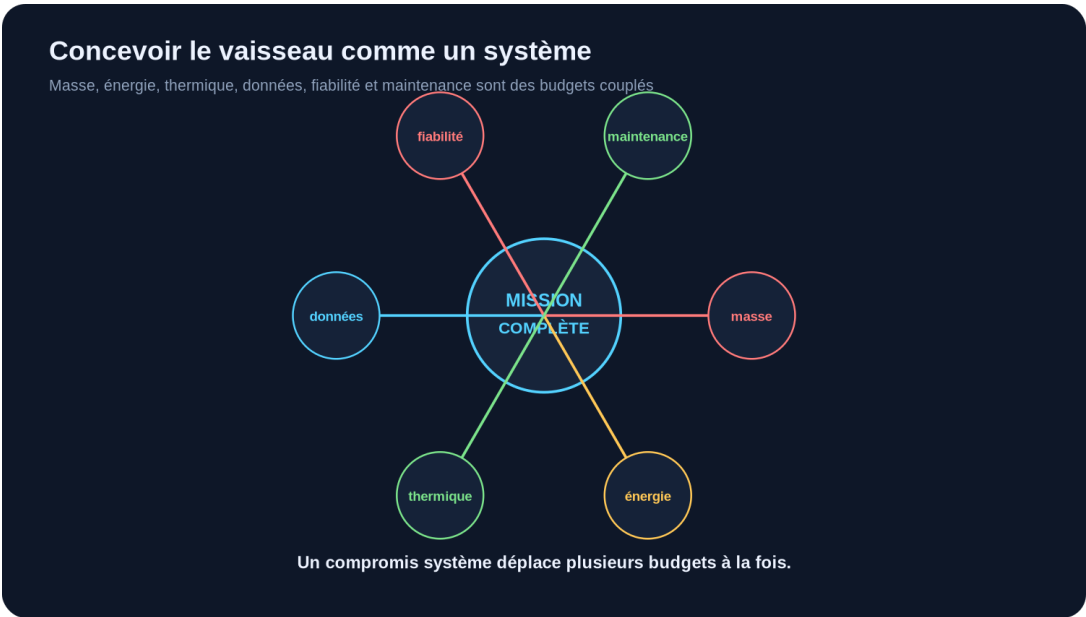


Concevoir un vaisseau complet : modes, compromis, marges et décisions système

Réponse essentielle

Concevoir un vaisseau complet : modes, compromis, marges et décisions système. La question à résoudre est la suivante : Comment choisir entre deux architectures quand aucune n'est meilleure partout ? Les critères peuvent avoir des unités incompatibles ; ils ne deviennent additionnables qu'après normalisation explicite dans une méthode de décision. 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.



Possibilité d'un événement et conséquence selon méthode.

Réserve pour incertitude ou croissance.

Avant de calculer

Grandeur:	Concevoir un vaisseau complet : modes, compromis, marges et décisions système
Contrôle:	unités + ordre de grandeur + hypothèses
Décision:	expliquer ce que le résultat autorise réellement à conclure

Concevoir un vaisseau complet : modes, compromis, marges et décisions système

Possibilité d'un événement et conséquence selon méthode.

Réserve pour incertitude ou croissance.

3 — Voir l'architecture avant de calculer

Lister lancement, croisière, urgence et arrivée.

Garder plusieurs solutions assez longtemps.

Comparer masse, énergie, risque, maturité et maintenabilité.

Un choix local déplace d'autres budgets.

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

Comment cela se lit : score égale somme poids fois notes

Structure une comparaison mais les poids restent un choix à justifier.

Comment cela se lit : réserve égale capacité moins besoin

Une réserve positive en masse ne compense pas une réserve négative en énergie.

5 — Ce que les unités et les marges veulent dire

Les critères peuvent avoir des unités incompatibles ; ils ne deviennent additionnables qu'après normalisation explicite dans une méthode de décision.

6 — Trois démonstrations concrètes, calculées pas à pas

A : masse 8/10, robustesse 4/10. B : 6/10 et 8/10. Poids 40/60.

B gagne avec ces poids.

8 000 kg avec 15 % de réserve, +600 kg de croissance.

Deux chauffages 400 W, un seul nominalement, les deux en urgence.

7 — Approfondissement : ce que le schéma simplifié cache

L'optimisation locale ne doit pas violer l'objectif système.

Une technologie prometteuse peut augmenter le risque de développement.

En longue mission, diagnostiquer et réparer peut valoir de la masse.

Les marges se consomment au fur et à mesure de la maturation.

Identifier tôt les choix qui ferment des options.

8 — Application à un vaisseau Terre-Mars

Lecture active

Sections:	3 — Voir l'architecture avant de calculer ; 4 — Les formules, seulement lorsqu'elles répondent à une question
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

Concevoir un vaisseau complet : modes, compromis, marges et décisions système

9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte

Aucun sous-système ne peut être maximisé indépendamment. Plus de blindage augmente la masse ; plus de puissance peut augmenter radiateurs et batteries ; plus de redondance augmente masse, coût et logiciel ; davantage de performances propulsion peut imposer stockage ou thermique plus complexes. L'ingénierie système compare donc des architectures, pas seulement des composants. Un compromis n'est pas forcément une concession médiocre : c'est le choix explicite de la meilleure combinaison au regard des objectifs et contraintes de mission.

Une exigence de haut niveau - par exemple assurer un retour sûr de l'équipage - se décompose en fonctions et exigences de sous-systèmes. Chaque exigence fille doit être reliée à sa raison d'être. Sinon, le projet accumule des spécifications orphelines. La traçabilité permet aussi de mesurer l'impact d'un changement : si la durée de mission augmente, quelles exigences thermiques, énergétiques, de stockage, de maintenance et de support-vie doivent être révisées ?

Une technologie très performante sur le papier peut être immature : fabrication difficile, faible historique d'essais, fournisseurs rares ou comportement incertain dans l'environnement réel. Choisir cette technologie transfère une partie du risque de la phase opérationnelle vers la phase de développement. Les démonstrateurs, prototypes et essais servent à faire monter la maturité avant de la rendre critique pour une mission. L'innovation utile est celle dont le chemin de qualification est compris.

Au début, l'incertitude sur la masse ou la puissance est grande ; les projets conservent donc des réserves. À mesure que la conception se précise, certaines incertitudes diminuent, mais de nouveaux détails ajoutent souvent des besoins. Suivre seulement la valeur finale masque cette dynamique. Les équipes regardent la croissance, la marge restante et la tendance. Une marge n'autorise pas automatiquement à ajouter une fonction : elle protège d'abord contre ce qui n'est pas encore connu.

Une mission de quelques jours peut accepter un équipement non réparable si sa fiabilité et sa redondance suffisent. Une infrastructure martienne de plusieurs années ne peut pas appliquer la même philosophie partout. Diagnostic, accès, modularité, pièces de rechange, documentation, formation et capacité locale de fabrication prennent de la valeur. Cela peut justifier plus de masse initiale. Le compromis système doit donc intégrer la durée de vie du service, pas seulement le lancement initial.

Certaines décisions peuvent être modifiées tardivement ; d'autres ferment des options. Le diamètre d'un habitat, une tension de distribution, un standard de données ou une architecture de réservoir peut conditionner des dizaines d'interfaces futures. Les choix irréversibles doivent être reconnus tôt et entourés de davantage d'analyse. À l'inverse, les éléments faciles à remplacer peuvent rester ouverts plus longtemps. Cette gestion de l'irréversibilité évite de figer trop tôt ce qui n'est pas mûr.

Le vaisseau complet n'est pas dimensionné uniquement pour une journée nominale. Il doit traverser lancement, croisière, corrections, communications, incidents, approche, mise en sécurité et éventuellement retour. Chaque scénario active des fonctions et des risques différents. Les analyses de mission, matrices de modes, arbres de défaillance, FMEA /FMECA et essais d'opérations construisent une vision cohérente. La qualité d'une architecture se juge notamment à sa capacité à rester compréhensible lorsque plusieurs choses se passent mal en même temps.

Lecture active

Sections: 9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte

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

Concevoir un vaisseau complet : modes, compromis, marges et décisions système

10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions

Prendre un score pour une vérité objective.

Utiliser la moyenne au lieu des modes de pointe.

Concevoir le vaisseau complet revient à gérer des compromis qui se déplacent

Une architecture système commence par les phases et modes de mission : lancement, croisière, science, manœuvre, panne, mode sûr, fin de vie. Chaque mode active des sous-systèmes différents et impose des ressources différentes. Le véhicule n'est donc pas une somme de masses : c'est un réseau de dépendances qui change dans le temps.

Les compromis doivent être évalués avec leurs effets secondaires. Ajouter une batterie augmente autonomie mais aussi masse et thermique ; augmenter redondance peut multiplier interfaces et logiciel ; réduire masse de structure peut augmenter vibration et coût de qualification. Une optimisation locale peut dégrader la mission complète.

La maturité de conception se voit dans les marges et la configuration. Au début, les inconnues sont grandes et les réserves élevées. À mesure que les essais et modèles convergent, on consomme ou libère des marges. Une décision tardive n'est acceptable que si ses conséquences sont propagées jusqu'aux autres budgets et preuves.

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

NASA - 2026 State-of-the-Art: Integration, Launch, Deployment and Orbital Transport

Lecture active

Sections:	10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions ; Concevoir le vaisseau complet revient à gérer des compromis qui se déplacent
Vérification:	NASA Systems Engineering Handbook NASA - 2026 State-of-the-Art: Complete Spacecraft Platforms NASA - 2026 State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology
Exercice:	modifiez une hypothèse puis prédisez le sens de variation avant de recalculer