



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**



enim
École Nationale
d'Ingénieurs de Metz

Choix des matériaux

ENIM – 3A

Travaux Dirigés

Prof. Antoine GUITTON

antoine.guitton@univ-lorraine.fr

Version : mars, 2026

Exercice I Questions sur le cours

Répondez à chacune des affirmations suivantes par **Vrai** ou **Faux**. Ces questions vous permettent de vérifier votre compréhension du cours avant d'aborder les exercices.

1. La sélection des matériaux est devenue plus importante avec l'émergence des matériaux avancés depuis les années 1960.

☐ Vrai

☐ Faux

2. Les matériaux métalliques sont principalement caractérisés par des liaisons covalentes.

☐ Vrai

☐ Faux

3. Les polymères sont généralement plus rigides et plus résistants que les métaux.

☐ Vrai

☐ Faux

4. Les céramiques sont des matériaux durs, fragiles et résistants aux hautes températures.

☐ Vrai

☐ Faux

5. Un composite combine plusieurs phases distinctes pour obtenir de meilleures propriétés.

☐ Vrai

☐ Faux

6. Les mousses sont lourdes et utilisées pour leur rigidité.

☐ Vrai

☐ Faux

7. L'étape 1 de la méthode d'Ashby consiste à définir le besoin fonctionnel.

☐ Vrai

☐ Faux

8. Les contraintes sont des propriétés que l'on cherche à optimiser (masse, coût, etc.).

☐ Vrai

☐ Faux

9. Les filtres de seuil sont utilisés à l'étape de tri pour éliminer les matériaux non conformes.

☐ Vrai

☐ Faux

10. Le module d'élasticité est généralement plus faible chez les métaux que chez les polymères.

☐ Vrai

☐ Faux

11. La limite d'élasticité correspond au début de la déformation plastique.

☐ Vrai

☐ Faux

12. L'unité de la limite d'élasticité est le pourcentage (%).

☐ Vrai

☐ Faux

13. La résistance à la traction est la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant rupture.

☐ Vrai

☐ Faux

14. Un matériau présentant une élongation à la rupture élevée est considéré comme fragile.

☐ Vrai

☐ Faux

15. Le comportement ductile permet d'absorber de l'énergie avant la rupture.

☐ Vrai

☐ Faux

16. La microstructure d'un matériau n'a pas d'impact sur ses propriétés mécaniques.

☐ Vrai

☐ Faux

17. La taille des grains influence la résistance d'un matériau via la relation de Hall-Petch.

☐ Vrai

☐ Faux

18. La trempe est un exemple de traitement thermique modifiant la microstructure.

☐ Vrai

☐ Faux

19. Le formage à froid améliore la ductilité d'un matériau.

☐ Vrai

☐ Faux

20. L'analyse du cycle de vie évalue uniquement les performances mécaniques d'un matériau.

☐ Vrai

☐ Faux

21. Le coût environnemental fait partie des critères de sélection d'un matériau.

☐ Vrai

☐ Faux

22. L'aluminium a une densité plus faible que l'acier.

☐ Vrai

☐ Faux

23. L'objectif de l'étape 5 de la méthode d'Ashby est de raffiner et valider le choix final.

☐ Vrai

☐ Faux

24. La compatibilité avec les autres composants est un critère de validation finale.

☐ Vrai

☐ Faux

25. Le vieillissement structural est négligeable pour les polymères.

☐ Vrai

☐ Faux

26. Les ingénieurs disposent d'une base de données contenant environ 100 matériaux seulement.

☐ Vrai

☐ Faux

27. La méthode d'Ashby permet une sélection systématique et graphique des matériaux.

☐ Vrai

☐ Faux

28. Une contrainte importante ne peut jamais être contournée.

☐ Vrai

☐ Faux

29. La masse volumique et la résistance sont les deux grandeurs portées en axes dans un diagramme d'Ashby.

☐ Vrai

☐ Faux

30. Le recyclage n'est pas un critère pertinent dans le choix d'un matériau.

☐ Vrai

☐ Faux

Exercice II Bras de drone pliable

Vous travaillez pour une start-up développant un drone quadrirotor destiné à la livraison de petits colis en milieu urbain. Pour maximiser l'autonomie du drone, il est essentiel de réduire la masse de sa structure tout en garantissant une rigidité suffisante, afin d'éviter des déformations susceptibles de perturber le vol.

Chaque bras du drone est modélisé comme une poutre encastrée à une extrémité et libre à l'autre, soumise à une force concentrée en son extrémité libre (représentant le poids du moteur et de l'hélice). Le bras est caractérisé par son module de Young E .

Données :

- Force appliquée à l'extrémité libre : $F = 4.9 \text{ N}$.
- Flèche maximale admissible : $\delta_m = 2 \text{ mm}$.
- Longueur du bras : $L = 300 \text{ mm}$.
- Section carrée de côté $h = 6.5 \text{ mm}$ (imposée par la conception).

II.1 Étude mécanique du bras

1. Déterminer l'expression du moment quadratique I_{Gz} d'une section carrée de côté h .
2. Établir l'expression du moment fléchissant M_{fz} en fonction de la position le long du bras.
3. En déduire l'expression de la flèche maximale δ_m en fonction de F , L , E et I_{Gz} .

4. Exprimer la masse minimale du bras en fonction des paramètres L , F , δ_m , ρ et E .
5. Identifier l'indice de performance M à maximiser pour minimiser la masse à flèche imposée.
6. Interpréter physiquement le rôle du module de Young E et de la masse volumique ρ . Pourquoi recherche-t-on un matériau rigide et léger à la fois ?

II.2 Sélection des matériaux

Le tableau 1 regroupe les propriétés mécaniques de quatre matériaux candidats.

Matériau	Module de Young (GPa)	Masse volumique (kg m^{-3})
Aluminium 7075-T6	72	2800
Acier inoxydable 304	193	8000
Titane Grade 5	114	4500
Composite carbone/polymère	70	1600

TABLE 1 – Propriétés mécaniques des matériaux candidats.

7. À partir de l'indice identifié à la question 5, classer les matériaux du plus performant au moins adapté.
8. Quel matériau choisiriez-vous pour la fabrication du bras ? Justifiez techniquement votre réponse.
9. Comment l'indice de performance M serait-il modifié si la section du bras n'était plus imposée, mais librement optimisable ? Proposez brièvement une démarche.
10. Si l'on souhaite rendre le bras pliable (articulé en son milieu), quelles contraintes supplémentaires faudrait-il prendre en compte dans le choix du matériau ou du design ? Répondez qualitativement.

Exercice III Châssis de trottinette partagée : intégration du cycle de vie

Vous travaillez pour une entreprise développant une nouvelle génération de trottinettes électriques en libre-service pour usage urbain intensif. L'objectif est de concevoir un châssis robuste, léger et durable, tout en minimisant son impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie.

Le châssis est modélisé comme une poutre encastree-appuyée, soumise à une charge répartie représentant le poids de l'utilisateur. Il doit résister à la flexion avec une flèche maximale admissible de $\delta_m = 3 \text{ mm}$.

Le choix du matériau doit optimiser le compromis entre performance mécanique, masse et impact environnemental, en intégrant les trois phases suivantes :

- fabrication (énergie grise),
- usage (consommation énergétique liée à la masse transportée),
- fin de vie (recyclabilité).

III.1 Données techniques

- Longueur du châssis : $L = 800 \text{ mm}$.
- Charge répartie équivalente : $q = 100 \text{ N m}^{-1}$.
- Flèche maximale admissible : $\delta_m = 3 \text{ mm}$.
- Section rectangulaire imposée : $b = 40 \text{ mm}$, $h = 25 \text{ mm}$.
- Durée de vie prévue : 2000 trajets.

III.2 Propriétés des matériaux candidats

Matériau	E (GPa)	ρ (kg m^{-3})	Énergie grise (MJ kg^{-1})	Recyclabilité (%)
Aluminium 6061	69	2700	200	95
Acier doux	210	7800	35	85
Composite verre/polymère	25	1800	100	10
Composite carbone/polymère	70	1600	800	5

TABLE 2 – Propriétés mécaniques et environnementales des matériaux candidats.

III.3 Questions

1. Établir l'expression de la flèche maximale d'une poutre encastree-appuyée soumise à une charge répartie uniforme.
2. Vérifier que tous les matériaux respectent la contrainte de flèche. Vous exprimerez le critère en fonction de E uniquement (les autres paramètres géométriques étant fixés).

3. Calculer la masse du châssis pour chaque matériau.
4. Estimer l'énergie supplémentaire consommée par le transport de la masse du châssis sur 2000 trajets, en supposant une consommation additionnelle de 0.02 J par kg et par mètre parcouru, pour des trajets de 2 km.
5. Calculer l'énergie grise totale sur le cycle de vie (fabrication + usage) pour chaque matériau.
6. Proposer un indicateur environnemental global I_{env} à minimiser, combinant énergie grise totale et recyclabilité. Justifiez votre choix.
7. Classer les matériaux selon I_{env} .
8. En tenant compte des performances mécaniques, de l'impact environnemental et de la recyclabilité, quel matériau recommanderiez-vous pour le châssis ? Justifiez votre réponse.

Exercice IV Poutre rigide à coût minimal

Vous travaillez pour une entreprise développant une structure pliable soumise à des contraintes mécaniques modérées. L'objectif est de minimiser le coût global de fabrication tout en garantissant une rigidité suffisante.

L'élément structurel étudié est une poutre soumise à de la flexion simple. La forme géométrique est fixée, mais la section peut être redimensionnée pour satisfaire la contrainte de flèche maximale admissible. La section n'est donc pas imposée : c'est précisément ce degré de liberté qui permet d'exprimer un indice de performance pertinent.

Chaque matériau est caractérisé par :

- son module de Young E (en GPa),
- sa masse volumique ρ (en kg m^{-3}),
- son coût massique C_m (en €/kg).

Le coût total de la poutre est proportionnel à sa masse :

$$\text{Coût total} = C_m \cdot \rho \cdot V$$

Pour satisfaire la contrainte de flèche imposée, le volume nécessaire dépend du matériau choisi. L'objectif est donc de minimiser le coût total tout en assurant la rigidité

requis.

1. À partir des équations de la flexion et de l'expression du coût, déterminer un indice de performance permettant de comparer les matériaux dans ce contexte.

IV.1 Matériaux candidats

Matériau	E (GPa)	ρ (kg m ⁻³)	C_m (€/kg)
Aluminium 6061	69	2700	3,0
Acier doux	210	7800	0,9
Composite verre/polymère (GFRP)	25	1800	10,0
Composite carbone/polymère (CFRP)	70	1600	45,0
Bois (pin)	11	500	0,6

TABLE 3 – Propriétés mécaniques et économiques des matériaux candidats.

IV.2 Analyse comparative

2. En partant des équations de la flexion d'une poutre à section libre, montrer comment le volume nécessaire (et donc la masse) dépend des propriétés mécaniques du matériau pour garantir une flèche maximale imposée.
3. En déduire une expression simplifiée du coût total en fonction de E , ρ et C_m .
4. Proposer un indice de performance à maximiser pour minimiser le coût tout en assurant la rigidité requise.
5. Calculer cet indice pour chaque matériau du tableau 3 et présenter les résultats dans un tableau récapitulatif.
6. Classer les matériaux du plus performant au moins performant selon cet indice.
7. Quel matériau choisiriez-vous pour minimiser le coût à rigidité imposée ? Justifiez votre réponse.
8. Que se passerait-il si la contrainte de rigidité était supprimée et que seul le coût au kilogramme importait ? Quel matériau deviendrait alors optimal ?
9. Discuter des limites de cet indice. Quels autres critères serait-il utile d'intégrer pour un produit réel (durabilité, résistance aux chocs, recyclabilité, usinabilité, etc.) ?

Exercice V Longeron allégé pour structure aéronautique

Vous travaillez sur un projet visant à alléger la structure d'une aile d'avion en concevant un longeron capable de supporter une charge en flexion tout en minimisant la masse. La géométrie de la section n'est pas imposée : vous avez la liberté de choisir une section optimisée (ouverte ou fermée), à condition de garantir la rigidité requise.

Vous tiendrez également compte de l'influence de la microstructure du matériau (écrouissage, stratification, traitement thermique) sur le module de Young effectif E_{eff} et la tenue en fatigue.

V.1 Données

- Charge concentrée en extrémité libre : $F = 2000 \text{ N}$.
- Longueur du longeron : $L = 1.2 \text{ m}$.
- Flèche maximale admissible : $\delta_{\text{max}} = 4 \text{ mm}$.

V.2 Matériaux candidats

Matériau	E (GPa)	ρ (kg m^{-3})	Microstructure	Coefficient k_{micro}
Aluminium 2024-T6	72	2800	Écroui + traité thermiquement	1,0
Acier HSLA	210	7500	Recuit	0,85
Composite fibres de carbone	70	1600	Stratifié unidirectionnel	1,2
Titane TA6V (traité)	115	4500	Trempé	1,1

TABLE 4 – Propriétés mécaniques et coefficient d'influence microstructurale k_{micro} .

Le coefficient k_{micro} traduit l'effet de l'état microstructural sur le module effectif : $E_{\text{eff}} = k_{\text{micro}} \cdot E$.

V.3 Questions

1. Rappeler l'expression de la flèche maximale d'une poutre encastree-libre sous charge concentrée en extrémité.

2. En déduire l'expression du moment quadratique minimal $I_{\min}$ nécessaire pour respecter $\delta_{\max}$.
 3. Proposer deux géométries de section optimisées :
 - une section creuse circulaire (tube mince),
 - un profilé en I (ailes et âme minces).
- Donner pour chacune le moment quadratique I et le facteur de forme $\phi = I/A$.
4. Justifier pourquoi un facteur de forme élevé permet de minimiser la masse pour une rigidité donnée.
 5. Pour chaque matériau, calculer $E_{\text{eff}} = k_{\text{micro}} \cdot E$, puis l'indice de performance $M = \frac{E_{\text{eff}}^{1/2} \cdot \phi}{\rho}$ pour chaque géométrie.
 6. Classer les couples (matériau, géométrie) selon leur indice de performance M .
 7. Quel couple recommanderiez-vous ? Justifiez en tenant compte de la masse, de la rigidité et de la facilité de fabrication.

Exercice VI Levier de commande industriel : tenue à la rupture

Vous concevez un levier de commande pour un système industriel devant transmettre un effort important sans rupture. Le levier est modélisé comme une poutre encastree-libre soumise à une force ponctuelle en son extrémité. L'objectif est de garantir la tenue mécanique tout en minimisant la masse.

La section est rectangulaire $b \times h$, avec $b = 10 \text{ mm}$ imposé et h ajustable.

VI.1 Modèle mécanique

Le critère dimensionnant est la contrainte maximale dans la section encastree, qui ne doit pas dépasser la contrainte à la rupture du matériau :

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot c}{I} \leq \sigma_{\text{rupture}}$$

où :

- $M_{\max} = F \cdot L$ est le moment fléchissant maximal (section encastree),
- $c = h/2$ est la distance à la fibre neutre,
- $I = \frac{bh^3}{12}$ est le moment quadratique de la section rectangulaire.

VI.2 Données

- Force appliquée en extrémité : $F = 500$ N.
- Longueur du levier : $L = 300$ mm.
- Largeur imposée : $b = 10$ mm.

Matériau	σ_{rupture} (MPa)	ρ (kg m ⁻³)	Usinabilité
Acier doux	370	7800	Moyenne
Aluminium 6061-T6	290	2700	Excellente
Titane TA6V	900	4500	Difficile
Composite verre/polymère	150	1800	Moyenne

TABLE 5 – Propriétés mécaniques et pratiques des matériaux candidats.

VI.3 Questions

1. Exprimer la contrainte maximale $\sigma_{\max}$ en fonction de F , L , b et h .
2. En déduire la hauteur minimale $h_{\min}$ permettant d'éviter la rupture, en fonction de σ_{rupture} .
3. Exprimer la masse du levier m en fonction de $h_{\min}$, b , L et ρ .
4. En regroupant les expressions, identifier l'indice de performance $M = \frac{\sigma_{\text{rupture}}^{1/2}}{\rho}$ à maximiser.
5. Classer les matériaux du plus performant au moins adapté.
6. Quel matériau recommanderiez-vous ? Justifiez en tenant compte de l'indice calculé et de l'usinabilité.

Exercice VII Prothèse fémorale : sélection à l'aide d'une carte d'Ashby

Vous travaillez pour une entreprise biomédicale spécialisée dans les prothèses de hanche. Vous devez sélectionner un matériau pour la tige fémorale, implantée dans le

fémur du patient. Ce composant doit être :

- suffisamment rigide pour supporter les efforts mécaniques sans déformation excessive,
- aussi léger que possible pour limiter la gêne à la marche et les contraintes sur l'os,
- biocompatible : inerte vis-à-vis des tissus, résistant à la corrosion physiologique, sans relargage d'éléments toxiques.

VII.1 Modèle mécanique

La tige est modélisée comme une poutre encastree-libre soumise à une force ponctuelle à son extrémité. On cherche à minimiser la masse pour une raideur donnée (critère de flèche).

VII.2 Données

- Force typique appliquée : $F = 1500 \text{ N}$.
- Longueur de la tige fémorale : $L = 250 \text{ mm}$.
- Flèche maximale admissible : $\delta_{\max} = 1 \text{ mm}$.
- Section imposée : circulaire pleine de diamètre $d = 12 \text{ mm}$.

VII.3 Questions

1. Rappeler l'expression de la flèche maximale d'une poutre encastree-libre sous force ponctuelle en extrémité.
2. En déduire l'expression de la masse minimale en fonction de E , ρ , F , L et $\delta_{\max}$.
3. Identifier l'indice de performance $M = E^{1/2}/\rho$ à maximiser et justifier son sens physique.
4. Sur la carte d'Ashby E vs ρ (figure 1), tracer la droite de pente 2 (en coordonnées log-log) correspondant à un niveau constant de $M = E^{1/2}/\rho$. Rappel : en coordonnées log-log, la condition $E^{1/2}/\rho = \text{cste}$ s'écrit $\log E = 2 \log \rho + \text{cste}$.
5. En utilisant la carte fournie, identifier au moins trois matériaux candidats réalistes.
6. Parmi ces candidats, éliminer les matériaux incompatibles avec un usage biomédical (risque de corrosion, cytotoxicité, absence de bio-inertie avérée).

7. Quel matériau recommandez-vous pour la tige fémorale ? Justifiez votre réponse sur les plans mécanique et biologique.

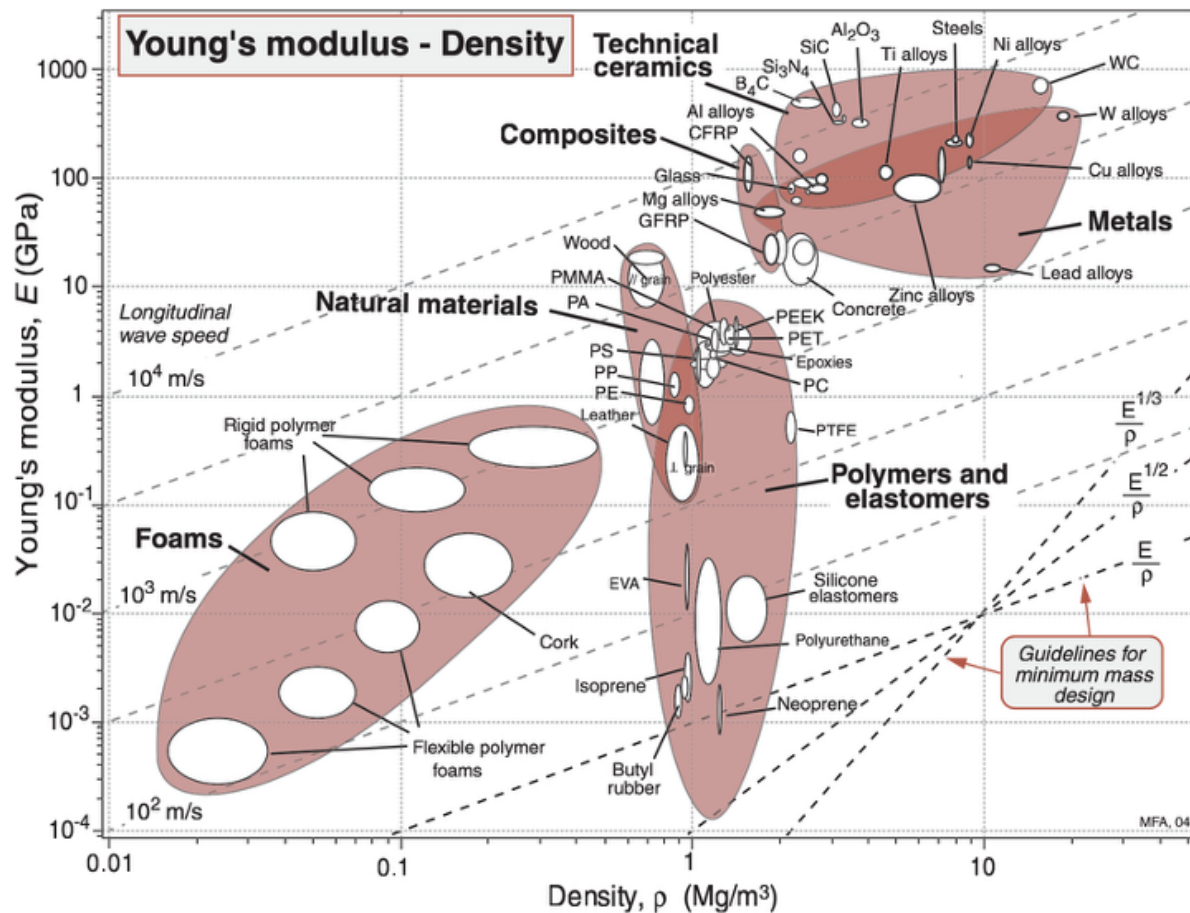


FIGURE 1 – Carte d'Ashby (E vs ρ).