

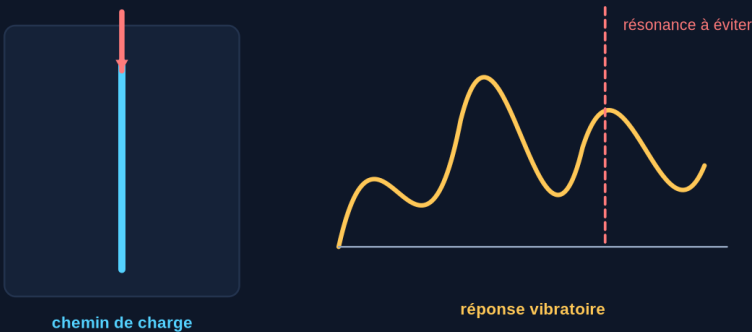
# Structure : charges, vibrations, rigidité et marges

## Réponse essentielle

Structure : charges, vibrations, rigidité et marges. La question à résoudre est la suivante : Pourquoi une structure spatiale doit-elle être légère sans devenir fragile ni trop souple ? Au lancement, une structure subit accélérations, vibrations et chocs. En croisière, les charges baissent mais l'alignement et les dilatations thermiques continuent de compter. 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.

### Structure : charges et vibrations

La structure doit transmettre les efforts sans flambement et garder ses fréquences propres hors zones critiques



Au lancement, une structure subit accélérations, vibrations et chocs. En croisière, les charges baissent mais l'alignement et les dilatations thermiques continuent de compter.

Effort appliqué : traction, compression, flexion, vibration ou choc.

## Avant de calculer

|           |                                                             |
|-----------|-------------------------------------------------------------|
| Grandeur: | Structure : charges, vibrations, rigidité et marges         |
| Contrôle: | unités + ordre de grandeur + hypothèses                     |
| Décision: | expliquer ce que le résultat autorise réellement à conclure |

Structure : charges, vibrations, rigidité et marges

## 2 — Les mots indispensables, expliqués avant de les utiliser

Effort appliqué : traction, compression, flexion, vibration ou choc.

Force rapportée à une surface.

Capacité à limiter la déformation.

Amplification près d'une fréquence propre.

Perte de stabilité d'une pièce comprimée.

## 3 — Voir l'architecture avant de calculer

La charge doit passer continûment vers les appuis.

Un instrument peut perdre son alignement sans que le matériau casse.

Les modes propres interagissent avec le lanceur ou les mécanismes.

Des matériaux différents se dilatent différemment.

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

Comment cela se lit :  $\sigma$  égale force divisée par aire

Contrainte moyenne simple ; les détails géométriques créent des concentrations.

Comment cela se lit : force égale masse multipliée par accélération

Première estimation des charges d'inertie, pas un modèle vibratoire complet.

## 5 — Ce que les unités et les marges veulent dire

N pour force, Pa ou MPa pour contrainte, Hz pour fréquence, m ou mm pour déformation.

## 6 — Trois démonstrations concrètes, calculées pas à pas

50 kg à 6 g, avec  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ .

20 kN dans  $400 \text{ mm}^2$ .

2 m d'aluminium,  $\Delta T=60 \text{ K}$ ,  $\alpha=23 \times 10^{-6}/\text{K}$ .

## 7 — Approfondissement : ce que le schéma simplifié cache

La structure primaire porte les charges critiques ; la secondaire supporte équipements et accessoires.

Une pièce peut perdre sa stabilité avant d'atteindre sa résistance simple.

Les cycles accumulent des dommages.

Les essais corréleront les modèles de vibration.

Une petite fixation peut être plus critique qu'un grand panneau.

## 8 — Application à un vaisseau Terre-Mars

### 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

**Structure : charges, vibrations, rigidité et marges****9 — Dossier de référence : ce qu'un vrai projet doit encore prendre en compte**

Au sol, on pense souvent structure en termes de poids statique. Un vaisseau subit surtout des charges d'accélération, de vibration, d'acoustique, de pression, de manœuvre et de thermique. Pendant le lancement, des équipements légers peuvent exercer des efforts importants parce que l'accélération multiplie leur inertie. Les charges sont transmises par une chaîne : équipement, fixation, panneau, cadre, adaptateur, lanceur. Une faiblesse dans un petit insert ou un boulon peut donc limiter un ensemble beaucoup plus massif. L'analyse commence par identifier les chemins de charge, pas seulement par épaissir les panneaux.

Une pièce peut ne pas casser tout en étant inutilisable. Si elle se déforme trop, une antenne perd son pointage, un mécanisme se coince ou un joint se désaligne. La rigidité contrôle les déformations et les fréquences propres. La stabilité concerne notamment le flambement : une paroi comprimée peut se déformer brutalement bien avant que le matériau n'atteigne sa limite simple de résistance. Les marges doivent donc être calculées par mode de ruine : traction, compression, cisaillement, flambement, fatigue, rupture de fixation ou autre mécanisme pertinent.

Un lanceur impose des vibrations et un environnement acoustique qui excitent la structure. Chaque assemblage possède des fréquences propres. Si l'excitation approche l'une d'elles, la réponse peut être amplifiée : c'est la résonance. Les ingénieurs utilisent modèles modaux, analyses de réponse et essais pour vérifier que les fréquences et amortissements réels correspondent aux prévisions. Une modification de masse apparemment anodine peut déplacer une fréquence propre ; c'est pourquoi la configuration mécanique doit rester maîtrisée jusque tard dans l'intégration.

La rupture n'est pas seulement causée par un effort unique trop élevé. Des cycles répétés peuvent amorcer puis propager une fissure. Les cycles thermiques entre chaud et froid, les pressurisations, les mouvements de mécanismes et certaines vibrations produisent de la fatigue. Une mission longue vers Mars augmente le nombre de cycles de certains composants. La conception doit donc tenir compte du spectre de chargement, des concentrations de contrainte autour des trous et fixations, de la qualité de fabrication et de l'inspection des zones sensibles.

Deux matériaux différents ne se dilatent pas nécessairement de la même manière. Si un panneau aluminium, une optique, un composite et un boîtier électronique sont fortement contraints ensemble, un changement de température peut créer des efforts internes ou déplacer un alignement. Les interfaces utilisent parfois des liaisons flexibles, des jeux contrôlés ou des matériaux choisis pour réduire les incompatibilités. Le thermique et la structure ne sont donc pas des disciplines indépendantes : un calcul mécanique qui ignore les températures peut être faux.

Une marge calculée repose sur des hypothèses : charges, propriétés matériau, facteurs de sécurité, géométrie, température, défauts et dispersion de fabrication. Si l'hypothèse de charge est mauvaise, une belle marge numérique n'a aucune valeur. Les propriétés des matériaux peuvent aussi évoluer avec la température, l'irradiation ou le vieillissement. La discipline consiste à tracer la provenance de chaque donnée et à vérifier que les cas combinés réellement critiques sont couverts.

Les analyses par éléments finis sont puissantes mais elles restent des modèles. Les essais de vibration, essais statiques, mesures de fréquences propres et inspections permettent de comparer le réel aux prévisions. Si le comportement mesuré diffère, le modèle est mis à jour avant de l'utiliser pour extrapoler à d'autres cas. Cette boucle analyse-essai-corrélation est essentielle : elle transforme un modèle théorique en outil de confiance. Pour un système martien réparable, elle aide aussi à définir quelles déformations, fissures ou jeux doivent être surveillés en service.

**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

Structure : charges, vibrations, rigidité et marges

10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions

Utiliser  $F=ma$  comme environnement vibratoire complet.

Oublier le flambement et les concentrations.

Une structure spatiale doit survivre à des environnements contradictoires

Au lancement, la structure doit supporter accélérations, vibrations, acoustique et charges introduites par l'interface avec le lanceur. En croisière, elle devient surtout une référence géométrique : antennes, capteurs et mécanismes doivent rester alignés malgré cycles thermiques et vieillissement. Une structure très rigide peut gagner en précision mais pénaliser la masse et transmettre davantage de vibration.

La fréquence propre compte parce qu'une excitation proche d'un mode structural peut amplifier fortement le mouvement. Les analyses modales, essais de vibration et critères de séparation avec les fréquences du lanceur servent à éviter cette résonance. Le flambement concerne au contraire une instabilité sous compression : une paroi mince peut perdre sa forme avant même d'atteindre la limite de résistance du matériau.

Les marges ne sont donc pas un unique pourcentage appliqué partout. On distingue cas de charge, facteurs, incertitudes matériau, fatigue et tolérances. La preuve finale combine calcul, modèles corrélés et essais adaptés à l'environnement.

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: Structures, Materials, and Mechanisms

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

Lecture active

**Sections:** 10 — Pièges fréquents et mauvaises intuitions ; Une structure spatiale doit survivre à des environnements contradictoires

**Vérification:** NASA - 2026 State-of-the-Art: Structures, Materials, and Mechanisms | NASA - 2026 State-of-the-Art: Integration, Launch, Deployment and Orbital Transp | NASA Systems Engineering Handbook

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