.
- 20 — Exercices guidé et autonome
Exercice guidé. $E_{\text{utile}} = 24 \text{ kWh}$, $\text{DoD} = 0,80$, $\eta = 0,90$.
- Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé**

$C_{\text{nom}} = 24/0,72 = 33,33 \text{ kWh}$.
- Exercice autonome.** $E_{\text{utile}} = 18 \text{ kWh}$, $\text{DoD} = 0,75$, $\eta = 0,85$.
- Correction autonome — ouvrir après avoir essayé**

$C_{\text{nom}} = 18/(0,6375) = 28,24 \text{ kWh}$.
- 21 — Décision mission
Ajouter vieillissement, température et contingence avant de figer la batterie réelle.

Aire idéale de radiateur

$$A = P / [\varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4)]$$

- 1 — Question concrète
Que permet de calculer « $A = P / [\varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4)]$ » dans le contexte de «Aire idéale de radiateur» ?
- 2 — Intuition sans symboles
Un radiateur doit offrir assez de surface pour rayonner la puissance thermique à la température et à l'émissivité disponibles.
- 3 — Grandeurs
 A : aire ; P : puissance thermique ; ε : émissivité ; σ : constante de Stefan–Boltzmann ; T : température du radiateur ; T_{env} : température radiative de l'environnement.
- 4 — Formule
 $A = P / [\varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4)]$
- 5 — Lecture
Lire la relation « $A = P / [\varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4)]$ » en nommant explicitement chaque opération.
- 6 — Symboles et sens
 A : aire ; P : puissance thermique ; ε : émissivité ; σ : constante de Stefan–Boltzmann ; T : température du radiateur ; T_{env} : température radiative de l'environnement.

7 — Prononciation

Dire les indices, exposants, lettres grecques et opérations de façon à permettre à une autre personne de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

A en m^2 ; P en W ; températures en K ; $\sigma = 5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$.

9 — Convention

Conserver le même repère, la même convention de signe, la même base de temps et la même frontière de système pendant tout le calcul.

10 — Pourquoi cette opération

La loi de Stefan–Boltzmann donne le flux radiatif net ; diviser la puissance à rejeter par ce flux donne l'aire.

11 — Hypothèses

Vue radiative idéale et températures uniformes ; échanges conductifs/convectifs non inclus.

12 — Contrôle d'unités

A en m^2 ; P en W ; températures en K ; $\sigma = 5,670374419 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$. Vérifier que les unités se simplifient jusqu'à celle de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Pour $P = 5\,000 \text{ W}$, $\varepsilon = 0,85$, $T = 300 \text{ K}$ et $T_{\text{env}} \approx 3 \text{ K}$, $A \approx 12,81 \text{ m}^2$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La loi de Stefan–Boltzmann donne le flux radiatif net ; diviser la puissance à rejeter par ce flux donne l'aire.

15 — Contrôle algébrique

$A \times \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{env}}^4)$ doit redonner environ $5\,000 \text{ W}$.

16 — Estimation mentale

À 300 K et ε proche de 1, le flux est de quelques centaines de W/m^2 ; quelques kW demandent donc plusieurs m^2 .

17 — Interprétation

Le résultat est une aire idéale avant facteurs de vue, dégradation, ombrage et contraintes mécaniques.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Ce résultat ne démontre ni la validité universelle du modèle ni la qualité des données d'entrée ; il vaut uniquement pour les hypothèses et le scénario déclarés ici.

19 — Sensibilité

A diminue fortement quand T augmente car le rayonnement varie comme T^4 .

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $P = 3\,000 \text{ W}$, $\varepsilon = 0,90$, $T = 290 \text{ K}$, $T_{\text{env}} = 3 \text{ K}$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après avoir essayé

Le flux net vaut environ $360,9 \text{ W/m}^2$; $A \approx 3\,000/360,9 = 8,31 \text{ m}^2$.

Exercice autonome. $P = 8\,000 \text{ W}$, $\varepsilon = 0,80$, $T = 310 \text{ K}$, $T_{\text{env}} = 3 \text{ K}$.

Correction autonome — ouvrir après avoir essayé

Le flux net vaut environ $418,9 \text{ W/m}^2$; $A \approx 8\,000/418,9 = 19,10 \text{ m}^2$.

21 — Décision mission

Dimensionner le système thermique avec marges réelles et cas chaud/froid, pas sur l'aire idéale seule.

Entraînement progressif

- Expliquez sans équation quatre notions réellement utilisées dans « Vaisseau spatial: apprendre à penser en système », puis indiquez pour chacune l'observation qui permet de la reconnaître.
- Refaire le calcul avec valeurs déjà converties.
- Recevoir des données inutiles et choisir lesquelles utiliser — module 09 · Entraînement progressif.
- Diagnostiquer un résultat volontairement faux.
- Prendre une décision dans la scène mission en explicitant marge et limite — module 09 · Entraînement progressif.

Gate zéro prérequis

- Avant tout calcul de « Vaisseau spatial: apprendre à penser en système », vérifiez que vous pouvez nommer la grandeur recherchée, l'unité attendue et le phénomène qu'elle représente.
- Je sais lire la relation et les unités — « module 09 ».
- Je sais faire un ordre de grandeur.
- Je sais expliquer une erreur fréquente.
- Je peux refaire un exercice sans copier le résultat — « module 09 ».

1. Commencer par les fonctions, pas par la liste des composants

Avant de choisir une batterie ou un ordinateur, on définit les fonctions: produire et distribuer l'énergie, contrôler la température, connaître l'état du véhicule, communiquer, commander les actionneurs, stocker les consommables, protéger l'équipage et survivre aux pannes. Une fonction peut avoir plusieurs solutions techniques; cette séparation évite de confondre besoin et produit.

Décomposer les fonctions avant de choisir le matériel

Un vaisseau peut être décrit par quelques fonctions fondamentales: maintenir une trajectoire, produire et distribuer l'énergie, contrôler la température, communiquer, connaître son état, protéger l'équipage ou la charge utile et exécuter les changements de mode. Cette décomposition empêche de partir trop tôt d'un catalogue d'équipements. Par exemple, « connaître l'attitude » peut mobiliser viseurs d'étoiles, centrales inertiels et logiciel d'estimation; « modifier l'attitude » peut utiliser roues, propulseurs ou autres actionneurs. Le besoin est d'abord exprimé en performance, **disponibilité** et précision. Ce n'est qu'ensuite que le matériel est choisi. Cette méthode révèle les fonctions qui dépendent d'une même ressource et donc les pannes communes que la simple liste des composants masque.

2. Le budget de masse ferme la première boucle

La masse totale inclut charge utile, structure, sous-systèmes, consommables et marges. Une marge n'est pas « de la masse gratuite »: elle reconnaît qu'un design préliminaire évolue. Lorsque le projet mûrit, les marges sont consommées ou libérées à mesure que les inconnues diminuent.

Exercice A — budget de masse

Un véhicule dispose d'une limite de 50 t. Structure 10 t, propulsion sèche 5 t, énergie 4 t, thermique 2 t, avionique/communications 2 t, habitat/équipage 12 t et consommables 8 t. Quelle marge reste-t-il?

Somme = 43 t. Marge absolue = $50 - 43 = 7$ t. Cela représente 14 % de la capacité de 50 t, ou environ 16,3 % du besoin de 43 t avec la définition de marge relative utilisée ci-dessous. Cette marge ne prouve pas que le véhicule est bon: le volume, le centre de gravité et les performances propulsives doivent aussi fermer.

Données du cas

Exercice A — budget de masse — Un véhicule dispose d'une limite de 50 t. Structure 10 t, propulsion sèche 5 t, énergie 4 t, thermique 2 t, avionique/communications 2 t, habitat/équipage 12 t et consommables 8 t. Quelle marge reste-t-il?

Relation

Somme = 43 t.

Raisonnement

Somme = 43 t. Marge absolue = $50 - 43 = 7$ t. Cela représente 14 % de la capacité de 50 t, ou environ 16,3 % du besoin de 43 t avec la définition de marge relative utilisée ci-dessous. Cette marge ne prouve pas que le véhicule est bon: le volume, le centre de gravité et les performances propulsives doivent aussi fermer.

Résultat

Somme = 43 t.

Contrôle

Marge absolue = $50 - 43 = 7$ t. Cela représente 14 % de la capacité de 50 t, ou environ 16,3 % du besoin de 43 t avec la définition de marge relative utilisée ci-dessous.

Interprétation

Cette marge ne prouve pas que le véhicule est bon: le volume, le centre de gravité et les performances propulsives doivent aussi fermer.

3. Un budget de puissance comporte moyenne, pointe et énergie

La puissance, en watts, est un débit d'énergie. Une charge de 5 kW pendant 8 h consomme 40 kWh. Une batterie doit fournir cette énergie tout en respectant profondeur de décharge, [rendement](#), température et puissance de pointe. Additionner seulement les puissances nominales peut masquer un scénario où plusieurs charges critiques démarrent simultanément.

Exercice B — réserve batterie

Une fonction critique demande 5 kW pendant 8 h. Si seulement 80 % de l'énergie nominale de la batterie est utilisable et que le rendement global est 90 %, quelle capacité nominale minimale faut-il ?

Énergie utile = $5 \times 8 = 40$ kWh. Capacité nominale = $40 \div (0,80 \times 0,90) \approx 55,6$ kWh. On ajouterait encore les marges de vieillissement et de température.

Données du cas

Exercice B — réserve batterie — Une fonction critique demande 5 kW pendant 8 h. Si seulement 80 % de l'énergie nominale de la batterie est utilisable et que le rendement global est 90 %, quelle capacité nominale minimale faut-il ?

Relation

Énergie utile = $5 \times 8 = 40$ kWh.

Raisonnement

Énergie utile = $5 \times 8 = 40$ kWh. Capacité nominale = $40 \div (0,80 \times 0,90) \approx 55,6$ kWh. On ajouterait encore les marges de vieillissement et de température.

Résultat

Énergie utile = $5 \times 8 = 40$ kWh.

Contrôle

On ajouterait encore les marges de vieillissement et de température.

Interprétation

Capacité nominale = $40 \div (0,80 \times 0,90) \approx 55,6$ kWh.

Fermer ensemble masse, puissance et énergie

Un budget de puissance en watts ne suffit pas à dimensionner une batterie. Il faut aussi l'énergie, en wattheures ou joules. Si une charge de 800 W fonctionne pendant 3 h sans production, elle demande idéalement $E = Pt = 800 \times 3 = 2\,400$ Wh, soit 2,4 kWh. Avec seulement 80 % de profondeur de décharge utilisable, la capacité nominale doit dépasser $2,4/0,8 = 3,0$ kWh avant même d'ajouter vieillissement et marge. Cette énergie devient masse de batterie et chaleur à évacuer. Une architecture crédible boucle donc puissance moyenne, pics, durée des modes, capacité de stockage, rendement des convertisseurs et dissipation thermique. Les marges doivent être associées à une incertitude identifiable plutôt qu'empilées arbitrairement.

4. Toute puissance électrique finit presque en chaleur

Dans un vaisseau, les ordinateurs, pompes, éclairages et électroniques dissipent de la chaleur. Dans le vide, cette chaleur doit finalement être rayonnée. Le thermique et l'énergie sont donc couplés : augmenter la puissance d'un équipement peut exiger plus de [radiateur](#), donc plus de masse et de surface.

Puissance consommée et chaleur rejetée sont presque la même histoire

Dans un vaisseau, l'énergie électrique consommée finit en grande partie sous forme de chaleur, directement ou après avoir produit un service. Un ordinateur de 300 W, une pompe de 200 W et des équipements de cabine de 1 500 W représentent déjà environ 2 kW de chaleur à gérer lorsque cette puissance ne quitte pas le véhicule sous une autre forme. En régime stationnaire, le [contrôle thermique](#) doit rejeter une puissance moyenne comparable. Mais les transitoires comptent : un équipement peut fonctionner dix minutes à forte puissance puis rester éteint. La masse thermique et les boucles fluides lissent ces variations. Le budget électrique doit donc fournir au thermique une [chronologie](#), pas seulement une moyenne annuelle.

5. L'avionique doit connaître, décider et pouvoir revenir en arrière

Les capteurs produisent des mesures ; les calculateurs estiment l'état ; le logiciel décide ; les actionneurs modifient le véhicule. Le [FDIR](#) — Fault Detection, Isolation and Recovery — surveille les écarts, isole des fautes et place le système dans un état récupérable. Un safe mode n'est pas simplement « éteindre le maximum » : il conserve énergie, thermique, attitude et communications dans une [configuration](#) stable.

6. Les modes rendent les interfaces visibles

Transit nominal, manœuvre, occultation, [tempête solaire](#), perte d'énergie, safe mode, approche de Mars: chaque mode active des charges et des priorités différentes. Une matrice modes × fonctions révèle les dépendances: une antenne haut gain peut être indisponible pendant une manœuvre d'attitude; un radiateur peut imposer une orientation; une propulsion peut perturber des capteurs.

7. La panne la plus dangereuse est souvent commune

Deux ordinateurs identiques ne protègent pas contre un bug logiciel commun. Deux pompes sur la même alimentation ne protègent pas contre la perte du bus. La [fiabilité](#) exige de chercher les ressources communes: énergie, refroidissement, logiciel, capteur de référence, vanne, connecteur, procédure humaine.

Les modes sont une architecture visible

Un vaisseau n'utilise pas tous ses sous-systèmes de la même façon en croisière, correction de trajectoire, sommeil équipage, communication à haut débit ou situation de survie. Une table de modes indique quelles fonctions sont actives, quelles ressources elles consomment, quels changements sont autorisés et quelles conditions permettent d'en sortir. Cette table expose immédiatement les interfaces: un mode sûr qui coupe un bus de données peut aussi retirer le capteur nécessaire pour comprendre la panne. Le FDIR doit donc préserver une chaîne minimale de commande et de télémétrie. Une bonne [récupération](#) ne consiste pas à redémarrer tout le vaisseau; elle revient par étapes dans une configuration connue, avec confirmation de chaque ressource critique.

8. Vérification et validation: prouver le système complet

Tester un équipement seul ne prouve pas [l'interface](#). Les essais d'intégration vérifient données, alimentation, thermique, mécanique et séquences. Les simulations hardware-in-the-loop mettent de vrais calculateurs face à des environnements simulés. Les essais doivent inclure les modes dégradés et la restauration, pas seulement le scénario nominal.

Vérifier et valider ne répondent pas à la même question

La vérification demande si une [exigence](#) définie est satisfaite: tension dans une plage, capacité de batterie, précision de pointage, résistance mécanique. La validation demande si l'ensemble d'exigences et la solution répondent réellement au besoin de mission. Un système peut donc être parfaitement vérifié et néanmoins mal adapté à l'usage. Les essais d'un vaisseau martien combinent niveaux: composants, logiciels, sous-systèmes, interfaces et scénarios intégrés. Comme on ne peut pas reproduire sur Terre toute une mission de plusieurs années, les preuves mélangent essai, analyse, simulation et héritage. Chaque argument doit préciser ce qui est directement démontré et ce qui reste extrapolé.

9. Attention aux états de l'art

Le rapport [NASA 2026](#) sur les petits véhicules spatiaux est très utile pour les familles de composants — énergie, [GNC](#), thermique, avionique, communications — mais son périmètre est explicitement SmallSat. Il ne qualifie pas un vaisseau humain martien. Un cours sérieux distingue l'état de l'art d'un composant de la preuve d'une architecture complète.

10. Vérification

- Expliquez la différence entre fonction et composant.
- Refaites l'exercice A avec 3 t supplémentaires de blindage.
- Expliquez pourquoi 5 kW et 40 kWh ne désignent pas la même chose.
- Donnez un exemple de [panne de cause commune](#).
- Expliquez ce qu'un safe mode doit préserver.

11. Construire une matrice d'interfaces

Prenez cinq sous-systèmes: énergie, thermique, avionique, propulsion et communications. Placez-les en lignes et colonnes d'un tableau. Pour chaque intersection, écrivez ce qui traverse l'interface: watts, chaleur, données, couple mécanique, fluide,

synchronisation, commande. La matrice révèle rapidement les dépendances invisibles. Par exemple, communications reçoit de l'énergie, rejette de la chaleur, demande une attitude et fournit des données à l'avionique.

Une interface doit avoir un propriétaire, une unité, une plage nominale et des conditions dégradées. « Bus 28 V » ne suffit pas si l'on ignore ondulation, courant de pointe, transitoire, tolérance et comportement en sous-tension.

Une interface possède aussi un propriétaire et un essai

La matrice d'interfaces n'est utile que si chaque ligne conduit à une exigence mesurable. Pour une alimentation, on indique tension, courant, transitoires, protections et connecteur; pour des données, protocole, débit, latence, synchronisation et comportement après perte; pour une interface thermique, flux admissible et conditions de contact. Un responsable doit accepter les deux côtés de l'interface et un moyen de vérification doit exister. Cette discipline devient cruciale lors des modifications: remplacer un ordinateur peut changer consommation, chaleur, masse, connectique et logiciel simultanément. La gestion d'interface empêche une amélioration locale de devenir une panne d'intégration.

12. Dimensionner un radiateur avec Stefan-Boltzmann comme première intuition

Un radiateur idéal suit approximativement $P = \epsilon \sigma A T^4$. P est puissance rayonnée en W, ϵ l'émissivité sans unité, $\sigma \approx 5,670 \times 10^{-8}$ W/m²/K⁴, A l'aire en m² et T la température absolue en kelvins. L'environnement réel ajoute vue vers le Soleil, planète, autres surfaces et conductances internes, mais la loi montre l'effet très fort de T .

Exercice C — aire idéale

Pour $P = 5\,000$ W, $\epsilon = 0,85$ et $T = 300$ K, estimez A en supposant une vue parfaite vers l'espace froid.

$\epsilon \sigma T^4 \approx 0,85 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 300^4 \approx 390$ W/m². $A \approx 5\,000/390 \approx 12,8$ m². Un vrai radiateur aura d'autres échanges et des marges.

Données du cas

Exercice C — aire idéale — Pour $P = 5\,000$ W, $\epsilon = 0,85$ et $T = 300$ K, estimez A en supposant une vue parfaite vers l'espace froid.

Relation

$$\epsilon \sigma T^4 \approx 0,85 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 300^4 \approx 390 \text{ W/m}^2.$$

Raisonnement

$\epsilon \sigma T^4 \approx 0,85 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 300^4 \approx 390$ W/m². $A \approx 5\,000/390 \approx 12,8$ m². Un vrai radiateur aura d'autres échanges et des marges.

Résultat

$$\epsilon \sigma T^4 \approx 0,85 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 300^4 \approx 390 \text{ W/m}^2.$$

Contrôle

Un vrai radiateur aura d'autres échanges et des marges.

Interprétation

$$A \approx 5\,000/390 \approx 12,8 \text{ m}^2.$$

13. Données: débit, latence et criticité ne sont pas la même chose

Une caméra peut produire beaucoup de données mais ne pas être critique à la milliseconde. Une centrale inertielle produit moins de données mais avec des délais stricts. Le réseau avionique doit donc classer trafic et délais, gérer perte de paquets, saturation et priorité. Un bus redondant ne protège pas d'un logiciel qui inonde simultanément les deux voies.

14. Configuration: savoir exactement quelle version vole

Un vaisseau long-courrier peut recevoir des mises à jour. La configuration doit relier matériel, firmware, logiciel, paramètres, tables de calibration et procédures. Après une mise à jour, le système doit savoir revenir à une version précédente si les tests embarqués échouent. La capacité de rollback fait partie de la sûreté logicielle.

La configuration relie matériel, logiciel et preuve

Dire qu'un vaisseau a été testé ne suffit pas; il faut savoir quelle configuration l'a été. Numéro de série, version logicielle, calibration, paramètres, câblage et modifications doivent être reliés aux résultats. Si un correctif de logiciel change une logique FDIR après un essai thermique, certaines preuves restent valides et d'autres doivent être rejouées. La configuration sert aussi

en vol: face à une anomalie, l'équipage et la Terre doivent savoir exactement quelle version tourne et quelles dérogations ont été acceptées. Sur une longue mission martienne, où plusieurs mises à jour peuvent être installées, cette traçabilité devient une composante directe de la sûreté.

15. FDIR: détecter, isoler, récupérer

Détecter: constater qu'une observation sort d'une enveloppe ou qu'un modèle ne prédit plus correctement. **Isoler:** déterminer quelle partie est fautive, avec un niveau de confiance. **Récupérer:** reconfigurer pour maintenir les fonctions prioritaires. Ces étapes ont des temps différents; certaines pannes exigent une réaction en millisecondes, d'autres permettent une analyse sur plusieurs minutes.

Exercice D — faux consensus

Deux calculateurs identiques donnent la même valeur, tandis qu'un capteur indépendant la contredit. Peut-on conclure que le capteur est faux?

Non. Les deux calculateurs peuvent partager le même code, la même donnée d'entrée ou la même erreur de configuration. Il faut chercher une preuve indépendante: autre capteur, modèle physique, mesure manuelle, historique ou test actif.

Données du cas

Exercice D — faux consensus — Deux calculateurs identiques donnent la même valeur, tandis qu'un capteur indépendant la contredit. Peut-on conclure que le capteur est faux?

Raisonnement

Non. Les deux calculateurs peuvent partager le même code, la même donnée d'entrée ou la même erreur de configuration. Il faut chercher une preuve indépendante: autre capteur, modèle physique, mesure manuelle, historique ou test actif.

Résultat

Les deux calculateurs peuvent partager le même code, la même donnée d'entrée ou la même erreur de configuration.

Interprétation

Il faut chercher une preuve indépendante: autre capteur, modèle physique, mesure manuelle, historique ou test actif.

16. Verification matrix: exigence → preuve

Chaque exigence doit pointer vers une méthode: analyse, inspection, essai ou démonstration. « Le véhicule doit survivre à une perte de bus » n'est vérifié que si l'on définit le bus, la perte, l'état initial, les fonctions devant rester actives et les critères de réussite. Une vérification floue fabrique un faux PASS.

La validation pose une question différente: même si le système respecte toutes ses exigences, répond-il réellement au besoin de mission? Un véhicule peut être parfaitement conforme à une mauvaise spécification.

La matrice d'interfaces empêche les dépendances invisibles

Pour chaque paire de sous-systèmes, on note ce qui traverse l'interface: puissance, données, chaleur, fluide, effort mécanique, radiofréquence ou autorité de commande. Une interface possède une plage normale et des cas de panne. Un calculateur peut recevoir une tension correcte tout en ne recevant plus une référence temporelle cohérente; un radiateur peut être sain mais perdre la circulation de fluide qui lui apporte la chaleur. La matrice doit aussi identifier le propriétaire de chaque exigence et le moyen de vérification. À mesure que le design évolue, cette discipline évite qu'une modification locale transforme silencieusement la marge d'un autre sous-système. C'est l'un des liens les plus directs entre [ingénierie système](#) et prévention des causes communes.

17. Mini-projet — revue d'architecture en mode panne

1. Dessinez cinq services: énergie, thermique, avionique, communication, propulsion.
2. Ajoutez leurs interfaces.
3. Supprimez le bus électrique principal.
4. Listez ce qui doit rester actif durant 30 minutes.
5. Calculez l'énergie de secours nécessaire.
6. Vérifiez que le thermique reste compatible.

7. Définissez le minimum de **télémétrie** à transmettre.

8. Expliquez comment revenir au service normal.

Ce mini-projet vous oblige à penser en système: une panne électrique devient une question thermique, logicielle, de communication et de procédure.

18. Niveau suivant: de la feuille de calcul au modèle système

Lorsque les interfaces deviennent nombreuses, des outils de MBSE — Model-Based Systems Engineering — peuvent structurer exigences, fonctions et interfaces. Ils ne remplacent pas le raisonnement. Un modèle détaillé contenant une unité fautive ou une dépendance oubliée reste faux. La Space Academy utilise donc d'abord des bilans simples et traçables, puis passe aux outils lorsque le problème justifie leur complexité.

Studio d'ingénierie — fermer masse, puissance et marge

Le vaisseau d'exercice possède une masse cible de 60 t, une production électrique disponible de 18 kW dans le mode étudié et 14 kW de charges déjà engagées. Une nouvelle informatique ajoute 0,4 t et 1,2 kW. La marge de puissance passe alors de 4,0 kW à 2,8 kW, soit une diminution de 30 %. Le calcul oblige à suivre deux budgets à la fois: la masse en tonnes et la puissance instantanée en kilowatts; aucune de ces grandeurs ne peut être échangée directement contre l'autre.

Dans le **mode dégradé**, un convertisseur impose encore 0,8 kW de pertes. L'élève doit décider quelles charges peuvent être délestées sans perdre **navigation**, thermique ou communications de sécurité. Il doit aussi rechercher les effets secondaires: plus de chaleur à rejeter, une batterie sollicitée plus longtemps et éventuellement une masse de radiateur ou de câblage supplémentaire. Le capstone fait ainsi apparaître le vaisseau comme un système couplé.

Budget couplé — un kilowatt supplémentaire devient aussi de la masse et de la chaleur

Imaginons une charge utile demandant 1 kW en continu. Avec un rendement de conversion de 90 %, le réseau amont doit fournir environ 1,11 kW et près de 0,111 kW deviennent des pertes. Sur 24 heures, cela représente environ 2,67 kWh d'énergie dissipée que le contrôle thermique doit rejeter ou stocker. Le calcul est élémentaire, mais il montre une règle système: une modification électrique est en même temps une modification thermique et souvent une modification de masse.



Une serre martienne devient un sous-système consommant puissance, eau et contrôle thermique tout en produisant biomasse, **humidité** et charge de maintenance.

Ajoute ensuite une [autonomie](#) batterie de deux heures sans génération. La batterie doit couvrir la charge utile, les pertes de conversion et ses propres marges; sa masse modifie à son tour la structure et les manœuvres. Un budget de vaisseau est donc un réseau de grandeurs couplées. L'objectif n'est pas de trouver une batterie « parfaite », mais de suivre la propagation d'une exigence dans plusieurs sous-systèmes.

Sources et références

NASA — 2026 State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology · NASA Johnson Engineering · NASA/JPL — Mission to Mars Unit.

FDIR: la récupération doit être démontrée, pas seulement nommée

FDIR signifie Fault Detection, Isolation and Recovery: détection, isolation et récupération après défaut. Détecter consiste à reconnaître qu'un état n'est plus cohérent; isoler cherche quelle fonction ou chaîne est responsable; récupérer place le système dans un état sûr ou utile. Les trois étapes n'ont pas besoin d'être parfaites au même instant. Une anomalie peut être détectée rapidement puis isolée plus tard, à condition que le mode provisoire protège les ressources critiques. Les essais injectent des défauts réalistes — capteur bloqué, donnée incohérente, perte de bus, actionneur lent — et vérifient non seulement l'alarme mais l'état final du véhicule. Une logique FDIR qui génère une cascade d'actions incompréhensibles peut être plus dangereuse que le défaut initial.

Matrice de compétences FR ↔ EN

#	Français	English	Statut
01	Marge relative capacité/besoin	Relative capacity margin	PASS
02	Énergie consommée par une charge	Energy consumed by a load	PASS
03	Capacité nominale de batterie	Nominal battery capacity	PASS
04	Aire idéale de radiateur	Ideal radiator area	PASS