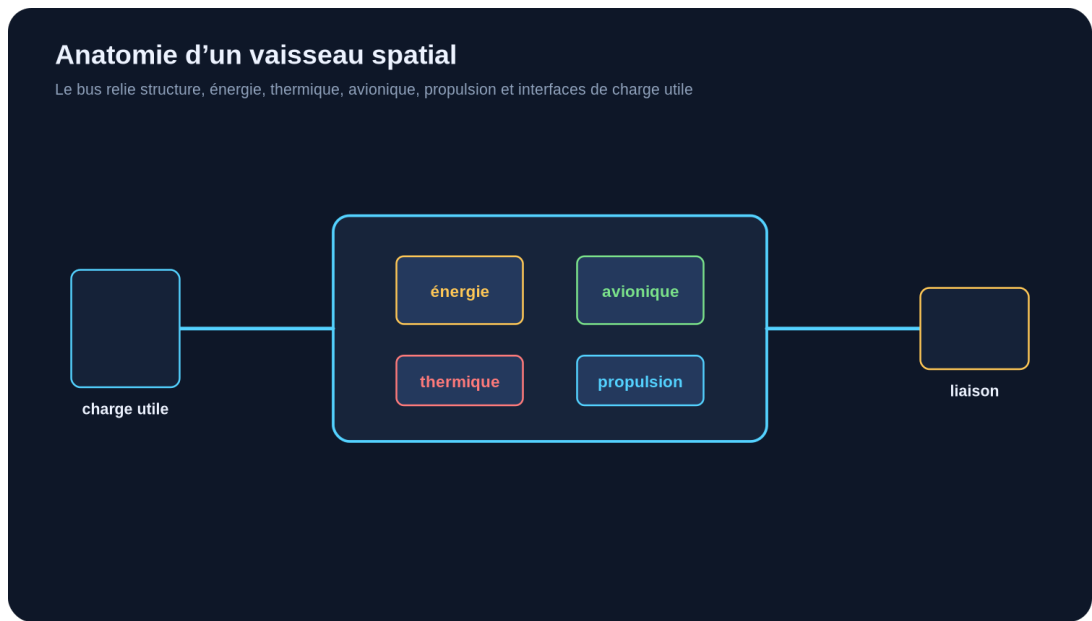


Anatomie d'un vaisseau spatial : bus, charge utile et sous-systèmes

Réponse essentielle

Anatomie d'un vaisseau spatial : bus, charge utile et sous-systèmes. La question à résoudre est la suivante : Quand on dit « le vaisseau », de quelles machines parle-t-on réellement ? Vu de loin, un véhicule Terre-Mars paraît unique. En réalité, structure, énergie, thermique, avionique, communications, GNC, propulsion et charge utile doivent fonctionner ensemble, parfois pendant des mois. La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres et quelle décision d'ingénierie il éclaire.



Vu de loin, un véhicule Terre-Mars paraît unique. En réalité, structure, énergie, thermique, avionique, communications, GNC, propulsion et charge utile doivent fonctionner ensemble, parfois pendant des mois.

Fonctions communes qui rendent la mission possible.

Avant de calculer

Grandeur:	Anatomie d'un vaisseau spatial : bus, charge utile et sous-systèmes
Contrôle:	unités + ordre de grandeur + hypothèses
Décision:	expliquer ce que le résultat autorise réellement à conclure

Anatomie d'un vaisseau spatial : bus, charge utile et sous-systèmes

2 — Les mots indispensables, expliqués avant de les utiliser

- Fonctions communes qui rendent la mission possible.
- Ce que le véhicule transporte pour accomplir son objectif.
- Famille organisée de fonctions et équipements.
- Frontière d'échange de données, énergie, chaleur, efforts ou matière.
- Condition vérifiable imposée à la conception.
- Réserve entre besoin et capacité.

3 — Voir l'architecture avant de calculer

- On part des fonctions, environnements et durées avant de choisir des boîtiers.
- Masse, énergie, données et chaleur sont partagés.
- Croisière, manœuvre, communication et mode sûr n'activent pas les mêmes charges.
- Deux équipements partageant alimentation ou logiciel peuvent tomber ensemble.

4 — Les formules, seulement lorsqu'elles répondent à une question

- Comment cela se lit : masse totale égale somme des masses
- Σ signifie additionner tous les éléments du budget.
- Comment cela se lit : puissance totale égale somme des charges actives
- La somme doit être faite par mode, pas aveuglément sur tous les équipements.

5 — Ce que les unités et les marges veulent dire

- kg, W, Wh/J, bit/s et températures doivent rester séparés : on n'additionne jamais des grandeurs physiques différentes.

6 — Trois démonstrations concrètes, calculées pas à pas

- 420 kg structure + 180 kg avionique + 260 kg énergie + 640 kg charge utile.
- $420+180+260+640 = 1\,500\text{ kg}$
- 10 % de réserve = 150 kg
- Total avec réserve = 1 650 kg
- Croisière 900 W ; manœuvre ajoute 600 W.

Lecture active

Sections:	2 — Les mots indispensables, expliqués avant de les utiliser ; 3 — Voir l'architecture avant de calculer
Vérification:	Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.
Exercice:	modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Anatomie d'un vaisseau spatial : bus, charge utile et sous-systèmes

Manœuvre = 1 500 W

Vérifier génération et distribution au pic.

Ordinateur utile 80 W, convertisseur 90 %.

Amont = $80/0,90 = 88,9$ W

Ces 8,9 W deviennent chaleur locale.

7 — Approfondissement : ce que le schéma simplifié cache

Quelles fonctions doivent exister ?

Quels équipements réalisent ces fonctions ?

Un chauffage dépend du capteur, du logiciel, du relais et de l'alimentation.

Décider ce qui reste vivant quand la capacité baisse.

Analyse, inspection, essais et démonstrations ferment la boucle.

8 — Application à un vaisseau Terre-Mars**9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte**

Un vaisseau ne se dessine pas en commençant par choisir une batterie, un ordinateur ou un moteur. On commence par une mission : masse à transporter, destination, durée, précision de navigation, communications, environnement, autonomie, sécurité et éventuellement présence humaine. Ces besoins sont transformés en exigences mesurables. L'architecture fonctionnelle décrit ensuite ce que le véhicule doit savoir faire : produire et distribuer de l'énergie, maintenir ses températures, se connaître lui-même, communiquer, orienter sa poussée, protéger ses occupants ou sa charge utile. L'architecture physique vient seulement après : elle attribue ces fonctions à des équipements réels. Cette distinction évite le piège consistant à faire rentrer la mission dans une collection de matériels déjà choisis.

Le mot bus est pratique mais il ne signifie pas qu'il existe un bloc unique portant une étiquette « bus ». Il regroupe les fonctions communes qui rendent la mission possible. La charge utile est ce qui accomplit directement l'objectif principal : instrument scientifique, cargaison, habitat, démonstrateur, etc. Dans un véhicule Terre-Mars, la frontière devient parfois floue : un système de support-vie est-il du bus ou une partie de la mission humaine ? Une antenne sert-elle au véhicule ou à l'expérience ? L'important n'est pas le classement administratif, mais la clarté des interfaces, responsabilités, budgets et modes. Une mauvaise frontière peut masquer une dépendance critique.

Masse, puissance, énergie, volume, dissipation thermique, débit de données, ergols et temps de calcul sont des ressources partagées. Un budget n'est donc pas un tableau décoratif ajouté à la fin du projet : il sert à empêcher chaque équipe d'optimiser localement au détriment du véhicule complet. Si un instrument gagne 20 kilogrammes, la structure, la propulsion et parfois le lanceur en subissent les conséquences. Si une radio émet plus fort, elle réclame davantage de puissance et produit davantage de chaleur. Les marges doivent être explicitement définies : marge de croissance, réserve de programme, capacité de pointe ou marge de conception ne veulent pas forcément dire la même chose.

Lecture active

Sections: 7 — Approfondissement : ce que le schéma simplifié cache ; 8 — Application à un vaisseau Terre-Mars

Vérification: Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.

Exercice: modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Anatomie d'un vaisseau spatial : bus, charge utile et sous-systèmes

Les besoins changent selon les modes : lancement, croisière, communication à haut débit, manœuvre, recharge, observation, sommeil équipage, urgence ou mode sûr. Additionner tous les équipements comme s'ils fonctionnaient ensemble peut surdimensionner le système ; calculer seulement une moyenne peut au contraire cacher un pic impossible à fournir. Une matrice modes-fonctions indique ce qui doit être allumé, ce qui peut être coupé, quelles redondances restent disponibles et quelles transitions sont autorisées. Dans un trajet Terre-Mars, la capacité à survivre longtemps dans un mode dégradé peut compter davantage qu'une performance maximale de quelques minutes.

Deux ordinateurs identiques alimentés par le même convertisseur ne constituent pas une protection contre la perte de ce convertisseur. Deux logiciels copiés bit pour bit peuvent partager le même défaut de conception. Deux capteurs installés au même endroit peuvent subir la même surchauffe ou le même choc. On distingue donc les pannes individuelles des défaillances de cause commune . Une architecture robuste cherche à éviter qu'un seul événement puisse supprimer toutes les voies nécessaires à une fonction vitale. Cela conduit parfois à séparer les alimentations, les chemins de données, les capteurs, les emplacements physiques ou même les technologies utilisées.

Pour une mission proche de la Terre, une panne peut parfois être contournée par une intervention rapide au sol ou par un remplacement lors d'une prochaine rotation. Sur Mars, cette logique change radicalement. Il faut prévoir diagnostic, accès physique, pièces de rechange, outils, connecteurs, procédures, compatibilité logicielle et capacité à isoler un équipement en panne. Une architecture très compacte peut gagner de la masse mais rendre une réparation impossible. Une architecture modulaire peut coûter quelques kilogrammes supplémentaires mais simplifier la maintenance. La « meilleure » solution dépend donc de la durée, de l'équipage, du niveau d'autonomie et de la conséquence d'une panne.

Une architecture n'est pas crédible parce qu'un diagramme est élégant. Chaque exigence importante doit avoir une méthode de vérification : analyse, inspection, démonstration, essai ou combinaison de ces approches. Les interfaces doivent être testées dans des configurations représentatives ; les modes dégradés doivent être exercés ; les marges doivent être recalculées après chaque changement. La validation pose une question différente : même si le système est conforme à ses exigences, répond-il réellement au besoin de mission ? C'est la différence entre construire correctement le mauvais véhicule et construire le véhicule réellement utile.

10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions

Additionner les puissances sans mode.

Appeler redondants deux équipements à cause commune.

Bus, charge utile et interfaces : penser le vaisseau comme système

Lecture active

Sections:	10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions ; Bus, charge utile et interfaces : penser le vaisseau comme système
Vérification:	Une valeur n'est exploitable qu'avec son unité et sa frontière de calcul.
Exercice:	modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer

Anatomie d'un vaisseau spatial : bus, charge utile et sous-systèmes

Le bus regroupe les fonctions qui permettent au véhicule d'exister et d'opérer : structure, énergie, thermique, avionique, communications, attitude et souvent propulsion. La charge utile est ce que la mission transporte pour produire son effet : instruments, cargo, habitat ou équipage selon le cas. La frontière n'est pas toujours physique ; elle sert surtout à attribuer exigences, interfaces et responsabilités.

Une interface transforme un sous-système local en problème système. Une caméra demande masse et fixation, mais aussi puissance, données, thermique, champ de vue, temps processeur et procédures. Chaque budget doit être évalué dans plusieurs modes : lancement, croisière, manœuvre, science, panne et survie. Une moyenne journalière peut masquer un pic instantané impossible à fournir.

La redondance se juge également aux interfaces. Deux ordinateurs alimentés par le même convertisseur ou exécutant le même logiciel peuvent partager une cause commune. Concevoir le bus consiste donc autant à organiser les dépendances qu'à choisir des composants performants.

11 — Exercices guidés

Question : Quelle question faut-il poser avant de choisir un équipement ?

Question : Pourquoi un résultat nominal ne suffit-il pas ?

12 — À retenir

Expliquer le sujet avec des mots simples avant les symboles.

Relier au moins quatre interfaces avec les autres sous-systèmes.

Refaire les trois exemples numériques sans saut de raisonnement.

13 — Sources NASA pour approfondir

NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms

NASA - 2026 State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology

Lecture active

Sections:	11 — Exercices guidés ; 12 — À retenir
Vérification:	NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms NASA - 2026 State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology NASA Systems Engineering Handbook
Exercice:	modifiez une hypothèse puis prédissez le sens de variation avant de recalculer