

Conception adaptative pour un cadre de vélo et conception innovante d'un élément thermique souple embarqué sur satellite

On propose d'illustrer la méthode de choix des matériaux par deux études de cas : l'une relève de la conception adaptative, l'autre de la conception innovante.

1. Étude de conception adaptative : les tubes pour cadre de vélo

1.1. Analyse fonctionnelle

- *Quelle est la fonction d'un cadre de vélo ?*
- *Comment un cadre est-il sollicité en service ? Quelles sont les conditions aux limites ?*
- *Que cherche-t-on à maximiser ou minimiser ici («sollicitations dimensionnantes ») ?*

Le cahier des charges pour la conception d'un cadre de vélo est schématiquement le suivant : sa fonction est de supporter les charges en service, qui sont essentiellement des moments de flexion. L'objectif recherché est d'avoir un cadre le plus léger possible remplissant cette fonction. Suivant le public visé dans la clientèle, on aura aussi pour objectif de minimiser le coût.

1.2. Considérons le cas classique des cadres tubulaires.

On cherche ici à optimiser la masse de ce cadre, en tenant compte de certaines contraintes :

- la première contrainte est que la résistance mécanique soit suffisante : on entend par là que le cadre ne doit pas rompre, qu'il ne doit pas flamber et qu'il ne doit pas rompre par sollicitation alternée (fatigue).

Intéressons-nous, par exemple, à l'endurance en fatigue. Le moment de flexion maximal pour lequel le tube peut avoir une durée de vie théoriquement infinie en fatigue est : $M = I R_e / r$

avec R_e la limite d'endurance du matériau,

r le rayon du tube,

e son épaisseur,

et I le moment d'ordre 2 de la section du tube (c'est cette grandeur qui est responsable de la plus grande efficacité des tubes creux par rapport aux tubes pleins). Pour le tube considéré, on a : $I = \pi r e^3$

- La deuxième contrainte est imposée par la géométrie : la plupart des accessoires de vélo sont conçus pour être adaptables sur des tubes de 26 mm de diamètre. Le diamètre extérieur est donc fixé par ces impératifs commerciaux et on ne peut jouer que sur l'épaisseur e de la paroi, que l'on fixe à la valeur juste suffisante pour supporter M (moyennant éventuellement un coefficient de sécurité).

a) Exprimez la fonction d'objectif en fonction de la géométrie et des propriétés matériau.

L'objectif est de minimiser la masse par unité de longueur de tube : $m/L = 2\pi \rho e r$

b) Une des variables n'est pas connue. En éliminant la variable libre entre l'équation de la fonction à optimiser et l'équation de la contrainte, reformulez la fonction d'objectif en identifiant bien les contributions respectives de la géométrie, des spécifications fonctionnelles et des propriétés matériau.

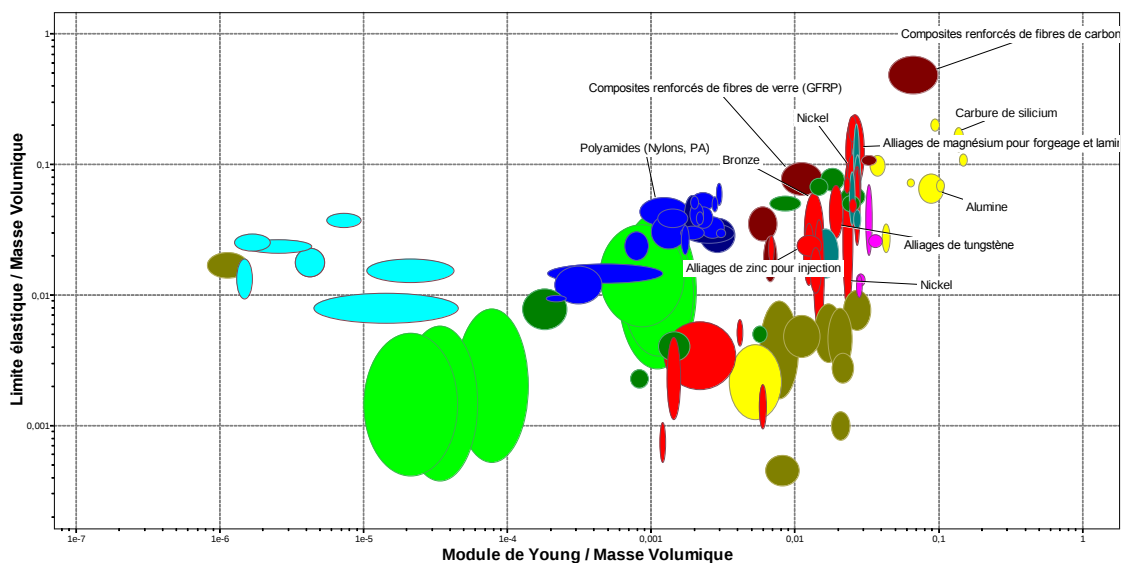
En éliminant la variable libre e entre l'équation de la fonction à optimiser et l'équation de la contrainte, on obtient la masse linéique en termes de propriétés du matériau et des paramètres relevant de la conception : $m/L = (2 \pi^{2/3} M r) (\rho / R_e^{1/3})$

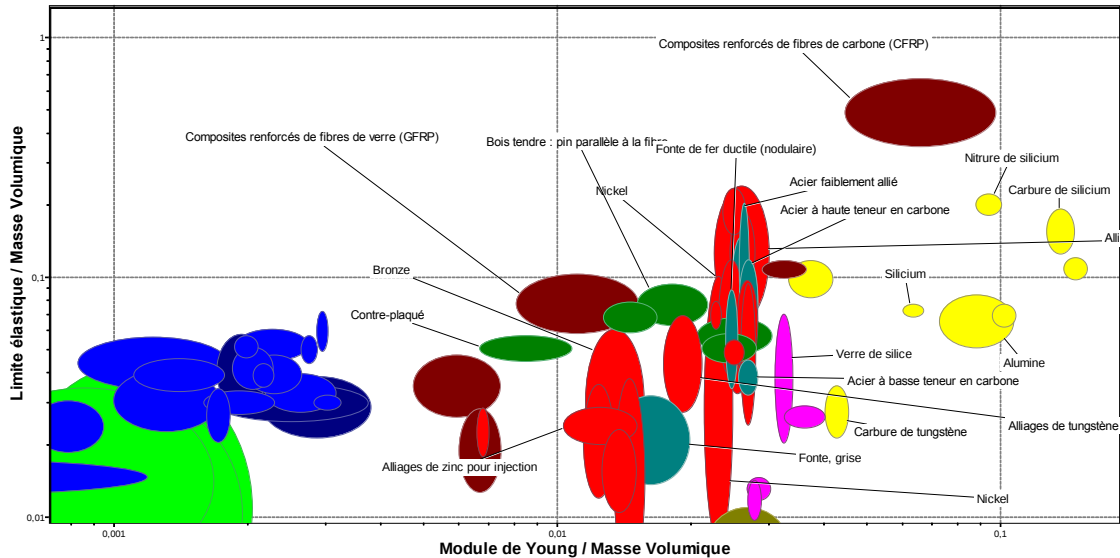
c) Quel est l'indice de performance I_1 à maximiser pour trouver les meilleures solutions ?

Le tube le plus léger qui remplit l'objectif tout en satisfaisant les différentes contraintes est obtenu en maximisant l'indice de performance : $I_1 = R_e^{1/3} / \rho$

1.3. Si l'on change l'objectif ou les contraintes, on changera aussi l'indice de performance. Si, par exemple, au lieu de privilégier l'endurance en fatigue, on privilégie la rigidité en gardant le même objectif de minimisation de la masse et la même contrainte géométrique sur le diamètre extérieur au tube, on peut montrer de manière analogue que la solution revient à maximiser l'indice de performance : $I_2 = E / \rho$

a) Supposons maintenant que l'on veuille satisfaire aux deux exigences précédentes, à savoir optimiser la masse en respectant à la fois l'endurance en fatigue et la rigidité. Utilisez le logiciel CES Edupack niveau 2 pour tracer un diagramme pour trouver les « meilleures » solutions satisfaisant ces deux exigences. Listez celles-ci.





Les matériaux les mieux adaptés à notre cas se trouvent dans le coin supérieur droit de cette carte de sélection. On y trouve les **composites à fibres de carbone** (CFRP) qui sont excellents des deux points de vue (rigidité et endurance). Ils sont suivis de près par les **métaux** qui sont placés sur une même verticale, leur endurance étant beaucoup plus dispersée que leur raideur spécifique. On y retrouve les alliages habituellement utilisés pour les cadres de vélos : les **aciers bas carbone**, les **alliages d'aluminium**, l'**alliage de titane** et l'**alliage de magnésium**, très près les uns des autres. On obtient également des céramiques techniques SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, WC, Si,...). À noter que le bois a des performances légèrement inférieures aux CFRP et comparables à celles des métaux, sinon un peu meilleures.

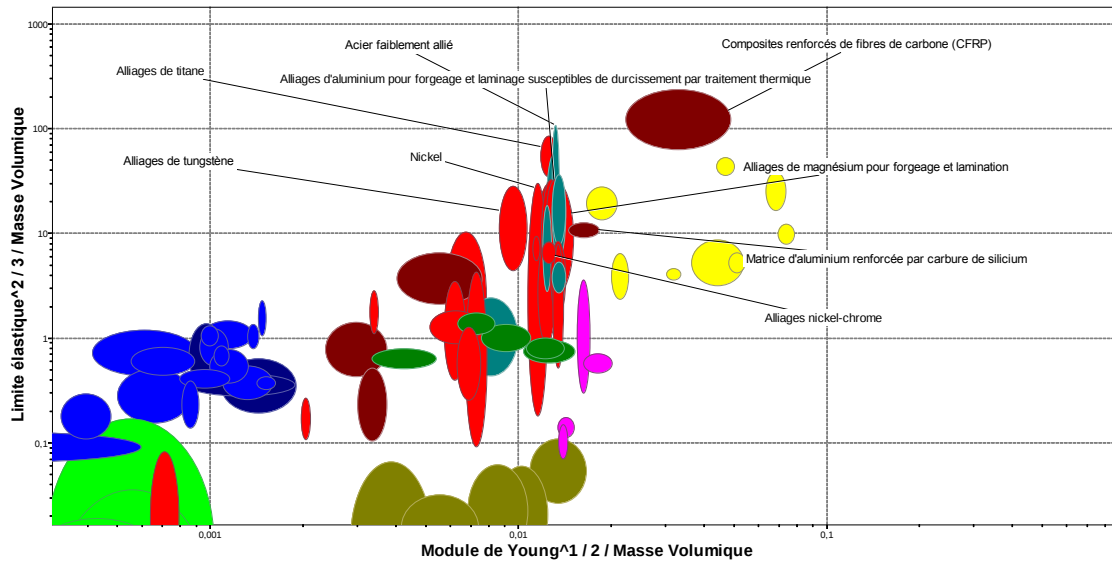
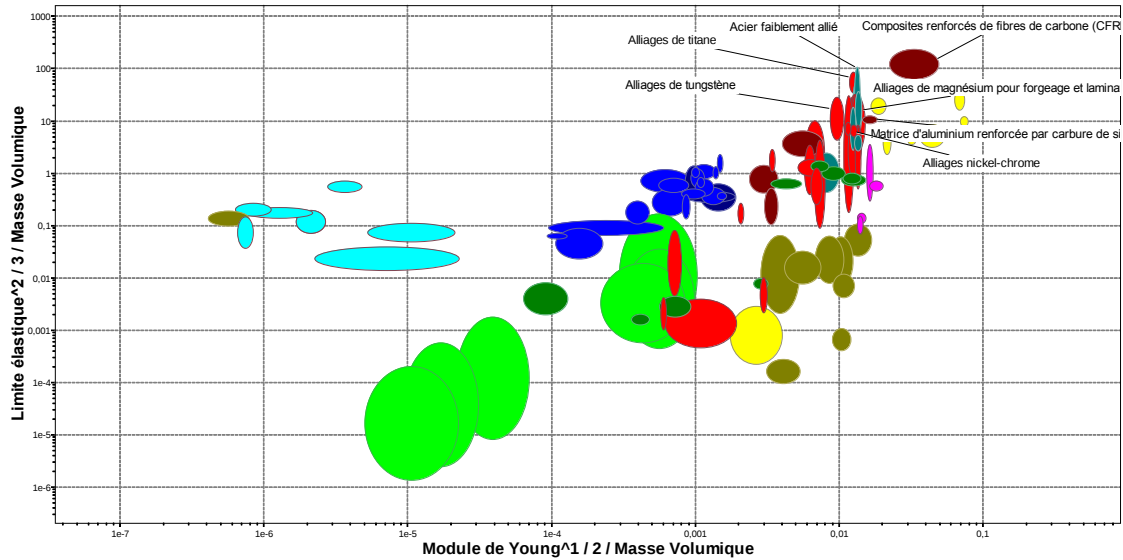
b) Certaines solutions doivent-elles a priori être rejetées ? Pourquoi ?

Commentez la faisabilité des différentes solutions choisies et comparez avec ce qui existe sur le marché.

On retire les céramiques techniques, très chères et surtout fragiles, peu adaptées pour notre produit. Idem pour le bois, surtout pour la durabilité (si on laisse le vélo à l'extérieur)...

Entrent en jeu les critères économiques (les CFRP sont très chers), les critères de mise en œuvre (les CFRP et le bois sont difficiles à assembler). Dans le cas présent, il n'est pas facile de choisir entre les différents métaux..., si ce n'est par le prix : il ressort dans le cas présent que le titane est beaucoup plus cher alors que ses performances potentielles ne sont pas meilleures.

1.4. Si on abandonne la contrainte du diamètre extérieur fixé et que l'on se donne, au contraire, un facteur d'aspect r/e fixé, montrez que les indices de performance précédents doivent être remplacés par : $I_3 = R_e^{2/3} / \rho$ et $I_4 = E^{1/2} / \rho$. A l'aide du logiciel CES Edupack niveau 2, tracez la carte de sélection correspondante à ces deux nouveaux indices. Déterminez la liste des familles de matériaux retenues.



Les alliages légers prennent alors un avantage décisif. Si l'on privilégie l'endurance sur la rigidité, les alliages de titane ou les composites à matrice métallique seront les mieux placés. Si, au contraire, on privilégie la rigidité, comme c'est le cas pour un vélo de randonnée, on s'orientera préférentiellement vers les alliages de magnésium.

2. Étude de conception innovante : conducteur thermique souple embarqué sur satellite

Un ensemble embarqué sur satellite comporte un cryostat qui permet à une caméra équipée d'un détecteur infrarouge de fonctionner à basse température (aux alentours de 100 K). À l'intérieur de cet ensemble, on se propose de concevoir l'élément de liaison thermique entre le détecteur infrarouge à refroidir, d'une part, et la source froide de l'élément cryogénique chargé d'évacuer les calories, d'autre part.

La décision de séparer ces deux sous-ensembles a été prise pour des raisons d'encombrement, mais également pour des raisons d'incompatibilité fonctionnelle : le système réfrigérant qui actionne l'élément cryogénique génère des vibrations, alors que la résolution attendue du détecteur nécessite une stabilité mécanique aussi parfaite que possible.

Le système à concevoir sera unique, ou éventuellement reproduit en quelques exemplaires seulement. En ce qui concerne les contraintes financières, il n'existe évidemment pas de références pour ce type de matériel ; les équipements spatiaux sont coutumiers des coûts élevés, les clients étant souvent prêts à payer pour les performances attendues. Naturellement, cela ne signifie pas qu'il n'y ait aucune limite en la matière et qu'il ne faille pas se restreindre à des solutions certes performantes, mais qui soient aussi financièrement réalistes.

Les principaux impératifs du cahier des charges fonctionnel peuvent finalement être résumés comme suit :

- conduction thermique suffisante : ce point, correspondant à la fonction principale de la pièce, va permettre de la dimensionner (notamment sa section), compte tenu des données thermiques du problème et de la conductivité thermique du matériau employé,
- souplesse mécanique, pour éviter de transmettre les vibrations de l'élément cryogénique au détecteur,
- faible émissivité ou absorptivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques le long de l'élément de liaison, pertes qui, en ambiance spatiale, s'effectuent essentiellement par rayonnement,
- absence de risque de contamination du détecteur par dégazage ou désorption : à terre, le matériau utilisé ne devra pas pouvoir risquer d'adsorber des contaminants, ni s'oxyder,
- masse minimale, tout supplément de masse se traduisant par un coût de lancement supplémentaire pour un équipement à satelliser ; de plus, une faible masse minimisera les effets d'inertie lors de vibrations ou d'accélération parasites,
- fixations démontables aux deux extrémités, côté élément cryogénique et côté détecteur.

Compte tenu de ces impératifs fonctionnels, la solution technologique retenue après étude sera basée sur une tresse de fils fins (donc souples), à section globale circulaire (pour minimiser le rapport surface extérieure/volume, et donc minimiser les pertes par rayonnement), tressée de manière assez lâche pour conserver une grande flexibilité d'ensemble, assemblée par serrage démontable à ses deux extrémités (pour permettre la transmission de l'énergie thermique par simple contact).

Le matériau choisi pour mettre en œuvre cette solution technologique devra, bien entendu, être compatible avec elle, c'est-à-dire avant tout disponible sous forme de fils ou de fibres de faible

diamètre. Mais il devra également optimiser les performances de la tresse sur les différents plans évoqués ci-dessus. En particulier, il est assez simple de procéder à une présélection grâce à des indices de performance traduisant deux critères essentiels, pour une tresse capable de faire passer un flux thermique défini :

$$\Phi = \lambda S (\Delta T / \Delta x)$$

avec λ conductivité thermique du matériau,
 S section de la tresse,
 $\Delta T / \Delta x$ gradient de température supposé uniforme le long de la tresse.

1. Recherche de la souplesse maximale pour un flux thermique donné

Cela revient à minimiser la résistance à la flexion de chacun des N fils de section s de la tresse. On peut définir ici la souplesse comme le rapport δ de la rotation par unité de longueur du fil, sur l'intensité du moment de flexion auquel il est soumis. Un calcul élémentaire de résistance des matériaux montre que δ s'exprime en fonction du module d'Young E du matériau et du moment quadratique de flexion I de la fibre, sous la forme :

$$\delta = 1 / EI \quad \text{soit} \quad \delta = C_1 / Es^2$$

avec C_1 constante dont la valeur est liée à la forme de la section s de la fibre.

En éliminant la variable libre entre l'équation de la fonction à optimiser et l'équation de la contrainte, reformulez la fonction d'objectif en identifiant bien les contributions respectives de la géométrie, des spécifications fonctionnelles et des propriétés matériau.

Quel est alors l'indice de performance I_1 à maximiser pour trouver les meilleures solutions ?

En éliminant $S =$ section de la tresse $= N \times s =$ nombre de fil $\times$ section d'un fil, entre les deux équations, on obtient l'expression de la souplesse, à maximiser, en fonction du flux thermique Φ donné :

$$\delta = \frac{C_1 N^2 \lambda^2 (\Delta T / \Delta x)^2}{E \Phi^2}$$

On peut constater dans cette expression que, toutes choses égales par ailleurs, le matériau qui conduira à la souplesse maximale sera celui pour lequel la combinaison :

$$I_1 = \lambda^2 / E$$

sera la plus élevée. Cette expression constitue donc un premier indice de performance possible pour cette application.

2. Recherche de la masse minimale pour un flux thermique donné

a) *Exprimez la fonction d'objectif (masse de la pièce) en fonction de la géométrie et des propriétés matériau.*

La masse de la pièce s'exprime sous la forme : $M = \rho L S$
 avec ρ masse volumique du matériau constituant la tresse de longueur L .

b) *Puis comme précédemment, éliminez la variable libre entre l'équation de la fonction à optimiser et l'équation de la contrainte, et reformulez la fonction d'objectif.*

On peut, comme précédemment, éliminer la section S (paramètre libre du problème, à dimensionner grâce aux conditions thermiques en fonction des caractéristiques du matériau employé) entre les équations donnant la contrainte et l'objectif, pour obtenir : $M = C_2 \rho \Phi / \lambda$

c) Quel est alors l'indice de performance I_2 à maximiser ?

On en déduit que le matériau conduisant à la masse minimale sera celui dont l'indice de performance : $I_2 = \lambda / \rho$ est le plus élevé.

3. Sur la base des deux indices I_1 et I_2 ainsi définis, il est possible de mener une première présélection en se référant à une base de données génériques de matériaux courants.

a) A partir du tableau suivant, déterminez les matériaux susceptibles d'être utilisés ici. Discutez vos propositions : y a-t-il a priori des matériaux à éliminer d'emblée ?

Tableau 4 – Sélection des matériaux pour une tresse de satellite	
$I_1 = \lambda^2/E$ (souplesse maximale)	$I_2 = \lambda/\rho$ (masse minimale)
Carbone graphite	Carbone diamant
Carbone diamant	Béryllium
Argent et alliages d'argent	Cuivre et alliages de cuivre
Or	Carbone graphite
Cuivre pur	Aluminium et alliages d'aluminium
Aluminium et alliages d'aluminium	Cuivre pur
Alliages de cuivre	Argent et alliages d'argent

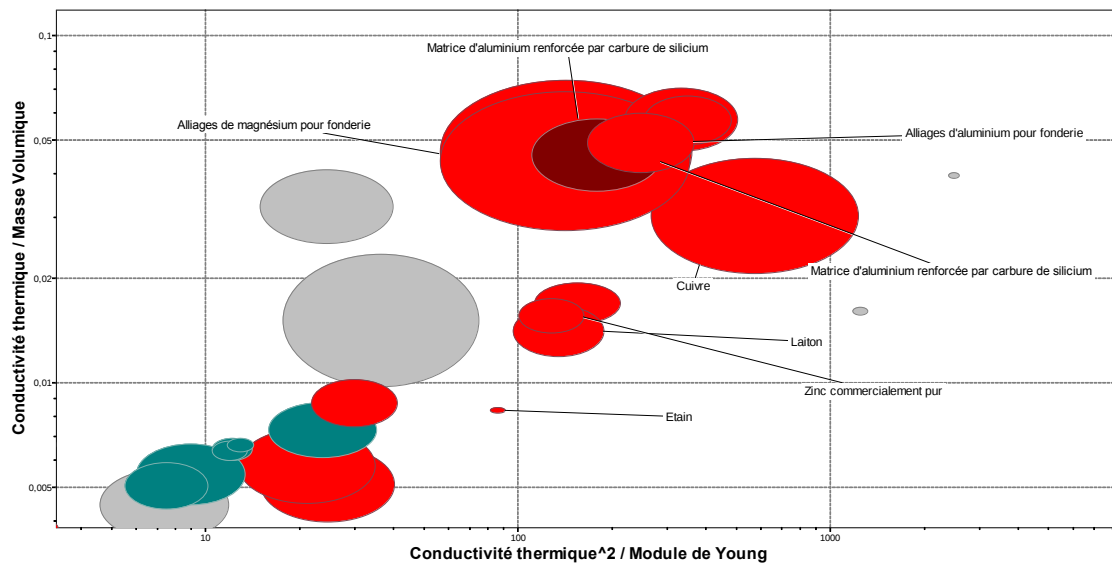
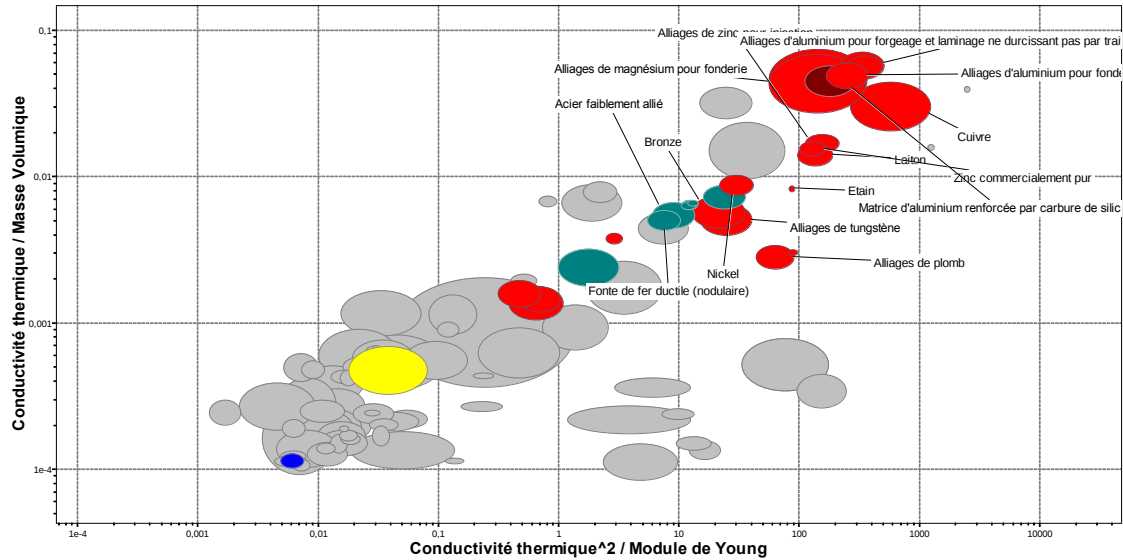
Nous retiendrons les matériaux apparaissant en commun dans les deux têtes de listes : carbone graphite, carbone diamant, cuivre et alliages de cuivre, argent et alliages d'argent, aluminium et alliages d'aluminium.

Parmi ces matériaux hautement performants, le diamant peut être éliminé d'emblée d'une part en raison de son prix élevé, mais surtout parce qu'il n'est pas disponible sous forme de fibres ou de rubans ; il est donc incompatible avec la géométrie envisagée pour la pièce.

b) Utilisez le logiciel CES Edupack niveau 2 pour affiner votre sélection.

On impose déjà une bonne formabilité (possibilité de former une tresse, donc indice de 5 dans les limites), puis on peut demander au logiciel de tracer I_2 en fonction de I_1 . On cherche ici à maximiser I_1 et I_2 , donc les matériaux d'intérêt se trouveront en haut à droite.

On retrouve les alliages de Cu et d'Al. Mais au final, ce niveau du logiciel (niveau 2) ne possédant qu'un nombre « limité » de matériaux, on s'interdit certaines solutions originales telles que le Carbone graphite...



c) Comparez avec des solutions déjà existantes pour des problèmes proches.

Les alliages métalliques de cuivre sont classiquement utilisés pour des tresses thermiques au sol car ils sont moins coûteux que les alliages d'argent. Les alliages d'aluminium sont plus légers que les précédents et conduiront à une meilleure solution, si le gain de masse est considéré comme prioritaire devant la souplesse. Ces trois types d'alliages peuvent s'acheter sous forme de fils fins.

Une solution originale, relativement inattendue en conception traditionnelle, apparaît ici sous la forme du carbone graphite. En effet, celui-ci est disponible sous forme de fibres de faible diamètre : en particulier, les fibres de carbone dites à usage général ($E < 200$ GPa) et, de préférence, les fibres *ex-brai* (réputées pour leur bonne conduction thermique) semblent tout indiquées pour cette application. Elles auraient cependant un inconvénient probable : celui de leur émissivité thermique, vraisemblablement plus élevée que celle des alliages métalliques, qui obligerait sans doute à gagner la tresse d'une *chaussette* réfléchissante de polymère métallisé, au demeurant facile à mettre en œuvre. Cette solution innovante méritera d'être testée lors d'essais mécaniques et thermiques sur prototype en vue d'une éventuelle validation.