

TP choix de matériaux à l'aide du logiciel CES Edupack

Durant ce TP vous allez réaliser plusieurs exercices de choix de matériaux à l'aide du logiciel CES Edupack, l'objectif de ce TP est de vous apprendre à utiliser le logiciel au niveau 2 et de vous montrer ses fonctionnalités. Pour réaliser ce TP vous avez besoin de vos notes de TD.

Votre compte rendu se fera de manière informatique. N'hésitez pas à utiliser l' « outil capture » pour vos captures d'écran. Pensez à parfaitement détailler vos configurations de logiciel en particulier les limites que vous fixez, les axes des graphiques tracés, les pentes des droites.

Pour finir, CES est un logiciel qui contient énormément d'informations sur les matériaux, les procédés de fabrication. Alors.... SOYEZ CURIEUX !!!!

Exercice 1 : Choix des matériaux pour fabriquer un ressort.

Lors du TD de choix de matériaux, nous avons étudié le choix de matériaux pour un ressort.

Rappel de l'énoncé :

Les ressorts ont pour fonction de stocker et de restituer de façon réversible de l'énergie élastique. Le matériau choisi devra donc permettre au ressort d'emmagasiner une énergie élastique imposée E_{el} sans se déformer de manière permanente. Afin d'assurer une certaine résistance des ressorts aux chocs, les matériaux sélectionnés devront posséder une résilience¹ supérieure à 1 kJ/m². On veillera enfin à maintenir le coût dans des limites raisonnables. L'énergie élastique emmagasinée dans un ressort de volume V soumis à une contrainte σ s'écrit : $E_{el} = AV\sigma^2/(2E)$, où E est le module d'Young du matériau constitutif du ressort, et A est une constante qui dépend de la géométrie du ressort.

Sélectionner des matériaux performants pour la réalisation de ressorts de faible taille (objectif : minimiser le volume) ;
Classer ces matériaux en fonction de leur performance, puis de leur coût.

L'étude en TD a permis de montrer qu'il faut prendre comme indice de performance $I=Re^2/E$ afin de minimiser la masse.

1. Sélectionner les 5 meilleurs matériaux pour un ressort le plus petit possible. Pour cela

- Ouvrir CES niveau 2.
- Déterminer à partir de votre indice de performance les axes du graphique, la pente de la droite choisie et sa position (plus haute ou plus basse). Détailler votre calcul pour déterminer la pente.
- Tracer le diagramme d'Ashby de votre indice de performance (voir exercice 6 de l'aide CES).
- Ajouter un graphique pour restreindre la base de données aux matériaux ayant une bonne résistance aux chocs (résilience¹ $G_c > 1$ kJ/m²) et un coût limité (prix < 10 €/kg). On mettra $x = Cm$ et $y = G_c$. Vous pouvez rentrer une formule sur l'axe y en allant dans « avancé » et vous pouvez sélectionner une zone avec l'outil Box.
- Dans un ressort, l'énergie doit être emmagasinée puis restituée, du coup le matériau doit avoir un très faible coefficient d'amortissement ($\eta < 0,03$). Ajouter une limite

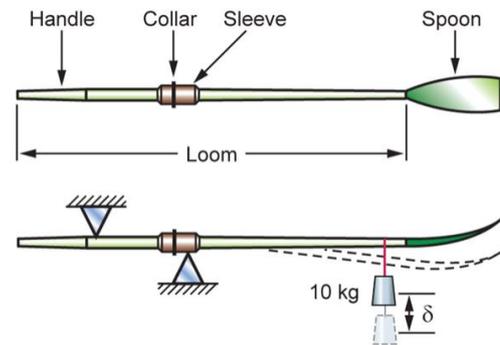
¹ La résilience G_c est liée à la ténacité K_{Ic} et au module d'Young E par la relation $G_c = K_{Ic}^2/E$; dans cette expression, lorsque la ténacité est exprimée en MPa/m^{1/2} et le module d'Young en GPa, la résilience s'exprime en kJ/m².

pour prendre en compte cette nouvelle contrainte mécanique (voir exercice 5 de l'aide CES).

- Lister les 5 meilleurs matériaux, les classer.
 - Faire des captures d'écran des graphiques et limites choisies. Penser à ajouter des légendes à vos graphiques (Il est possible d'afficher le nom des matériaux sur le graphique en cliquant sur les bulles)
2. A quoi correspond le coefficient d'amortissement ? Quelle classe de matériaux est la plus résonante ? la plus amortissante ? Si besoin, se reporter aux indications disponibles dans l'annexe 2.
 3. Une des contraintes supplémentaires est une excellente tenue à la corrosion en eau douce. Dans ce cas-là quel sera le meilleur matériau ?
 4. En cliquant sur un matériau il est possible d'obtenir toutes ses propriétés. Comparer dans un tableau le prix au kg et la limite d'élasticité du meilleur matériau des questions 1 et 3.
 5. Pour des raisons d'esthétique et de prix, le fabricant de ressort décide de recouvrir le ressort d'un revêtement pour le protéger contre la corrosion. CES est aussi une base de données des procédés de fabrication. Pour chacun des procédés suivants :
 - Anodisation
 - Galvanisation à chaud au trempé
 - Enduction avec des poudres de polymèresDire si le revêtement peut être utilisé pour protéger un ressort en acier :
 - sélectionner le menu parcourir, choisir la table « univers des procédés » puis rechercher dans l'arborescence des traitements de surface.
 - vérifier que le revêtement permet de protéger contre la corrosion en milieu aqueux et qu'il s'applique aux matériaux ferreux.Expliquer le principe du procédé qui vous semble le plus adapté à votre problématique.
 6. On souhaite maintenant minimiser la masse du ressort. L'indice de performance devient alors $I = Re^2/(\rho E)$.
 - Tracer un nouveau diagramme en utilisant sur l'axe des abscisses la rigidité spécifique ($x = E/\rho$) et sur les axes des ordonnées la résistance spécifique ($y = Re/\rho$). Préciser la pente de la droite à tracer.
 - Garder les conditions limites ($G_c > 1 \text{ kJ/m}^2$, prix $< 10 \text{ €/kg}$, coefficient d'amortissement $\eta < 0,03$).
 - Identifier et classer alors les 5 meilleurs matériaux.
 7. Conclusion :
 - Quel sera le meilleur matériau pour un ressort le plus petit possible résistant parfaitement à la corrosion ?
 - Quel sera le meilleur matériau pour fabriquer un ressort le plus léger possible ?

Exercice 2 : Rames d'aviron

L'aviron est un sport universitaire typique en Angleterre, mais la recherche de solutions techniques permettant de disposer de rames très performantes a surtout pris son essor à partir de 1900, date à laquelle l'aviron est devenu un sport olympique (voir figure ci-contre).



Du point de vue mécanique, la rame est assimilable à une poutre pleine cylindrique de longueur L sollicitée en flexion. Celle-ci doit avoir une rigidité calibrée (déflexion δ imposée pour une force F exercée par le rameur donnée) de manière à fournir une bonne sensation de rame et être capable de résister aux chocs. Les calculs de RDM ont montré que $F = \frac{\delta E \pi r^4}{4L^3}$ avec E le module de Young et r le rayon de la rame.

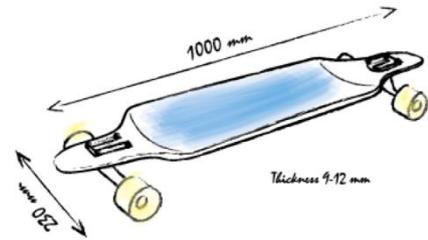
Ces contraintes doivent être remplies avec une masse minimale, de manière à maximiser la vitesse du bateau pour une force de propulsion donnée.

Enfin, même s'il s'agit d'un produit de loisir, le prix doit demeurer dans des limites acceptables. La résistance au choc se traduit par l'exigence d'une valeur minimale de la résilience², que nous choisissons égale à $G_c = 1 \text{ kJ/m}^2$; de même nous imposons que le coût massique du matériau soit inférieur à 100 €/kg , afin de limiter le prix de la rame ; ces critères vont permettre de filtrer les matériaux avant l'étape de classement (pour cela, on pourra utiliser une carte de propriétés représentant la résilience en fonction du prix, sur laquelle on ne sélectionnera que les matériaux de résilience et de prix satisfaisants) ;

1. Rédiger le cahier des charges permettant d'avoir une rame la plus performante (la plus légère possible) : déterminer la fonction, l'objectif et les paramètres du problème.
2. En suivant la démarche présentée en TD, déterminer l'indice de performance I_1 associé à ce problème.
3. A l'aide du logiciel CES, établir une liste de 5 matériaux, compatibles avec les exigences de résilience et de coût maximum, et optimisant l'indice de performance (décrire les différentes étapes de la procédure utilisée) ; classer ces matériaux en fonction de leur performance.
4. Sans détailler la méthode établir l'indice de performance I_2 pour minimiser le coût de la rame. Classez alors les 5 matériaux choisis précédemment en fonction du coût.
5. Quel matériau suggérez-vous d'utiliser, si la priorité est donnée :
 - a. à la performance
 - b. au coût ? Commentez.

Exercice 3 : Choix de matériau pour un longboard.

On souhaite choisir un matériau pour un longboard. On considère le longboard comme une plaque mince de longueur L , largeur b et hauteur h soumis à des efforts de flexion. Le longboard est conçu pour les grandes descentes et courses de slalom mais il est également utilisé pour les simples balades et comme moyen de transport entre autre par certains d'entre vous pour aller à l'IUT. La vitesse du longboard en descente est surtout fonction de son aérodynamisme. Par contre sur le plat et en montée, sa masse limite clairement les performances. On cherche donc à limiter la masse.



Bien évidemment le longboard doit résister à la masse du skateboarder mais ce n'est pas la résistance qui limite les performances mais plutôt la rigidité (tout comme pour le dimensionnement de skis, vélos, raquettes dans d'autres applications sportives). On cherche donc à minimiser la masse en optimisant la rigidité. Le logiciel CES possède une rubrique d'aide qui permet d'apprendre en autonomie sur les matériaux et en particulier sur le choix des matériaux. Dedans sont référencés les indices de performances pour un grand nombre d'applications.

- Ouvrir le tableau des indices de performance pour une rigidité calibrée (stiffness limited design) qui minimise la masse. Pour cela, cliquer sur « s'instruire » puis « material selection » et « performance index ».

Table of performance indices

Click the buttons to view a table of relevant performance indices.

	Mass	Cost	Embodied Energy	CO ₂ Footprint
Stiffness limited design	kg	\$	H _m	CO ₂
Strength limited design	kg	\$	H _m	CO ₂

Quel est l'indice de performance minimisant la masse de notre longboard sachant que notre longboard est assimilé à une plaque en flexion (panel bending) ayant une longueur et largeur fixes mais une épaisseur variable ? On fera l'hypothèse que le module en Flexion E_f et identique au module en traction E .

- Déterminer les axes du graphique et la pente de la droite. Tracer le diagramme d'Ashby de l'indice de performance.
- Rajouter les limites et contraintes suivantes :
 - Limite d'élasticité > 10 MPa.
 - Module de Young > 11 GPa.
 - Résistance à la pluie (eau douce) et à l'eau salée : acceptable + excellent.
 - Résistance aux chocs ($G_c = K_{Ic}^2/E > 0,1 \text{ kJ/m}^2$).
 - Température d'utilisation : -20°C to +60°C. Pour cela tracer un graphique avec la température minimale d'utilisation et la température maximale d'utilisation puis utiliser l'outil de sélection par une boîte.
- Classer les 5 meilleurs matériaux pour un longboard. On évitera les matériaux sous forme de mousse car l'épaisseur du longboard correspondant a une épaisseur prohibitive.
- Lors du choix de matériaux, d'autres paramètres sont importants comme le coût volumique (masse volumique * prix massique), l'empreinte CO₂ de mise en forme et la capacité du matériau à être recyclé ou réutilisé. En rentrant dans les fiches matériaux comparer ces 3 paramètres pour en déduire le matériau qu'il faudra pour fabriquer un longboard.

Exercice 4 : Câble électrique à faible coût

On souhaite réaliser au plus bas coût un câble électrique aérien. Afin de limiter les pertes électriques, on impose que la résistance électrique d'un kilomètre de câble soit inférieure à une valeur critique R_0 . La résistance électrique d'un fil de section S , de longueur L et de résistivité ρ_e est donnée par : $R = \rho_e L / S$.

1. Etablir une liste classée des 5 meilleurs matériaux pour la fonction « limiter les pertes électriques ». Pour cela
 - Rédiger le cahier des charges : déterminer la fonction, l'objectif et les paramètres du problème.
 - En suivant la démarche présentée en cours et TD, déterminer l'indice de performance I_1 .
 - Déterminer à partir de I_1 , les axes du graphique, la pente de la droite choisie, et sa position (plus haute ou plus basse). Tracer le diagramme d'Ashby de votre indice de performance.
 - Restreindre l'univers des matériaux aux seuls conducteurs électriques. Pour cela choisir le menu « Arborescence » puis sélectionner dans l'« univers des matériaux » les « métaux et alliages ».
 - Etablir une liste classée de 5 matériaux candidats.
2. Une autre contrainte importante sur les câbles à haute tension est d'être capable de résister à une force de tension T_0 sans se rompre. Reproduire les étapes 1.1 à 1.4, en considérant cette fois la requête de résistance mécanique (on notera I_2 l'indice de performance associé) ;
3. Les deux requêtes étant contradictoires, aucun matériau ne s'y conforme de manière optimale. Quelle solution, adoptée dans la pratique, permet de contourner cette difficulté ?

Conclusion

Faire le bilan des fonctionnalités et limites du logiciel CES edupack.

Quelles difficultés avez-vous rencontrées ?

Annexe 1 : la méthodologie des choix de matériaux

Dans cet exemple est détaillée la méthode pour déterminer l'indice de performance d'un matériau, construit comme une combinaison de ses propriétés, et permettant d'évaluer de manière objective la performance du matériau vis-à-vis du cahier des charges.

Nous allons pour cela considérer l'exemple simple de la sélection de matériaux pour la réalisation d'une colonne rigide à faible coût.

Les colonnes supportent des efforts de compression (les pieds d'une table, les colonnes du Parthénon, etc.). On souhaite réaliser une colonne de hauteur h fixée, capable de supporter une charge F imposée sans flamber, et qui soit la moins chère possible.

Première étape : Rédaction du cahier des charges

- 1) **fonction** : quelle est la fonction de l'objet (que lui impose-t-on) ?
- 2) **objectif** : quelle quantité souhaite-t-on maximiser ou minimiser ?
- 3) **paramètres** :
 - **fixes** : quels paramètres sont imposés (géométrie, fonction) ?
 - **ajustables** : quels paramètres peut-on ajuster ?
 - **matériau** : quelles sont les propriétés du matériau mises en jeu ?

Deuxième étape : Détermination de l'indice de performance

- 4) **équations** :
 - (a) écrire l'équation définissant l'objectif en fonction des autres paramètres.
 - (b) écrire l'équation définissant la fonction sachant que la force critique provoquant le flambage d'une colonne à section circulaire, de hauteur h , de rayon r et de module d'Young E , s'écrit : $F = \pi^3 E r^4 / (4h^2)$; en utilisant cette équation liée à la fonction de l'objet, exprimer le paramètre ajustable en fonction des autres paramètres du problème.
- 5) **fonction objectif** : exprimer l'objectif exclusivement en fonction des paramètres fixes (géométrie, fonction) et des propriétés du matériau, sans paramètres ajustables.
- 6) **indice de performance** : en déduire l'indice de performance (les paramètres matériau dans la fonction objectif)

Troisième étape : Utilisation des diagrammes et classement des matériaux

- 7) **axes** : connaissant l'expression de l'indice de performance, choisissez les coordonnées associées aux axes Ox et Oy de la carte des propriétés.
- 8) **pente** : quelle sera la pente des lignes équipervormantes sur cette carte ? Les matériaux les plus performants seront-ils situés sur les lignes les plus hautes ou les plus basses (justifier) ? Pour répondre à cette question il faut calculer le log de l'indice de performance.
- 9) **ajout des limites et contraintes supplémentaire** : souvent d'autres critères sont à prendre en compte (ex. : résistance aux chocs, température d'utilisation...) pour les prendre en compte on rajoute soit des limites, des graphes ou on utilise la fonction arborescence.
- 10) **liste** : déterminer une liste classée de 5 matériaux candidats pour la réalisation de la colonne.

Annexe 2 : comment trouver l'explication d'un terme technique

Toutes les propriétés des matériaux sont définies et expliquées dans CES. Vous avez 2 manières d'accéder à ces informations :

1. En sélectionnant le filtre limite

2. Étapes de sélection

Graphique Limites Arborescence

Limites

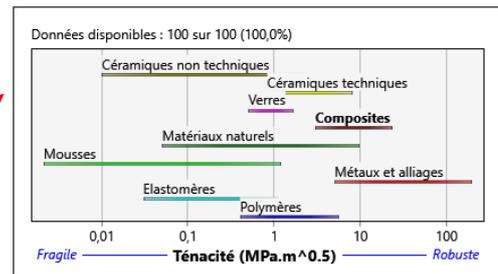
Paramètres Appliquer Effacer

Impossible de trouver la propriété recherchée ?

Propriétés générales

Propriétés mécaniques

	Minimum	Maximum	
Module de Young			GPa
Module de cisaillement			GPa
Module de compressibilité			GPa
Coefficient de Poisson			
Limite élastique			MPa
Résistance en traction			MPa
Résistance à la compression			MPa
Allongement			% strain
Mesure de dureté Vickers			HV
Limite de fatigue			MPa
Ténacité			MPa.m^{0.5}



2. En ouvrant une fiche matériau

Propriétés générales

Masse Volumique	8,5e3	- 9e3	kg/m ³
Prix	* 5,05	- 5,9	EUR/kg
Date de première utilisation ("-" signifie "Avant Jésus Christ")		-3000	

Propriétés mécaniques

Module de Young	70	- 105	GPa
Module de cisaillement	25	- 33	GPa
Module de compressibilité	* 84	- 95	GPa
Coefficient de Poisson	0,34	- 0,33	
Limite élastique	100	- 730	MPa
Résistance en traction	210	- 730	MPa
Résistance à la compression	100	- 500	MPa
Allongement	2	- 40	% strain
Mesure de dureté Vickers	5	- 240	HV
Limite de fatigue	100	- 290	MPa
Ténacité	24	- 60	MPa.m^{0.5}
Coefficient d'amortissement (tan delta)	* 5e-5	- 2,5e-4	

Résistance à la fracture K_{Ic} et robustesse G_c

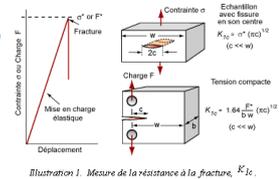
Définition et mesure.

Vitesse de libération de l'énergie G et robustesse G_c .

Approfondissement : les origines de la robustesse.

Pour en savoir plus.

Définition et mesure. La résistance à la fracture, K_{Ic} , (unités: MPa m^{1/2} ou MN/m^{1/2}) mesure la résistance d'un matériau à la propagation d'une fissure. On la mesure en mettant sous charge un échantillon contenant une fissure délibérément introduite, limitée et de longueur $2c_0$ ou une fissure partant de la surface de longueur c_0 (Illustration 1). On fait la mesure en enregistrant la contrainte en traction σ^* ou la charge de pliage P^* à laquelle la fissure se propage subitement. On calcule alors la quantité K_{Ic} à partir de l'équation



On calcule alors la quantité K_{Ic} à partir de l'équation