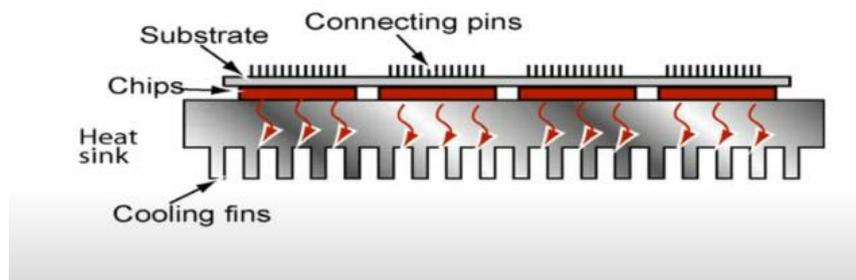


## Matériaux pour un radiateur thermique – Traduction d'un cahier des charges :

On prend l'exemple ici d'un client qui vient nous voir pour une sélection de matériaux pour un radiateur thermique, qu'il a préalablement dessiné et dimensionné (cf photo ci-dessous). Ce client est un fabricant de matériel informatique, et il utilise dans ses produits ce radiateur pour refroidir des processeurs. En effet, au cours de leur utilisation, les processeurs émettent beaucoup de chaleur et il faut refroidir pour que, d'un point de vue électronique, ils ne claquent pas et qu'ils assurent leur fonction au sein des ordinateurs.

Lors de la discussion avec le client, on apprend que le processeur ne doit pas travailler dans un environnement où la température est supérieure à  $200^{\circ}\text{C}$ , et que pour un bon refroidissement du processeur, il faut que le matériau du radiateur présente une conduction thermique supérieure à  $25 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ .



On commencera par traduire ce cahier des charges :

- Fonctions : évacuer la chaleur d'un composant électronique
- Contraintes : de façon explicite le matériau doit être un conducteur thermique et sa conduction thermique doit être  $> 25 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  + le processeur ne doit pas travailler à une température  $> 200^{\circ}\text{C}$ , donc le radiateur doit admettre dans sa température maximale de service  $200^{\circ}\text{C}$  + la forme est imposée par le client qui arrive avec un dessin bien déterminé
- + non explicités, mais à prendre en compte du fait qu'il s'agisse d'un radiateur avec un processeur posé dessus : il faut un matériau qui soit un isolant électrique pour éviter les court-circuit
- Objectifs : rien d'explicite
- Variables libres : le matériau, et le procédé, en respectant les contraintes ; la forme est, elle, imposée.

Pour mettre en place la démarche de sélection, on va utiliser le logiciel CES Edupack (le niveau 2 sera suffisant dans notre cas). On va se placer dans la base de données des matériaux, et on va imposer les critères résumés dans le cahier des charges (contraintes), et regarder si on est capable de respecter l'objectif proposé.

- 1) Au niveau des limites, on impose les différents critères matériaux explicites du cahier des charges, à commencer par le fait que le matériau doit être un bon conducteur thermique, mais un mauvais conducteur électrique (isolant) : Propriétés électriques : conducteur ou isolant électrique ? > Bon isolant, et Propriétés thermiques : conducteur ou isolant thermique ? > Bon conducteur + la conduction thermique du matériau nous a été imposé : Propriétés thermiques > conductivité thermique :  $25 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  mini +

pour la température de service de 200°C maxi : Propriétés thermiques > Température minimale d'utilisation : 200°C maxi

⇒ Sur les 100 matériaux proposés dans la base de données du logiciel (niveau 2), on a 3 matériaux qui sont validés (qui passent les premiers critères de sélection par arborescence). On remarque qu'il s'agit de céramiques techniques : le nitrure d'aluminium, l'alumine et le nitrure de silicium.

2) On va maintenant essayer d'affiner nos résultats.

⇒ Si on regarde le détail des résultats en fonction de nos différents critères : pour la température limite d'utilisation, les 3 matériaux retenus sont largement au-dessus de cette température. Pour ce qui est de la conductivité thermique, on s'aperçoit que le nitrure de silicium présente des valeurs plus faibles que les autres, entre 22 et 30 W/m.°C, ce qui compte tenu des 25 W/m.°C imposé par le client, pourrait se révéler limite pour les valeurs imposées dans le cahier des charges, et par contre on a une sur-qualité évidente pour le nitrure d'aluminium, qui lui présente des valeurs de conductivité vraiment plus élevées que celle demandée.

3) On peut alors se poser la question du coût de cette sur-qualité. Pour cela, on peut tracer un graphique présentant en ordonnées la conductivité thermique (Catégorie Paramètres thermiques, Attribut : Conductivité thermique) et en abscisses le coût du matériau (Catégorie Propriétés générales, Attribut : Prix). Attention il s'agit ici d'un coût massique (€/kg), alors que nous on serait plutôt intéressé par un coût volumique, puisque dans le cahier des charge c'est la forme et donc le volume de la pièce qui est imposé), donc on va définir notre propriétés en entrant la formule coût volumique = prix x masse volumique.

⇒ On observe que l'**alumine** propose le meilleur compromis en termes de conductivité thermique et de coût, avec le nitrure de silicium qui possède un coût volumique moyen mais une conductivité faible, et le nitrure d'aluminium qui lui possède une conductivité thermique très élevée, mais un coût également très important.

## Matériaux pour des ressorts travaillant en milieu marin :

On cherche ici à répondre à la demande d'un client, qui désire trouver un matériau pour fabriquer un ressort qui serait utilisé dans l'eau de mer. Le client précise qu'il a besoin d'un matériau présentant une ténacité  $> 15 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ , et que, comme il s'agit de ressort, on cherche à maximiser l'énergie élastique maximale stockée par le matériau.



On commencera par traduire ce cahier des charges :

- Fonctions : stockée puis restituer l'énergie élastique
- Contraintes : explicitée directement par le client, on veut une ténacité  $> 15 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ , + durabilité en milieu marin
- Objectifs : maximiser l'énergie élastique)
- Variables libres : matériau, forme et procédé ne sont pas imposés par le cahier des charges

Si on raisonne en termes d'indices de performances, clairement ici on nous demande de maximiser l'énergie élastique, et on se souvient que l'énergie élastique correspond à l'aire de la partie élastique sous la courbe de chargement  $\sigma$ - $\varepsilon$ , donc  $E_{el} = \frac{1}{2}\sigma_e^2/E$ , donc en termes d'indice de performance, on aura  $I_1 = \sigma_e^2/E$  ( $\frac{1}{2} = \text{constante}$ ) à maximiser.

Soit  $\log I_1 = 2 \log \sigma_e - \log E$ , donc  $\log \sigma_e = \frac{1}{2} \log E + \frac{1}{2} \log I_1$ , donc dans le cadre de la sélection, si on trace  $\log \sigma_e$  en fonction de  $\log E$ , on utilisera donc une droite de sélection de pente  $\frac{1}{2}$ , et donc les candidats matériaux qui seront au-dessus de cette droite, puisque l'indice de performance  $I_1$  doit être maximisé.

Pour mettre en place la démarche de sélection, on va utiliser le logiciel CES Edupack (le niveau 2 sera suffisant dans notre cas). On va se placer dans la base de données des matériaux, et on va imposer les critères résumés dans le cahier des charges (contraintes), et regarder si on est capable de respecter l'objectif proposé.

- 1) Directement au niveau des limites, on va renseigner que notre matériau doit présenter une ténacité  $> 15 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$  : Propriétés mécaniques > Ténacité > mini =  $15 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$  + on sait que le matériau doit présenter une bonne tenue en milieu marin, donc Durabilité : eau et solutions aqueuses > Eau salée : Excellente

⇒ Il reste ainsi 16 matériaux validés sur 100.

- 2) On vient de définir un indice de performance  $I_1$  fonction de  $\sigma_e$  et  $E$ , donc on va demander à tracer un graphique avec la limite d'élasticité en ordonnées et le module d'Young en abscisses (Catégorie Propriétés mécaniques pour les deux), et positionner sur le graphique une droite de pente  $\frac{1}{2}$  et regarder les matériaux au-dessus de cette droite.

- ⇒ Si on prend vraiment les meilleurs candidats, mais sans être trop restrictifs, car on peut penser que les meilleurs matériaux présenteront des coûts très élevés, il en reste quatre : les aciers inoxydables, les alliages de titane, les composites renforcés par des fibres de carbone, et les super-alliages base nickel.
- 3) On regarde donc maintenant les données économiques et le prix, et on trace un nouveau graphique donnant en ordonnées le prix volumique (formule masse volumique x prix) et en abscisses on va sélectionner les 4 matériaux candidats dans l'arborescence.
- ⇒ Les aciers inox sont donc les matériaux les plus abordables, puis les CRFC, et les alliages de titane et les super-alliages base nickel sont eux très onéreux. Cependant, en termes d'énergie élastique stockée, les aciers inox restent dans les limites basses, et donc si on recherche le meilleur compromis performance-coût, les CRFC seraient les meilleurs candidats. On pourra donc présenter ces différentes solutions au client (coût et performances « basses » pour les inox, coût et performances « moyennes » pour les composites, et très bonnes performances mais cout très élevé pour les alliages de Ti et les super-alliages base Ni), en le laissant ensuite discriminer en fonction du nombre de pièces et des performances qu'il envisage.

## Matériaux pour couvrir un bâtiment :

Un client est à la recherche de matériaux pour couvrir un bâtiment. Après discussion, il ressort que le client est intéressé par un matériau se présentant sous forme de feuilles, avec donc pour cette mise en forme une ductilité supérieure à 2%, possédant une limite élastique supérieure à 50 MPa et une excellente tenue aux diverses ambiances extérieures, et dans le cadre d'une démarche d'éco-conception, le client cherche à minimiser l'impact environnemental du matériau, tout en minimisant également son coût.

On commencera par traduire ce cahier des charges :

- Fonctions : couvrir un bâtiment
- Contraintes : la forme de feuille du produit, une ductilité  $> 2\%$ , une limite élastique  $\sigma_e > 50$  MPa + en termes de tenue à l'environnement extérieur, pour un toit on pensera à une bonne résistance aux UV (ensoleillement), à l'eau (pluie) et à des milieux divers susceptibles d'être rencontrés en extérieur
- Objectifs : on nous demande de minimiser l'impact environnemental et le coût
- Variables libres : matériaux, forme et procédé (rien de spécifique n'a été précisé ici par le client)

Si on raisonne en termes d'indices de performances, ici on nous demande de minimiser le coût et l'impact environnemental, tout en maintenant une limite élastique supérieure à 50 MPa, donc on peut imaginer des indices type  $\sigma_e/\text{coût}$  ou  $\sigma_e/\text{facteur environnemental}$ , à maximiser sous cette forme donc.

Pour mettre en place la démarche de sélection, on va utiliser le logiciel CES Edupack (le niveau 2 sera suffisant dans notre cas). On va se placer dans la base de données des matériaux, et on va imposer les critères résumés dans le cahier des charges (contraintes).

- 1) Au niveau des limites, on va renseigner que notre procédé doit avoir une ductilité d'au moins 2% et une limite élastique supérieure à 50 MPa (Limites  $>$  Propriétés mécaniques : allongement mini = 2% et limite élastique mini = 50 MPa) nu
  - ⇒ Il reste alors 40 variétés de matériaux sur 100 disponibles dans la base de données répondant à ces critères
- 2) On ajoute maintenant que l'on veut disposer de notre produit sous forme de feuilles, donc dans l'**arborescence procédés**, on va contraindre le procédé de mise en forme à la gamme des procédés permettant d'obtenir des feuilles : Mise en forme  $>$  Déformation  $>$  Procédés de déformation de feuilles.
  - ⇒ Il reste 24 matériaux présentant à la fois les paramètres mécaniques désirés et pouvant être disponibles sous forme de feuilles
- 3) On va maintenant revenir sur la partie durabilité du matériau face aux conditions environnementales extérieures. En revenant dans l'arborescence, on va ajouter la résistance à la pluie en sélectionnant dans la section Durabilité : eau et solutions aqueuses  $>$  Eau douce  $>$  Excellente, la résistance à l'environnement extérieur en sélectionnant Excellent pour l'ensemble des conditions environnementales proposées dans la section Durabilité : environnements construits (Atmosphère industrielle,

Atmosphère rurale, Atmosphère marine, Radiations UV (lumière solaire) > Excellente)

- ⇒ On a maintenant plus que 13 matériaux répondant aux contraintes formulées.
- 4) On va maintenant optimiser notre choix en se focalisant sur les objectifs en termes de coût et d'impact environnemental, qu'on souhaite les plus faibles possibles. En commençant par le coût, on a vu précédemment qu'en termes d'indice de performance, on pouvait utiliser un indice  $\sigma_e/\text{coût}$ , et donc tracer le graphique  $\sigma_e = f(\text{coût volumique})$  avec  $\text{coût volumique} = \text{masse volumique} \times \text{prix}$ . On cherche ici à maximiser la valeur du  $\sigma_e$  et minimiser celle du coût, donc on va aller sélectionner les matériaux en haut à gauche sur le graphique.
- ⇒ On voit alors que les matériaux répondant aux mieux aux contraintes mécaniques et de coût sont les aciers inox, et des alliages d'aluminium, voire des composites métalliques à matrice aluminium renforcée SiC.
- 5) Pour ce qui est de l'impact environnemental, on va faire un graphique, en sélectionnant comme paramètre environnemental, par exemple, pour l'axe des ordonnées, l'empreinte carbone liée à la production du matériau (dans la catégorie Production du matériau, énergie, CO2 et eau > Attribut : empreinte CO2, production primaire), et pour l'axe des abscisses la quantité d'énergie liée à la production matériau (dans la catégorie Production du matériau, énergie, CO2 et eau > Attribut : énergie grise, production primaire). On voit sur le graphique obtenu qu'on a une relation quasi-linéaire entre ces deux paramètres, quantité d'énergie et quantité de CO2 produite par kg de matériau et donc qu'on peut sélectionner l'un ou l'autre de ces paramètres pour qualifier l'impact environnemental de la production de matériau. On va choisir pour la suite, arbitrairement, de travailler avec l'empreinte CO2. On va raisonner de la même façon avec cette fois un indice type  $\sigma_e/\text{facteur environnemental}$ , ici l'empreinte carbone x masse volumique pour travailler à volume de matière constant, et donc on va tracer un graphique  $\sigma_e = f(\text{masse volumique} \times \text{empreinte CO2, production primaire})$ . On cherche une nouvelle fois à maximiser la valeur du  $\sigma_e$  et minimiser celle du coût, donc on va aller sélectionner les matériaux en haut à gauche sur le graphique.
- ⇒ On retrouve plus ou moins les mêmes matériaux que pour la sélection en fonction du coût, avec toujours les aciers inox et des alliages d'Al.
- 6) On pourrait aussi comparer directement les deux indicateurs coût et impact environnemental entre eux, ce que nous allons faire dans un nouveau graphique présentant le coût en fonction de l'empreinte CO2, production primaire (toujours avec des valeurs volumiques pour des soucis de comparaison, donc en multipliant par la masse volumique les quantités) des matériaux précédemment sélectionnés. On cherche à minimiser ces deux quantités, donc on va se focaliser sur le bas à gauche du graphique.
- ⇒ On obtient alors les meilleurs compromis avec les alliages d'Al (pour fonderie et pour forgeage et laminage susceptibles de durcissement par traitement thermique et non). A discuter encore une fois avec le client pour finaliser le choix avec éventuellement la prise en compte de nouveaux paramètres du cahier des charges.

## Matériaux pour un tableau électrique :

On recherche ici un matériau pour réaliser un tableau électrique pour un client. En discutant avec ce client, on obtient quelques informations : tout d'abord une idée de la forme vers laquelle le produit final doit tendre, donnée par la photo ci-dessous (en imaginant que ce soit un prototype...), que la pièce doit être mise en forme par moulage, que la dureté du produit final doit être supérieure à 8 HV, et que la rigidité diélectrique doit présenter, d'après ses calculs électriques, une tension de claquage supérieure à 10 MV/m.



On commencera par traduire ce cahier des charges :

- Fonctions : contenir et protéger le circuit électrique, et aussi protéger l'utilisateur
- Contraintes : de façon explicite : dureté  $> 8$  HV, tension de claquage  $> 10$  MV/m, forme de la pièce imposée, et une mise en forme par mouler des pièces
- + non explicités, mais à prendre en compte du fait qu'il s'agisse d'un boîtier électrique : il faut un matériau qui soit un isolant électrique et thermique (possibilité de points chauds en cas de court-circuit), des interrogations possible sur l'inflammabilité du matériau utilisé (pour répondre aux normes en vigueur) et la durabilité du produit (en fonction de son environnement d'utilisation – intérieur d'une maison, à l'extérieur d'un bâtiment,...)
- Objectifs : rien d'explicite
- Variables libres : matériau, et le procédé, en restant dans la famille des procédés par moulage ; la forme est, elle, imposée.

Pour mettre en place la démarche de sélection, on va utiliser le logiciel CES Edupack (le niveau 2 sera suffisant dans notre cas). On va se placer dans la base de données des matériaux, et on va imposer les critères résumés dans le cahier des charges (contraintes), et regarder si on est capable de respecter l'objectif proposé.

- 2) Au niveau des limites, on impose les différents critères matériaux explicites du cahier des charges : Propriétés mécaniques  $>$  Mesure de dureté Vickers : min = 8 HV + pour

les propriétés électriques, on va demander un bon isolant (conducteur ou isolant électrique ? > Bon isolant), même si cela va être redondant ici avec le fait de donner une valeur de rigidité diélectrique élevée, et donc imposer la rigidité diélectrique : Rigidité diélectrique (claquage Diélectrique) >  $10 \times 10000000\text{V/m}$  + pour les propriétés thermiques, on va demander là encore un bon isolant (conducteur ou isolant thermique ? > Bon isolant).

⇒ Sur les 100 matériaux proposés dans la base de données du logiciel (niveau 2), on a 20 matériaux qui sont validés (qui passent les premiers critères de sélection par arborescence)

2) On se posait aussi la question de la durabilité et de la tenue au feu, on va passer pour cela par un graphique, en demandant la catégorie Durabilité : environnement construits, et Attribut : Résistance aux UV (par exemple), et la Catégorie Durabilité : Inflammabilité et Attribut : Inflammabilité.

⇒ On obtient un tableau qui donne le nombre de matériaux disponibles dans la base données qui remplissent ces critères. On observe qu'on n'a aucun matériau qui possède une « excellente » durabilité à la fois aux UV et au feu, par contre on en a 3 qui proposent une « bonne » résistance aux UV et qui sont auto-extinguibles. En cliquant sur la case correspondant dans le tableau, on voit dans la fenêtre Résultats que ces 3 matériaux qui présentent un comportement acceptable sont le PVC, les résines phénoliques et le PEEK.

On élimine les résines phénoliques, thermo-durcissables, donc fragiles et cassantes, qui ne conviendraient peut être pas en termes de sécurité pour ce qui va être de la protection des personnes (ténacité faible).

4) On peut revenir à cette notion de ténacité, même si elle n'est pas clairement explicitée dans le cahier des charges, et donc demander un nouveau graphique avec ce paramètre (Catégorie Paramètres mécaniques, Attribut : Ténacité) et comme second axe, par exemple l'inflammabilité

⇒ On observe que les résines phénoliques ont effectivement les valeurs de ténacité les plus faibles ( $0.78$  à  $1.21 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ), et que le PVC, dans certaines nuances, permet d'obtenir les valeurs les plus élevées, supérieures à  $5 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ . Le PEEK lui présente des ténacités légèrement inférieures.

5) Pour discriminer maintenant ces 2 matériaux (thermoplastiques) restants, on peut se poser la question du coût. En changeant l'axe Inflammabilité du graphique pour le coût volumique, puisque la forme du boîtier est fixée (en définissant la formule prix x masse volumique (dans Propriétés générales))

⇒ On s'aperçoit que le PEEK est beaucoup plus cher que le PVC (rapport > 100). On privilégiera donc le PVC.