

Structures, matériaux & vibrations

Une structure spatiale doit survivre au lancement, fonctionner dans le vide, supporter des cycles thermiques, maintenir des alignements précis puis parfois se déployer après des mois de stockage. Ajouter de la matière partout rendrait le véhicule trop lourd; en retirer sans méthode crée des marges fictives. L'ingénierie des structures consiste donc à comprendre les chemins de charge, les modes de rupture et les environnements de qualification.

Comprendre le problème avant les équations

Question de départ — Structures, matériaux & vibrations: comment « Comprendre avant de calculer » agit-il sur « déformation », et quel repère issu de « fréquence propre » permet de vérifier la décision?

Intuition. Pendant le lancement, une structure légère doit survivre aux vibrations, aux accélérations et aux charges locales sans devenir inutilement lourde.

1

Comprendre avant de calculer

Pendant le lancement, une structure légère doit survivre aux vibrations, aux accélérations et aux charges locales sans devenir inutilement lourde.

2

déformation

Définition sans prérequis.

3

fréquence propre

Définition sans prérequis.

Repère concret. Une barre de 1 m qui s'allonge de 1 mm subit une déformation de 0,001, soit 0,1 %.

- Comprendre avant de calculer — Pendant le lancement, une structure légère doit survivre aux vibrations, aux accélérations et aux charges locales sans devenir inutilement lourde.
- déformation — Définition sans prérequis.
- fréquence propre — Définition sans prérequis.

Préparation du module 19: modules 01 à 09 recommandés. Le module 19 revient sur les grandeurs qui conditionnent directement « Structures, matériaux & vibrations ».

RAMPE ZÉRO PRÉREQUIS · MODULE 19

Comprendre avant de calculer

Pendant le lancement, une structure légère doit survivre aux vibrations, aux accélérations et aux charges locales sans devenir inutilement lourde.

Progression du module — contrainte mécanique; déformation; fréquence propre; marge de sécurité.

contrainte mécanique

Définition sans prérequis. La [contrainte mécanique](#) rapporte une force à une surface résistante. Elle permet de comparer l'effort interne à ce que le matériau peut supporter.

Scène concrète. Une même force appliquée sur une petite section produit une contrainte plus élevée que sur une section plus grande.

Contrôle mental. À section plus petite pour le même effort axial, la contrainte doit augmenter; vérifiez que force et surface utilisent des unités compatibles.

Piège à éviter. Ne confondez pas force en newtons et contrainte en pascals: la seconde intègre la surface qui porte l'effort.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [contrainte mécanique](#) » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Exercice guidé — contrainte mécanique

Situation à reconnaître. Une même force appliquée sur une petite section produit une contrainte plus élevée que sur une section plus grande.

Vérification demandée. À section plus petite pour le même effort axial, la contrainte doit augmenter; vérifiez que force et surface utilisent des unités compatibles.

Erreur à écarter. Ne confondez pas force en newtons et contrainte en pascals: la seconde intègre la surface qui porte l'effort.

Corrigé raisonné

Sens précis

La contrainte mécanique rapporte une force à une surface résistante. Elle permet de comparer l'effort interne à ce que le matériau peut supporter.

Test du cas

À section plus petite pour le même effort axial, la contrainte doit augmenter; vérifiez que force et surface utilisent des unités compatibles.

Piège exclu

Ne confondez pas force en newtons et contrainte en pascals: la seconde intègre la surface qui porte l'effort.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « [contrainte mécanique](#) » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Quantification

contrainte mécanique: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

contrainte mécanique: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

déformation

Définition sans prérequis. La [déformation](#) décrit le changement relatif de longueur ou de forme d'un matériau sous charge. Elle est souvent sans unité parce qu'elle compare une variation de longueur à une longueur initiale.

Scène concrète. Une barre de 1 m qui s'allonge de 1 mm subit une déformation de 0,001, soit 0,1 %.

Contrôle mental. Une [déformation](#) sans dimension de quelques pourcents peut déjà être énorme pour un matériau structurel rigide; comparez toujours au domaine élastique admissible.

Piège à éviter. Une faible déformation ne signifie pas automatiquement absence de dommage: fatigue, fissures et concentrations de contraintes peuvent rester critiques.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [déformation](#) » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Exercice guidé — déformation

Situation à reconnaître. Une barre de 1 m qui s'allonge de 1 mm subit une déformation de 0,001, soit 0,1 %.

Vérification demandée. Une déformation sans dimension de quelques pourcents peut déjà être énorme pour un matériau structurel rigide; comparez toujours au domaine élastique admissible.

Erreur à écarter. Une faible déformation ne signifie pas automatiquement absence de dommage: fatigue, fissures et concentrations de contraintes peuvent rester critiques.

Corrigé raisonné

Sens précis

La déformation décrit le changement relatif de longueur ou de forme d'un matériau sous charge. Elle est souvent sans unité parce qu'elle compare une variation de longueur à une longueur initiale.

Test du cas

Une déformation sans dimension de quelques pourcents peut déjà être énorme pour un matériau structurel rigide; comparez toujours au domaine élastique admissible.

Piège exclu

Une faible déformation ne signifie pas automatiquement absence de dommage: fatigue, fissures et concentrations de contraintes peuvent rester critiques.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « déformation » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Termes du corrigé. [observation](#)

fréquence propre

Définition sans prérequis. Une [fréquence propre](#) est une fréquence à laquelle une structure tend naturellement à vibrer. Une excitation proche peut provoquer une amplification appelée résonance.

Scène concrète. Un panneau, une antenne ou un réservoir possède plusieurs modes propres; les essais vibratoires cherchent notamment les modes proches de l'environnement lanceur.

Contrôle mental. Une excitation proche d'une [fréquence propre](#) peut amplifier fortement la réponse; si votre modèle ne montre aucune sensibilité au voisinage de la résonance, vérifiez amortissement et conditions aux limites.

Piège à éviter. Éviter une seule fréquence ne suffit pas: une structure possède plusieurs modes et les propriétés changent avec la [température](#), le carburant et la configuration.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [fréquence propre](#) » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Exercice guidé — fréquence propre

Situation à reconnaître. Un panneau, une antenne ou un réservoir possède plusieurs modes propres; les essais vibratoires cherchent notamment les modes proches de l'environnement lanceur.

Vérification demandée. Une excitation proche d'une fréquence propre peut amplifier fortement la réponse; si votre modèle ne montre aucune sensibilité au voisinage de la résonance, vérifiez amortissement et conditions aux limites.

Erreur à écarter. Éviter une seule fréquence ne suffit pas: une structure possède plusieurs modes et les propriétés changent avec la température, le carburant et la configuration.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une fréquence propre est une fréquence à laquelle une structure tend naturellement à vibrer. Une excitation proche peut provoquer une amplification appelée résonance.

Test du cas

Une excitation proche d'une fréquence propre peut amplifier fortement la réponse; si votre modèle ne montre aucune sensibilité au voisinage de la résonance, vérifiez amortissement et conditions aux limites.

Piège exclu

Éviter une seule fréquence ne suffit pas: une structure possède plusieurs modes et les propriétés changent avec la température, le carburant et la configuration.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « fréquence propre » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Quantification

fréquence propre: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

fréquence propre: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

marge de sécurité

Définition sans prérequis. Une [marge de sécurité](#) compare la capacité démontrée ou calculée d'un élément à la charge qu'il doit subir, en tenant compte du facteur de sécurité choisi.

Scène concrète. Si la résistance admissible est nettement supérieure à la contrainte maximale prévue, une marge positive existe; elle doit être définie selon le [référentiel](#) de conception utilisé.

Contrôle mental. Une charge réelle plus proche de la limite admissible doit réduire la marge; un calcul qui l'augmente a probablement inversé besoin et capacité.

Piège à éviter. Une marge positive sur un calcul statique ne couvre pas automatiquement fatigue, flambement, chocs ou défauts de fabrication.

Pourquoi cela compte en mission. Dans ce module, une erreur sur « [marge de sécurité](#) » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Exercice guidé — marge de sécurité

Situation à reconnaître. Si la résistance admissible est nettement supérieure à la contrainte maximale prévue, une marge positive existe; elle doit être définie selon le référentiel de conception utilisé.

Vérification demandée. Une charge réelle plus proche de la limite admissible doit réduire la marge; un calcul qui l'augmente a probablement inversé besoin et capacité.

Erreur à écarter. Une marge positive sur un calcul statique ne couvre pas automatiquement fatigue, flambement, chocs ou défauts de fabrication.

Corrigé raisonné

Sens précis

Une marge de sécurité compare la capacité démontrée ou calculée d'un élément à la charge qu'il doit subir, en tenant compte du facteur de sécurité choisi.

Test du cas

Une charge réelle plus proche de la limite admissible doit réduire la marge; un calcul qui l'augmente a probablement inversé besoin et capacité.

Piège exclu

Une marge positive sur un calcul statique ne couvre pas automatiquement fatigue, flambement, chocs ou défauts de fabrication.

Conséquence opérationnelle

Dans ce module, une erreur sur « [marge de sécurité](#) » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue.

Termes du corrigé. [vérification](#)

Quantification

marge de sécurité: relation qualitative ici; aucune unité intrinsèque.

Vérification

marge de sécurité: confronter conclusion, contrôle et piège de la carte.

Étude intégrée — Structures, matériaux & vibrations

Situation à analyser. Pendant le lancement, une structure légère doit survivre aux vibrations, aux accélérations et aux charges locales sans devenir inutilement lourde.

- **contrainte mécanique:** Une même force appliquée sur une petite section produit une contrainte plus élevée que sur une section plus grande. Contrôle attendu: À section plus petite pour le même effort axial, la contrainte doit augmenter; vérifiez que force et surface utilisent des unités compatibles.

- **déformation:** Une barre de 1 m qui s'allonge de 1 mm subit une déformation de 0,001, soit 0,1 %. Contrôle attendu: Une déformation sans dimension de quelques pourcents peut déjà être énorme pour un matériau structural rigide; comparez toujours au domaine élastique admissible.
- **fréquence propre:** Un panneau, une antenne ou un réservoir possède plusieurs modes propres; les essais vibratoires cherchent notamment les modes proches de l'environnement lanceur. Contrôle attendu: Une excitation proche d'une fréquence propre peut amplifier fortement la réponse; si votre modèle ne montre aucune sensibilité au voisinage de la résonance, vérifiez amortissement et conditions aux limites.
- **marge de sécurité:** Si la résistance admissible est nettement supérieure à la contrainte maximale prévue, une marge positive existe; elle doit être définie selon le référentiel de conception utilisé. Contrôle attendu: Une charge réelle plus proche de la limite admissible doit réduire la marge; un calcul qui l'augmente a probablement inversé besoin et capacité.

Le diagnostic ne doit pas confondre « contrainte mécanique » et « déformation ». Le premier se reconnaît ici par le cas suivant: Une même force appliquée sur une petite section produit une contrainte plus élevée que sur une section plus grande. Le second doit être contrôlé autrement: Une déformation sans dimension de quelques pourcents peut déjà être énorme pour un matériau structural rigide; comparez toujours au domaine élastique admissible.

Une seconde vérification croise « fréquence propre » et « marge de sécurité ». Gardez comme alerte « Éviter une seule fréquence ne suffit pas: une structure possède plusieurs modes et les propriétés changent avec la température, le carburant et la configuration. »; pour « marge de sécurité », utilisez plutôt ce test: Une charge réelle plus proche de la limite admissible doit réduire la marge; un calcul qui l'augmente a probablement inversé besoin et capacité.

Exercice de synthèse

Dans la situation de « Structures, matériaux & vibrations », classez les indices selon « contrainte mécanique » (À section plus petite pour le même effort axial, la contrainte doit augmenter; vérifiez que force et surface utilisent des unités compatibles.), « déformation » (Une déformation sans dimension de quelques pourcents peut déjà être énorme pour un matériau structural rigide; comparez toujours au domaine élastique admissible.), « fréquence propre » (Une excitation proche d'une fréquence propre peut amplifier fortement la réponse; si votre modèle ne montre aucune sensibilité au voisinage de la résonance, vérifiez amortissement et conditions aux limites.), « marge de sécurité » (Une charge réelle plus proche de la limite admissible doit réduire la marge; un calcul qui l'augmente a probablement inversé besoin et capacité.)
Décision suspendue si un contrôle échoue.

Corrigé de synthèse

Pour contrainte mécanique, Dans ce module, une erreur sur « contrainte mécanique » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue. Le garde-fou principal est: Ne confondez pas force en newtons et contrainte en pascals: la seconde intègre la surface qui porte l'effort. Pour déformation, Dans ce module, une erreur sur « déformation » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue. Le garde-fou principal est: Une faible déformation ne signifie pas automatiquement absence de dommage: fatigue, fissures et concentrations de contraintes peuvent rester critiques. Pour fréquence propre, Dans ce module, une erreur sur « fréquence propre » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue. Le garde-fou principal est: Éviter une seule fréquence ne suffit pas: une structure possède plusieurs modes et les propriétés changent avec la température, le carburant et la configuration. Pour marge de sécurité, Dans ce module, une erreur sur « marge de sécurité » peut faire accepter une structure qui entre en résonance, plastifie ou rompt avant la charge prévue. Le garde-fou principal est: Une marge positive sur un calcul statique ne couvre pas automatiquement fatigue, flambement, chocs ou défauts de fabrication.

Mini-leçons quantitatives canoniques

Ce bloc constitue la référence quantitative du module; les valeurs d'exercice sont pédagogiques et ne doivent pas être confondues avec des données de mission.

Contrainte normale moyenne

$$\sigma = F / A$$

- 1 — Question concrète
Que permet de calculer « $\sigma = F / A$ » dans « Contrainte normale moyenne » ?
- 2 — Intuition sans symboles
La contrainte moyenne répartit une force sur l'aire qui la transmet.
- 3 — Grandeurs
 σ : contrainte moyenne; F: force normale; A: aire résistante
- 4 — Formule
 $\sigma = F / A$
- 5 — Lecture
Lire « $\sigma = F / A$ » en nommant chaque opération et chaque indice.
- 6 — Symboles et sens
 σ : contrainte moyenne; F: force normale; A: aire résistante
- 7 — Prononciation
Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.
- 8 — Unités
 σ en Pa; F en N; A en m^2
- 9 — Convention
Conserver le même repère, la même base de temps, la même frontière de système et la même convention de signe pendant toute la substitution.
- 10 — Pourquoi cette opération
La division compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.
- 11 — Hypothèses
Les deux quantités doivent appartenir au même périmètre et à la même période.
- 12 — Contrôle d'unités
 σ en Pa; F en N; A en m^2 Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.
- 13 — Cas numérique
Avec $F=18\,000\text{ N}$ et $A=1,20\times 10^{-4}\text{ m}^2$, $\sigma=150\text{ MPa}$.
- 14 — Pourquoi le calcul fonctionne
La division compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.
- 15 — Contrôle indépendant
Multiplier le résultat par le dénominateur doit restituer le numérateur.
- 16 — Estimation mentale
Avant calcul, comparer mentalement le numérateur au dénominateur pour savoir si le résultat doit être inférieur, proche ou supérieur à un.
- 17 — Interprétation
La contrainte locale peut être plus élevée près des trous, congés, soudures ou entailles.
- 18 — Ce que le résultat ne prouve pas
Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.
- 19 — Sensibilité
Le résultat augmente si le numérateur augmente et diminue si le dénominateur augmente, toutes choses égales par ailleurs.
- 20 — Exercices guidé et autonome
Exercice guidé. $F=10\,000\text{ N}$, $A=2,0\times 10^{-4}\text{ m}^2$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$F=10\,000\text{ N}$, $A=2,0\times 10^{-4}\text{ m}^2$. $\sigma=50\text{ MPa}$.

Exercice autonome. $F=25\,000\text{ N}$, $A=5,0\times 10^{-4}\text{ m}^2$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$F=25\,000\text{ N}$, $A=5,0\times 10^{-4}\text{ m}^2$. $\sigma=50\text{ MPa}$.

- 21 — Décision mission

Déformation unitaire

$\epsilon = \Delta L / L$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\epsilon = \Delta L / L$ » dans « Déformation unitaire » ?

2 — Intuition sans symboles

La déformation mesure le changement de longueur relativement à la longueur initiale.

3 — Grandeurs

ϵ : déformation; ΔL : variation de longueur; L : longueur de référence

4 — Formule

$\epsilon = \Delta L / L$

5 — Lecture

Lire « $\epsilon = \Delta L / L$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

ϵ : déformation; ΔL : variation de longueur; L : longueur de référence

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

ϵ sans dimension; ΔL et L dans la même unité

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La division compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.

11 — Hypothèses

Les deux quantités doivent appartenir au même périmètre et à la même période.

12 — Contrôle d'unités

ϵ sans dimension; ΔL et L dans la même unité Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $\Delta L=0,6$ mm et $L=600$ mm, $\epsilon=0,001 = 0,1$ %.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La division compare une quantité à une référence homogène et produit un indicateur de proportion.

15 — Contrôle indépendant

Multiplier le résultat par le dénominateur doit restituer le numérateur.

16 — Estimation mentale

Avant calcul, comparer mentalement le numérateur au dénominateur pour savoir si le résultat doit être inférieur, proche ou supérieur à un.

17 — Interprétation

Une petite déformation globale n'exclut pas des concentrations locales ou une plasticité ponctuelle.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Le résultat augmente si le numérateur augmente et diminue si le dénominateur augmente, toutes choses égales par ailleurs.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $\Delta L=0,2$ mm, $L=200$ mm.

$\Delta L = 0,2 \text{ mm}$, $L = 200 \text{ mm}$. $\epsilon = 0,001$.

Exercice autonome. $\Delta L = 1,5 \text{ mm}$, $L = 1000 \text{ mm}$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$\Delta L = 1,5 \text{ mm}$, $L = 1000 \text{ mm}$. $\epsilon = 0,0015$.

21 — Décision mission

Comparer aux limites de déformation admissibles et au domaine élastique du matériau.

Loi élastique linéaire

$\sigma = E \times \epsilon$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\sigma = E \times \epsilon$ » dans « Loi élastique linéaire » ?

2 — Intuition sans symboles

Dans le domaine élastique linéaire, contrainte et déformation sont proportionnelles.

3 — Grandeurs

σ : contrainte; E : module d'Young; ϵ : déformation

4 — Formule

$\sigma = E \times \epsilon$

5 — Lecture

Lire « $\sigma = E \times \epsilon$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

σ : contrainte; E : module d'Young; ϵ : déformation

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

σ et E en Pa; ϵ sans dimension

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

11 — Hypothèses

Les facteurs doivent décrire le même scénario et leurs unités doivent être compatibles.

12 — Contrôle d'unités

σ et E en Pa; ϵ sans dimension Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $E = 70 \text{ GPa}$ et $\epsilon = 0,001$, $\sigma = 70 \text{ MPa}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La multiplication transforme un taux ou une grandeur spécifique en quantité totale sur l'intervalle ou la population considérée.

15 — Contrôle indépendant

Diviser le résultat par un facteur non nul doit retrouver l'autre facteur.

16 — Estimation mentale

Estimer séparément l'ordre de grandeur de chaque facteur permet de prévoir celui du produit.

17 — Interprétation

La relation ne s'applique pas au-delà du domaine linéaire ou si le matériau est anisotrope sans modèle adapté.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

À facteurs indépendants, une variation relative d'un facteur se transmet directement au produit.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $E=200 \text{ GPa}$, $\epsilon=0,0005$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$E=200 \text{ GPa}$, $\epsilon=0,0005$. $\sigma=100 \text{ MPa}$.

Exercice autonome. $E=110 \text{ GPa}$, $\epsilon=0,002$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$E=110 \text{ GPa}$, $\epsilon=0,002$. $\sigma=220 \text{ MPa}$.

21 — Décision mission

Vérifier que le point de fonctionnement reste dans le domaine de matériau qualifié.

Contrainte de flexion

$\sigma_{\text{bend}} = M \times y / I$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $\sigma_{\text{bend}} = M \times y / I$ » dans « Contrainte de flexion » ?

2 — Intuition sans symboles

La flexion crée une contrainte qui augmente avec le moment et la distance à l'axe neutre.

3 — Grandeurs

σ_{bend} : contrainte de flexion; M : moment fléchissant; y : distance à la fibre neutre; I : moment quadratique

4 — Formule

$\sigma_{\text{bend}} = M \times y / I$

5 — Lecture

Lire « $\sigma_{\text{bend}} = M \times y / I$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

σ_{bend} : contrainte de flexion; M : moment fléchissant; y : distance à la fibre neutre; I : moment quadratique

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

σ_{bend} en Pa; M en N·m; y en m; I en m⁴

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

11 — Hypothèses

Les entrées doivent provenir du même scénario, avec unités, signes et conventions explicitement alignés.

12 — Contrôle d'unités

σ_{bend} en Pa; M en N·m; y en m; I en m⁴ Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $M=5\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, $y=0,05\text{ m}$ et $I=2,5\times 10^{-5}\text{ m}^4$, $\sigma_{\text{bend}}=10\text{ MPa}$.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

15 — Contrôle indépendant

Recalculer par la relation inverse ou par une seconde méthode doit retrouver le même ordre de grandeur.

16 — Estimation mentale

Un ordre de grandeur estimé avant la calculatrice permet de détecter les erreurs de facteur, de signe ou d'unité.

17 — Interprétation

La formule suppose une poutre et un régime de flexion compatibles avec les hypothèses de la théorie utilisée.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Faire varier une entrée à la fois permet d'identifier la variable qui pilote le plus la décision.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $M=8\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, $y=0,04\text{ m}$, $I=4,0\times 10^{-5}\text{ m}^4$.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$M=8\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, $y=0,04\text{ m}$, $I=4,0\times 10^{-5}\text{ m}^4$. $\sigma_{\text{bend}}=8\text{ MPa}$.

Exercice autonome. $M=3\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, $y=0,03\text{ m}$, $I=1,5\times 10^{-5}\text{ m}^4$.

Correction autonome — ouvrir après essai

$M=3\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, $y=0,03\text{ m}$, $I=1,5\times 10^{-5}\text{ m}^4$. $\sigma_{\text{bend}}=6\text{ MPa}$.

21 — Décision mission

Employer une analyse éléments finis ou une théorie plus complète lorsque géométrie, charge ou matériau sortent de ce cadre.

Charge critique de flambage d'Euler

$$P_{\text{cr}} = \pi^2 \times E \times I / (K \times L)^2$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $P_{\text{cr}} = \pi^2 \times E \times I / (K \times L)^2$ » dans « Charge critique de flambage d'Euler » ?

2 — Intuition sans symboles

Une colonne élancée peut perdre sa stabilité bien avant d'atteindre une limite de compression matière.

3 — Grandeurs

P_{cr} : charge critique; E : module d'Young; I : moment quadratique; K : facteur de longueur efficace; L : longueur

4 — Formule

$$P_{\text{cr}} = \pi^2 \times E \times I / (K \times L)^2$$

5 — Lecture

Lire « $P_{\text{cr}} = \pi^2 \times E \times I / (K \times L)^2$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

P_{cr} : charge critique; E : module d'Young; I : moment quadratique; K : facteur de longueur efficace; L : longueur

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

P_{cr} en N; E en Pa; I en m^4 ; K sans dimension; L en m

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

11 — Hypothèses

Les entrées doivent provenir du même scénario, avec unités, signes et conventions explicitement alignés.

12 — Contrôle d'unités

P_{cr} en N; E en Pa; I en m^4 ; K sans dimension; L en m. Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $E=70$ GPa, $I=1,0 \times 10^{-6} m^4$, $K=1$ et $L=2$ m, $P_{cr} \approx 172,7$ kN.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La relation met en équation le mécanisme quantitatif décrit par la mini-leçon et permet de vérifier le raisonnement par substitution numérique.

15 — Contrôle indépendant

Recalculer par la relation inverse ou par une seconde méthode doit retrouver le même ordre de grandeur.

16 — Estimation mentale

Un ordre de grandeur estimé avant la calculatrice permet de détecter les erreurs de facteur, de signe ou d'unité.

17 — Interprétation

Les imperfections, excentricités et conditions d'appui réelles réduisent souvent la charge critique pratique.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

Faire varier une entrée à la fois permet d'identifier la variable qui pilote le plus la décision.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $E=200$ GPa, $I=2,0 \times 10^{-6}$, $K=1$, $L=3$ m.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$E=200$ GPa, $I=2,0 \times 10^{-6}$, $K=1$, $L=3$ m. $P_{cr} \approx 438,6$ kN.

Exercice autonome. $E=70$ GPa, $I=0,5 \times 10^{-6}$, $K=1$, $L=1,5$ m.

Correction autonome — ouvrir après essai

$E=70$ GPa, $I=0,5 \times 10^{-6}$, $K=1$, $L=1,5$ m. $P_{cr} \approx 153,5$ kN.

21 — Décision mission

Conserver une marge qualifiée vis-à-vis du flambage avec imperfections et cas de charge enveloppes.

Fréquence propre masse-ressort

$$f_n = (1/(2 \times \pi)) \times \sqrt{k/m}$$

1 — Question concrète

Que permet de calculer « $f_n = (1/(2 \times \pi)) \times \sqrt{k/m}$ » dans « Fréquence propre masse-ressort » ?

2 — Intuition sans symboles

Une structure plus raide vibre naturellement plus vite, tandis qu'une masse plus grande abaisse la fréquence propre.

3 — Grandeurs

f_n : fréquence propre; k : raideur modale; m : masse modale

4 — Formule

$$f_n = (1/(2 \times \pi)) \times \sqrt{k/m}$$

5 — Lecture

Lire « $f_n = (1/(2 \times \pi)) \times \sqrt{k/m}$ » en nommant chaque opération et chaque indice.

6 — Symboles et sens

f_n : fréquence propre; k : raideur modale; m : masse modale

7 — Prononciation

Dire explicitement les indices, puissances, lettres grecques et parenthèses afin de reconstruire la relation sans voir la page.

8 — Unités

f_n en Hz; k en N/m; m en kg

9 — Convention

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

10 — Pourquoi cette opération

La racine de la somme des carrés combine des contributions indépendantes sans supposer qu'elles s'ajoutent toutes dans le même sens.

11 — Hypothèses

Les contributions doivent être indépendantes ou suffisamment décorrélées pour justifier cette combinaison.

12 — Contrôle d'unités

f_n en Hz; k en N/m; m en kg Vérifier que la simplification dimensionnelle conduit bien à l'unité de la grandeur recherchée.

13 — Cas numérique

Avec $k=100\,000$ N/m et $m=10$ kg, $f_n \approx 15,92$ Hz.

14 — Pourquoi le calcul fonctionne

La racine de la somme des carrés combine des contributions indépendantes sans supposer qu'elles s'ajoutent toutes dans le même sens.

15 — Contrôle indépendant

Le carré du résultat doit être égal à la somme des carrés des contributions.

16 — Estimation mentale

Le résultat doit être au moins aussi grand que la contribution dominante et inférieur à leur somme arithmétique.

17 — Interprétation

Un vrai véhicule possède de nombreux modes couplés, amortis et sensibles aux conditions aux limites.

18 — Ce que le résultat ne prouve pas

Le calcul ne prouve ni que les entrées sont justes ni que le modèle reste valide hors du scénario déclaré; ces deux questions doivent être vérifiées séparément.

19 — Sensibilité

La contribution la plus grande influence davantage le résultat à cause du carré.

20 — Exercices guidé et autonome

Exercice guidé. $k=40\,000$ N/m, $m=10$ kg.

Correction guidée détaillée — ouvrir après essai

$k=40\,000$ N/m, $m=10$ kg. $f_n \approx 10,07$ Hz.

Exercice autonome. $k=90\,000$ N/m, $m=25$ kg.

Correction autonome — ouvrir après essai

$k=90\,000$ N/m, $m=25$ kg. $f_n \approx 9,55$ Hz.

21 — Décision mission

Écarter les excitations et bandes de contrôle des modes critiques identifiés par analyse et essai.

Progression de maîtrise

1. contrainte mécanique: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
2. déformation: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
3. fréquence propre: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
4. marge de sécurité: appliquez le contrôle concret de sa fiche.
5. Synthèse de « Structures, matériaux & vibrations »: confrontez « contrainte mécanique » à « déformation »; choisissez le contrôle prioritaire.

Vérification de maîtrise

Validation 19 — contrainte mécanique, déformation, fréquence propre, marge de sécurité. Pour chaque notion: un indice et un contrôle.

Objectifs de maîtrise

- Distinguer les observations, les hypothèses et les inconnues lorsqu'on étudie « Comprendre avant de calculer ».
- Quantifier au moins une grandeur nécessaire à « contrainte mécanique » sans masquer les conversions.
- Expliquer ce qui invaliderait le raisonnement retenu pour « déformation ».
- Relier « fréquence propre » aux contraintes concrètes du module 19.

1. Forces, moments et chemins de charge

Une force tend à accélérer une masse; un moment tend à la faire tourner. Dans une structure, ces actions se transmettent par des chemins de charge. Un support peut sembler peu sollicité localement mais devenir critique s'il concentre l'effort d'un panneau entier. Dessiner le chemin de charge depuis la source jusqu'aux interfaces est souvent plus instructif qu'un modèle complexe mal compris.

2. Contrainte, déformation et module d'Young

La contrainte normale $\sigma = F/A$ relie force et section. La déformation ε mesure l'allongement relatif. Dans le domaine élastique linéaire, $\sigma = E\varepsilon$, où E est le module d'Young. Cette loi ne dit pas qu'une pièce est sûre: il faut encore vérifier concentrations de contrainte, limites du matériau, température, fabrication et nombre de cycles.

Approfondissement — Concentrations de contraintes: la pièce casse rarement au milieu d'une zone parfaite

La contrainte moyenne d'une barre est facile à calculer, mais une vraie structure possède trous, filetages, soudures, changements d'épaisseur et rayons de raccordement. Ces détails concentrent les efforts. On représente souvent l'effet par K_t , où K_t est le facteur de concentration de contraintes: la contrainte locale maximale vaut approximativement K_t multiplié par la contrainte nominale. Si la contrainte nominale vaut 80 MPa et $K_t = 2,4$, la zone critique peut atteindre 192 MPa avant même d'ajouter les incertitudes de fabrication.

Sur un habitat pressurisé, une trappe, une fenêtre ou un passage de câble devient donc une question structurelle à part entière. Le calcul global peut annoncer une marge confortable et cacher un point chaud local. Les analyses par éléments finis servent à identifier ces zones, mais elles doivent être confrontées à la géométrie réellement fabriquée: défaut de soudure, rayon plus faible, rayure, [porosité](#). La règle de conception est simple: le chemin des efforts doit rester lisible et les discontinuités doivent être inspectables.

3. Flexion, torsion et flambage

Une poutre peut rompre en traction, mais une pièce élancée en compression peut perdre sa stabilité par [flambage](#) bien avant d'atteindre la résistance du matériau. La torsion sollicite différemment les sections et les assemblages. Les modes de

panne dépendent donc de la géométrie autant que du matériau. Une grande résistance nominale n'empêche pas une instabilité géométrique.

4. Fatigue: des charges modestes répétées peuvent tuer une pièce

La **fatigue** résulte de cycles de charge. Un niveau inférieur à la résistance ultime peut néanmoins initier une fissure puis la faire croître sur des milliers de cycles. Les mécanismes de déploiement, roues, pompes et structures soumises aux cycles thermiques sont concernés. Le spectre réel des charges compte davantage qu'une valeur maximale isolée.

Approfondissement — Fatigue et spectres de charge: survivre à dix mille petits événements

Une pièce peut rester très loin de sa résistance ultime et casser malgré tout après de nombreux cycles. La fatigue dépend de l'amplitude de contrainte, du nombre de cycles, de la géométrie, du matériau et de l'environnement. Une structure de rover subit vibrations de lancement, déploiement, roulage, variations thermiques et chocs. Un habitat subit des cycles de **pression** et de température. On représente souvent la durée avec une courbe S–N: S désigne l'amplitude de contrainte et N le nombre de cycles supportés avant rupture dans les conditions de l'essai.

Le piège est de vérifier uniquement le « pire cas » unique. Dix mille cycles à faible amplitude peuvent être plus dommageables qu'un événement exceptionnel. La règle de Miner offre une approximation simple de dommage cumulatif: $D = \sum (n_i/N_i)$, où n_i est le nombre de cycles réellement subis au niveau i , N_i le nombre de cycles à rupture estimé à ce niveau, Σ le symbole de somme et D le dommage cumulé. D proche de 1 indique que la durée de fatigue calculée est consommée. Ce modèle est imparfait, mais il impose la bonne question: combien de fois la mission fera-t-elle réellement cela?

5. Rupture et tolérance aux dommages

La mécanique de la rupture étudie comment une fissure concentre les contraintes. Une approche tolérante aux dommages suppose qu'un défaut peut exister puis demande s'il restera détectable et suffisamment lent avant de devenir critique. Cela change la philosophie de **maintenance**: inspection, taille de défaut admissible et intervalle de contrôle deviennent des paramètres de conception.

6. Vibrations, modes propres et résonance

Toute structure flexible possède des fréquences propres. Si une excitation périodique s'en approche, la réponse peut être fortement amplifiée. Au lancement, vibrations aléatoires, acoustique et chocs pyrotechniques peuvent charger des équipements fragiles. En opération, roues à réaction, pompes ou mécanismes créent aussi des excitations. On cherche à séparer fréquences, amortir et qualifier.

Approfondissement — Vibrations couplées au contrôle: une structure flexible peut perturber le logiciel qui la pilote

Un véhicule spatial n'est jamais parfaitement rigide. Panneaux solaires, antennes, mâts et grands réservoirs possèdent des modes propres. Si une commande d'attitude excite l'un de ces modes, la structure oscille; le capteur mesure cette oscillation; le contrôleur peut tenter de la corriger et l'amplifier involontairement. On parle alors de couplage structure–contrôle. La fréquence propre f_n , où f représente une fréquence et l'indice n le mode considéré, doit être comparée à la **bande passante** de la boucle de contrôle.

La solution n'est pas seulement de « rendre la structure plus solide ». Ajouter de la rigidité augmente la masse. On peut déplacer une fréquence propre, filtrer un signal, limiter la vitesse d'un **actionneur** ou modifier la loi de contrôle. C'est un exemple parfait d'**ingénierie système**: l'optimum local du structuraliste peut être mauvais pour le contrôle, et inversement. Sur une grande installation martienne, les mêmes questions apparaîtront avec bras robotisés, grues, centrifugeuses, pompes et structures pressurisées légères.

7. Matériaux: masse, rigidité, température et environnement

Aluminium, titane, aciers, composites et [polymères](#) offrent des compromis différents. Le meilleur matériau sur Terre n'est pas automatiquement le meilleur pour Mars ou le vide: dégazage, rayonnement, poussière, températures, compatibilité chimique et réparabilité peuvent dominer. Le choix doit partir de la fonction et de l'environnement, pas d'un classement abstrait de résistance.

8. Qualification et preuve: analyse, essai et marge

Une structure de vol doit être justifiée par analyses et essais adaptés. Les modèles prédisent contraintes, déplacements et modes; les essais de vibration ou de charge révèlent imperfections et interfaces réelles. Une marge positive n'est crédible que si la charge, la résistance admissible et les facteurs appliqués sont clairement définis.

Exemple calculé pas à pas

La méthode de travail est toujours la même: écrire ce que représente chaque symbole, convertir toutes les unités vers un système cohérent, effectuer l'opération, puis traduire le résultat en phrase — « Approfondissement — Vibrations couplées au contrôle ». Enfin, faire un contrôle [d'ordre de grandeur](#). Pour « Approfondissement — Vibrations couplées au contrôle », si le résultat change de facteur mille lorsqu'on passe de millimètres à mètres, la conversion doit être visible dans le calcul.

Exercice progressif

1. Choisissez un cas élémentaire de « contrainte mécanique », puis dressez les données utiles à « Structures, matériaux & vibrations », leur origine et leurs unités avant de calculer.
2. Calculer le résultat nominal sans marge.
3. Modifier le paramètre le plus incertain de $\pm 20\%$ et comparer — « Approfondissement — Vibrations couplées au contrôle ».
4. Ajouter une panne crédible et expliquer quel indicateur permet de la détecter — « Approfondissement — Vibrations couplées au contrôle ».
5. Décider si le système continue, se dégrade ou doit s'arrêter — « Approfondissement — Vibrations couplées au contrôle ».

Solution raisonnée

Pour « Structures, matériaux & vibrations », le résultat final doit être accompagné de son unité, de l'hypothèse qui le domine et de ce qu'il change pour « contrainte mécanique ». Elle montre les conversions, la logique de la formule, la sensibilité et la décision — module 19 · Solution raisonnée. Si deux hypothèses différentes conduisent à la même décision opérationnelle, la conception est relativement robuste à cette [incertitude](#). Dans le corrigé de « Structures, matériaux & vibrations », une variation capable d'inverser la conclusion sur « contrainte mécanique » devient une priorité de mesure ou de marge.

Mini-projet de validation

Construisez un dossier de [validation](#) consacré à « Structures, matériaux & vibrations »: il doit rendre vérifiable au moins un choix concernant « contrainte mécanique » et expliciter le cas qui ferait rejeter ce choix. Présentez « Structures, matériaux & vibrations » comme une revue technique: une page pour le besoin, une pour Comprendre avant de calculer, une pour le scénario contrainte mécanique, puis une conclusion explicitant ce que déformation autorise réellement. Le mini-projet sur « Structures, matériaux & vibrations » est recevable si un autre équipier peut reproduire la vérification de « contrainte mécanique » et retrouver la même décision à partir des mêmes données.

Erreurs classiques à détecter

- Attribuer une cause à « contrainte mécanique » sans vérifier un indice indépendant du même phénomène.
- Utiliser une valeur de « contrainte mécanique » sans indiquer son unité, son origine ou sa plage de validité.
- Conclure sur « déformation » à partir du cas nominal alors qu'un état dégradé change la décision.
- Dans « Structures, matériaux & vibrations », ne laissez jamais une précision numérique masquer l'hypothèse qui commande réellement le résultat.

Sources primaires et passerelles

- [NASA — Small Spacecraft Structures, Materials and Mechanisms](#)
- [NASA Standards — Materials and Processes](#)

Repères lexicaux du module. état dégradé

- www.nasa.gov — documentation institutionnelle
- standards.nasa.gov — documentation institutionnelle
- [Space Academy](#) — parcours complet

Matrice de parité FR ↔ EN

FR	EN
Contrainte normale moyenne	Average normal stress
Déformation unitaire	Normal strain
Loi élastique linéaire	Linear elastic law
Contrainte de flexion	Bending stress
Charge critique de flambage d'Euler	Euler critical buckling load
Fréquence propre masse-ressort	Natural frequency of a mass-spring mode

Termes de la progression. fréquence