

Eco-conception – Quelques petits exercices

- I. Un fabricant de meubles de jardin en polypropylène (PP) est préoccupé par le fait que la concurrence « vole » une partie de son marché en affirmant que le matériau "traditionnel" pour les meubles de jardin, à savoir la fonte, est beaucoup moins consommatrice d'énergie et productrice de CO₂ que le PP. Une chaise en PP typique pèse 1.6 kg, son équivalent en fonte pèse 8.5 kg.



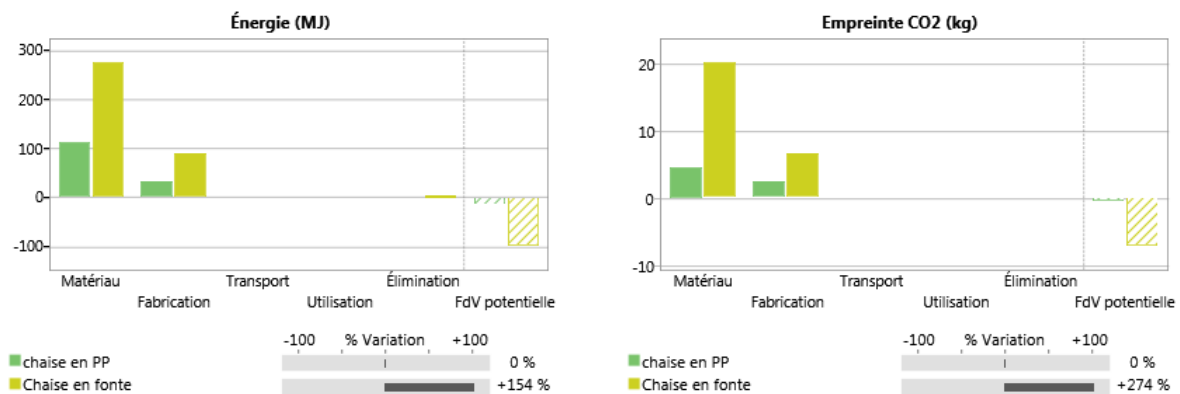
Utilisez les bases de données et les outils de comparaison du CES EduPack pour savoir qui a raison (on considérera pour cela les différentes étapes du cycle de vie du produit, et une mise en forme par moulage pour les deux matériaux). Les différences sont-elles importantes si on considère que les estimations sur les données relatives à l'énergie consommées ne sont exactes qu'à 20 % ? Si la chaise PP dure 5 ans et que la chaise en fonte dure 25 ans, la conclusion change-t-elle?

Le tableau énumère les valeurs moyennes d'énergie consommée et d'empreinte carbone, par kg, pour les deux matériaux, pour leur production, leur mise en forme et leur recyclage. Les deux dernières colonnes montrent les valeurs par chaise.

Si on ignore la différence au niveau de la durée de vie, une chaise en PP requiert significativement moins d'énergie, et produit moins de CO₂, que pour une chaise en fonte, à tous les stades de sa vie, même si on considère une erreur de 20% sur les données.

Si on considère cette fois la durée de vie plus longue de la chaise en fonte, et qu'on divise les valeurs par la durée de vie en années (pour donner de l'énergie consommée et le carbone émis par année), les chiffres sont plus resserrés, voire même la chaise en fonte gagne...

	Matériau	Energie grise (MJ/kg)	CO ₂ (kg/kg)	Energie grise par chaise (MJ/chaise)	CO ₂ (kg/chaise)
Production primaire	Fonte	30.8 - 34	2.26 - 2.49	261 - 289	19.2 - 21.2
	PP	65.9 - 72.6	2.77 - 3.06	105 - 116	4.4 - 4.9
Moulage	Fonte	10.1 - 11.2	0.76 - 0.84	86 - 95	6.5 - 7.1
	PP	20.4 - 22.5	1.53 - 1.69	33 - 36	2.4 - 2.7
Recyclage	Fonte	8.12 - 8.96	0.64 - 0.70	69 - 76	5.4 - 32.4
	PP	22.3 - 24.7	0.94 - 1.04	36 - 40	1.5 - 1.7



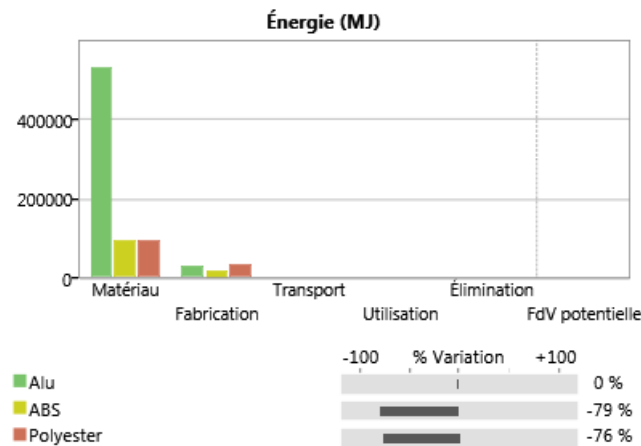
II. Des étuis (caisses de transport) identiques de perceuses électriques peuvent être fabriquées aluminium par moulage sous pression, ou bien en ABS ou en composites matrice polyester renforcé fibres de verre, par moulage.



Utilisez le CES EduPack pour comparer l'énergie consommée pour produire ces boîtes par unité de volume, et déterminer quel matériau minimise l'énergie consommée, en supposant que le même volume de matériau est utilisé pour chaque boîte.

L'énergie consommée par unité de volume (MJ/m^3), obtenue en multipliant l'énergie consommée par kg par la densité), en considérant à la fois la production du matériau et sa mise en forme, montre que c'est l'ABS qui requiert le moins d'énergie pour produire le boîtier (seulement un quart de l'énergie nécessaire pour produire le même boîtier en l'aluminium).

	Matériau	Energie grise (MJ/kg) pour le moulage	Masse volumique (kg/m^3)	Energie grise par unité de volume (MJ/m^3)
Production primaire	Alu	183 - 202	$2.65 - 2.77 \cdot 10^3$	$559.5 \cdot 10^3$
	ABS	87.7 - 96.7	$1.03 - 1.06 \cdot 10^3$	$102.5 \cdot 10^3$
	Composite	67.9 - 74.8	$1.04 - 1.4 \cdot 10^3$	$104.7 \cdot 10^3$
Moulage	Alu	10.9 - 12	$2.65 - 2.77 \cdot 10^3$	$33.2 \cdot 10^3$
	ABS	19.7 - 21.7	$1.03 - 1.06 \cdot 10^3$	$23.0 \cdot 10^3$
	Composite	25.3 - 27.9	$1.04 - 1.4 \cdot 10^3$	$39.1 \cdot 10^3$
Total	Alu	10.9 - 12	$2.65 - 2.77 \cdot 10^3$	$592.7 \cdot 10^3$
	ABS	19.7 - 21.7	$1.03 - 1.06 \cdot 10^3$	$125.5 \cdot 10^3$
	Composite	25.3 - 27.9	$1.04 - 1.4 \cdot 10^3$	$143.8 \cdot 10^3$



III. Des couverts jetables (figure 1) sont commandés par une pizzeria respectueuse de l'environnement. La forme de chacun (et donc la longueur, la largeur et le profil) est fixées, mais l'épaisseur est libre : elle est choisie pour donner suffisamment de rigidité de flexion pour couper et piquer la pizza sans flexion excessive.



Lors de son utilisation, une fourchette est chargée comme une poutre en porte-à-faux en flexion. La charge d'utilisation est de l'ordre de 2 N. Si une déflexion de 10 mm (!) est acceptable, la rigidité de flexion requise S est de 200 N/m.

La déviation d'une poutre de longueur L est donnée par l'équation : $S = 3 E I / L^3$, avec E est le module d'Young et I le moment quadratique avec $I = bt^3/12$. Pour une fourchette standard, la longueur L est d'environ 80 mm, la largeur b de 10 mm, et l'épaisseur t de 3 mm. On obtient que donne $I = 20 \times 10^{-12} \text{ m}^4$. Et donc avec une rigidité de flexion S de 200 N/m, on obtient une valeur max pour E de 1.7 GPa.

On peut procéder à un calcul similaire pour la force de rupture en utilisant l'expression $F = I \sigma_f / 1/2 t I$, avec F est la charge max d'utilisation et σ_f est la contrainte à rupture en flexion du matériau dont la fourchette est faite (contrainte que l'on peut assimiler ici à la contrainte à rupture du matériau). Cela donne une force max d'utilisation de 12 MPa. Une conception sûre nécessite un facteur de sécurité, qu'on prendra égal à 2.

Une fourchette jetable typique pèse environ 10 g. Le prix de vente d'un tel produit reste raisonnable s'il n'excède pas 0.05€, ce qui impose une limite de coût pour le matériau

d'environ 3.5€ par kg. De plus, le coût de mise en forme sera ici essentiel. Un processus de mise en forme direct à grande vitesse, sans finition, semble également essentiel ici, sachant qu'on se fixe une série de 100 000 pièces.

- a) *Traduisez le cahier des charges de ce produit. Mettez en place une démarche de sélection des matériaux pour proposer les meilleurs candidats pour cette application, associés à une technique de mise en forme.*
- b) *Le propriétaire de la pizzeria se flatte du caractère respectueux de l'environnement de son établissement. Aussi sa vaisselle jetable devra être au moins recyclable. Affiner votre choix de matériaux et procédés liés pour respecter ce nouveau critère.*
- c) *Le propriétaire de la pizzeria souhaite aller plus loin dans sa démarche de respect de l'environnement, et améliorer son image éco-responsable en minimisant le contenu énergétique de sa vaisselle jetable Déterminez un indice de performance matériau approprié pour la sélection des matériaux pour les fourchettes éco-énergétiques, en modélisant la fourchette par une poutre de longueur L et largeur b fixées, et d'épaisseur t libre, chargée dans une configuration de flexion 3 points, comme présenté sur la figure. L'objectif est de minimiser l'empreinte énergétique de la fourchette. La limite de flexion impose une contrainte de rigidité.*
- d) *Le fléchissement des couverts lors de leur utilisation est un inconvénient. Par contre, leur déformation plastique ou leur rupture, qui provoquent une perte de fonction, sont plus graves. Répétez l'analyse, en déterminant un nouvel indice de performance, lié à une force de flexion amenant à la plastification ou la rupture de la fourchette.*

a)

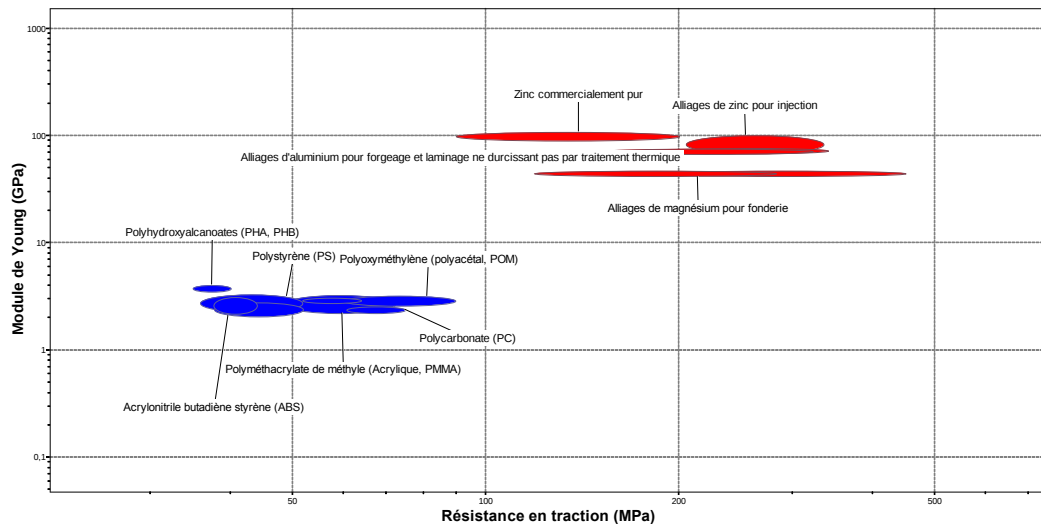
Fonction	Couverts jetables (éco-responsables)
Contraintes	- longueur L et largeur b fixées - rigidité $E > 1.7 \text{ GPa}$ - contrainte à rupture en traction (équivalent à flexion) $> 24 \text{ MPa}$ - cout limite pour le matériau de 3.5€ /kg - le procédé doit être compatible avec le matériau et avec une série de 100 000 pièces - les produits doivent être à minima résistant au contact alimentaire (à l'eau douce) + non toxiques (dernière catégorie)
Objectif	Minimiser le cout de la fourchette (puis minimiser l'empreinte énergétique)
Variables libres	La section (à travers l'épaisseur t), le matériau, avec le procédé de mise en forme associé

Lorsque l'on applique, sous forme de limites, les critères matériaux de contraintes en rigidité, en contrainte à la rupture et en cout, 23 matériaux sont retenus. Parmi eux, on trouve des métaux (aciers inox, alliages d'Al, de Mg et de Zn), des plastiques (dont PS, PET, PVC, PC, PMMA, epoxy, etc) et des céramiques (vitro-céramiques, verre sodocalcique) et des éléments naturels (ardoise).

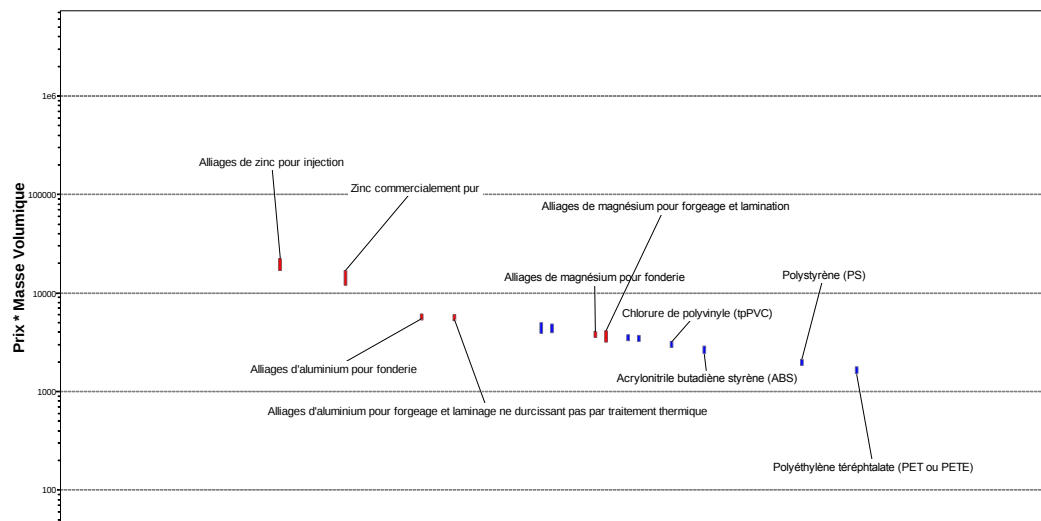
Compte tenu des requêtes en termes de mise en forme, sans rectification ultérieure, on s'oriente vers un procédé de moulage. En appliquant ce nouveau critère, il ne reste que 19 candidats qui répondent au cahier des charges.

On peut éliminer les matériaux céramiques et les plastiques thermodurs, trop fragiles et qui se brisent en éclatant. Ne restent que 14 candidats.

Si on regarde leurs caractéristiques méca, telles que le module et la contrainte à rupture, il apparait clairement que les métaux présentent une meilleure résistance méca que les polymères.



L'objectif ici est de minimiser le cout, si on trace le cout volumique (chaque fourchette aura la même forme, donc le même volume), soit prix x masse volumique, on remarque que les matériaux les plus chers sont les alliages de Zn et d'Alu. Les matériaux les moins chers répondant aux critères du cahier des charges sont le PET, le PS, l'ABS et le TpPVC.

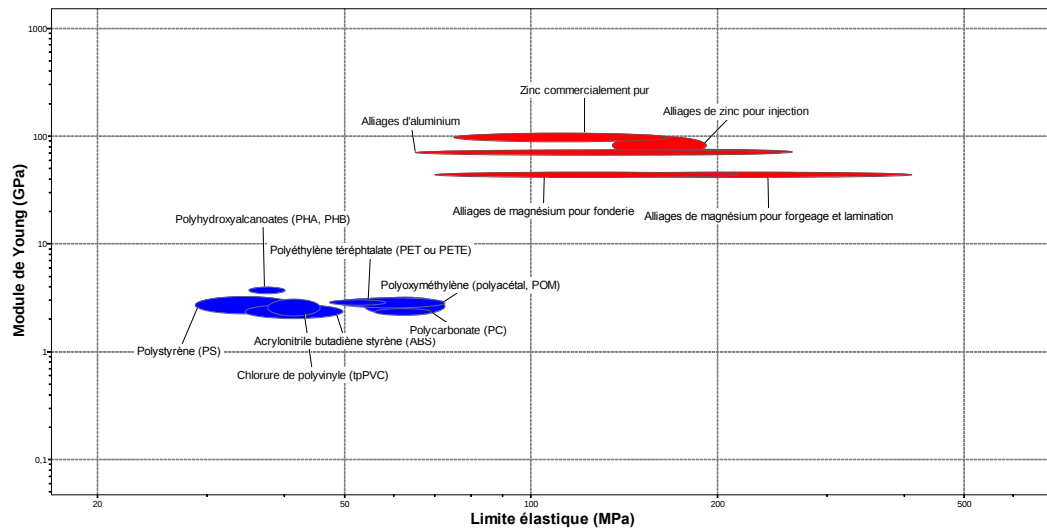


- b) Si on ajoute le critère de recyclabilité, les 4 plastiques retenus à l'étape précédente (PET, PS, ABS et tpPVC) passent ce critère : ils sont tous les 4 recyclables. Cependant si on regarde les fiches relatives à chacun, on remarque que le PET est couramment et facilement recyclé, le PS ne trouvant pas de débouché est habituellement mis en décharge et incinéré, tout comme le PVC et l'ABS, dont la combustion produit des déchets toxiques. Donc dans un souci de recyclabilité du produit, on privilégiera les couverts en PET.

- c) Les indices associés aux deux critères sont (avec H_p l'énergie grise)

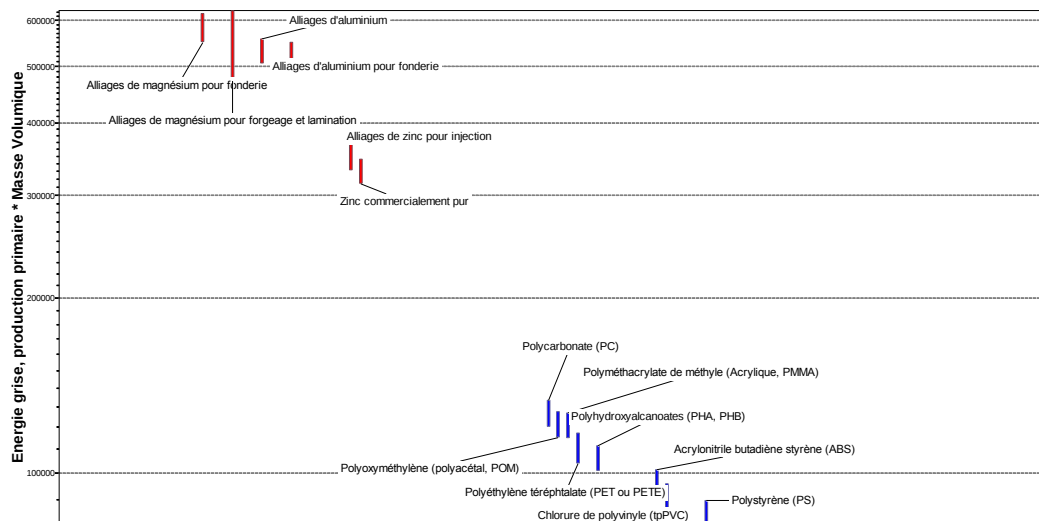
$$M_1 = \frac{E^{1/2}}{H_p \rho} \quad \text{and} \quad M_2 = \frac{\sigma_y^{2/3}}{H_p \rho}$$

Ces indices peuvent être implémentés dans le logiciel CES EduPack, en faisant un graphique avec l'indice de rigidité sur un axe et l'indice de force comme l'autre. Les matériaux qui répondent le mieux aux deux critères se trouvent en haut à droite.



- d) L'objectif est de minimiser l'empreinte énergétique de la fourchette. La variable libre est l'épaisseur t de la fourchette, assimilée à une poutre, toutes les autres dimensions sont fixées. Il y a deux contraintes alternatives : d'abord la fourchette ne doit pas trop fléchir, ou bien la fourchette ne doit pas plastifier ou casser.

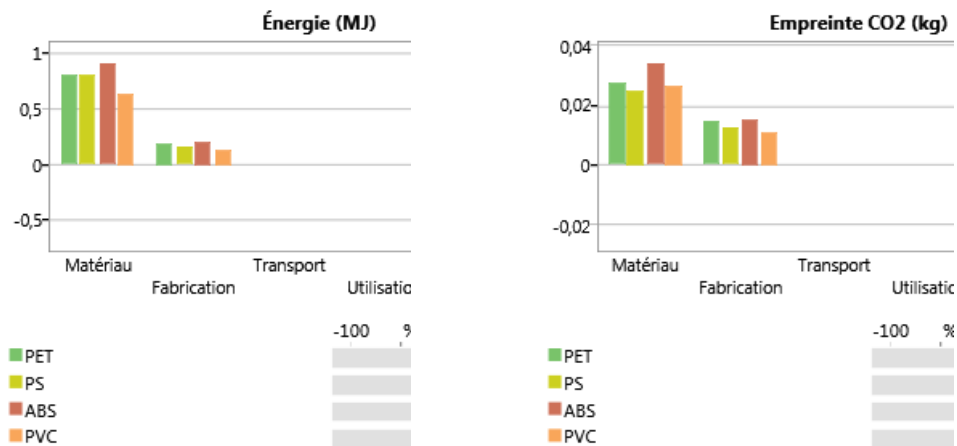
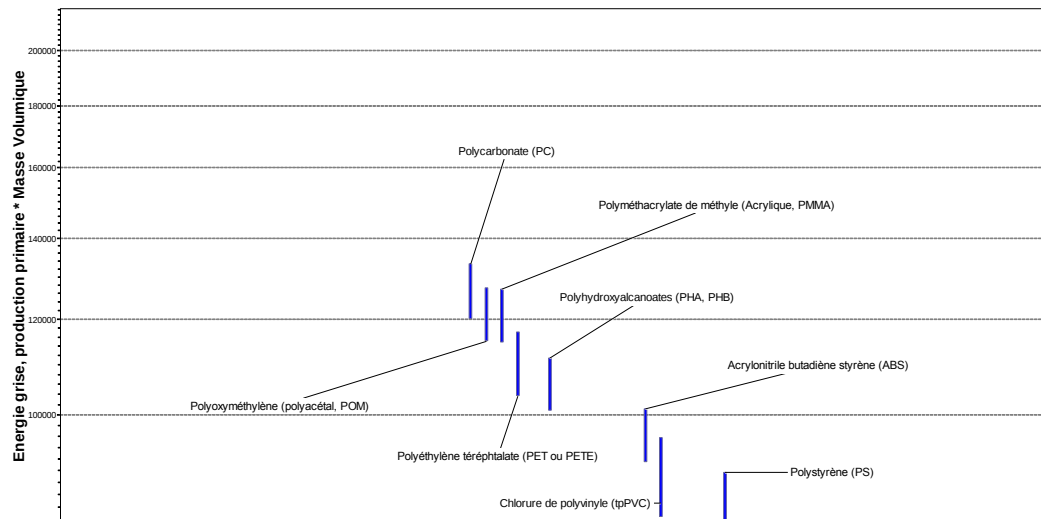
Si on s'intéresse à l'empreinte énergétique de ces matériaux, on s'aperçoit que l'empreinte énergétique des métaux est beaucoup plus importante que celle des plastiques : ils requièrent entre 4 et 5 fois plus d'énergie pour leur production primaire que les plastiques.



Si on se concentre sur les polymères, l'empreinte énergétique du PET est supérieure à celle du PS, du PVC et de l'ABS, tout en restant dans le même ordre de grandeur.

Si on réalise un mini-écoaudit de ces matériaux, on observe que la mise en œuvre de l'ABS requière plus d'énergie et rejette plus de CO_2 . Pour ce qui est de la dépense énergétique, le PVC est le matériau qui en demande le moins, suivi du PET et du PS qui se valent. En termes de rejet de CO_2 , c'est le PS qui est le meilleur candidat, suivi que PET, équivalent au PVC.

Mais compte tenu de leur caractère difficilement recyclables, voire potentiellement toxiques, on privilégiera toujours le PET.



IV. Les solives de plancher sont des poutres qui soutiennent les planchers dans les bâtiments, elles sont donc chargées en flexion lorsqu'on marche sur le sol. Ces solives peuvent être en bois, en acier ou en béton armé (renforcé de tiges d'acier), fonction de la nature du plancher qu'elles supportent. On cherche ici à savoir quel matériau présentera le plus faible impact environnemental pour cette application, à la fois pour une rigidité et une force de flexion données.

Les données pertinentes pour cette étude sont répertoriées dans le tableau ci-dessous, incluant la masse volumique ρ des matériaux, leur module d'Young E , leur contrainte à rupture en flexion σ_f , l'énergie consommée pour leur mise en œuvre H_p , et les facteurs de forme pour un calcul de résistance et un calcul de rupture en flexion Φ_B^e et Φ_B^f .

Material	Density ρ kg/m ³	Modulus E GPa	Strength σ_f MPa	Energy H_p MJ/kg	ϕ_B^e	ϕ_B^f
Soft wood	700	10	40	7.5	2	1.4
Reinforced concrete	2900	35	10	5	2	1.4
Steel	7900	210	200	30	15	4

- a) Commencez par l'étude de la force : déterminez l'indice de performance matériau pour des solives de masse minimale. Compte tenu de la différence de densité des différents matériaux proposés, adaptez cet indice en considérant que le volume des solives est fixé (travail à volume constant pour favoriser la comparaison des matériaux entre eux), c'est-à-dire multipliez l'énergie requise pour la mise en œuvre (en MJ/kg) par la masse volumique pour obtenir une valeur en MJ/m³. Utilisez l'indice modifié pour classer les trois matériaux en fonction de leur impact environnemental.
- b) Répéter la procédure, cette fois pour une étude en résistance, c'est-à-dire intégrant la déformation en flexion. Que concluez-vous au niveau de l'impact énergétique de la conception des solives en fonction des différents matériaux ?

On remarque tout de suite que l'acier présente les meilleures caractéristiques méca (module et résistance en flexion les plus élevés). Le béton armé a une plus grande raideur que le bois, mais une résistance en flexion plus faible. Au niveau de l'impact énergétique de la mise en œuvre de ces trois matériaux, l'acier est par contre là celui qui requiert le plus d'énergie...

- a) Pour une conception pour résister à la force de flexion, l'indice de performance est M_1 :

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{H_p \rho}$$

Material	E (GPa)	$H_p \rho$ (GJ/m ³)	ϕ_B^e	M_1 (GPa ^{1/2} /GJ/m ³)
Wood	10	5.25	2	0.86
Concrete	35	14.5	2	0.57
Steel	210	238	15	0.23

- b) Pour une conception pour résister à la force de flexion et à la déflexion, l'indice de performance est M_2 :

$$M_2 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{H_p \rho}$$

Material	σ_f (MPa)	$H_p \rho$ (GJ/m ³)	ϕ_B^e	M_2 (MPa ^{2/3} /GJ/m ³)
Wood	40	5.25	1.4	2.8
Concrete	10	14.5	1.4	0.4
Steel	200	238	4	0.36

L'acier est donc le matériau qui requiert le moins d'énergie pour sa mise en œuvre pour des solives, tout en présentant les meilleures caractéristiques mécaniques.