

# Critères de choix des matériaux et procédés

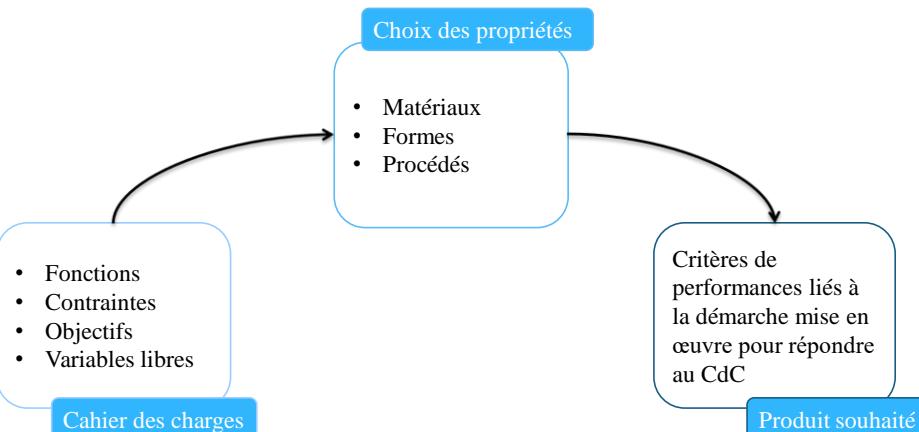
Cahier des techniques de l'ingénieur T 5 100 – Choix et usage des matériaux

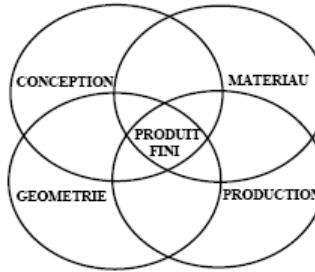
Cahier des techniques de l'ingénieur AM 3 810 – Conception d'un objet

Cahier des techniques de l'ingénieur A 5 090 – Cahier des charges fonctionnel

Cahier des techniques de l'ingénieur T 4 100 – Analyse de la valeur

Materials selection in mechanical design, M.F. ASHBY, Pergamon Press.





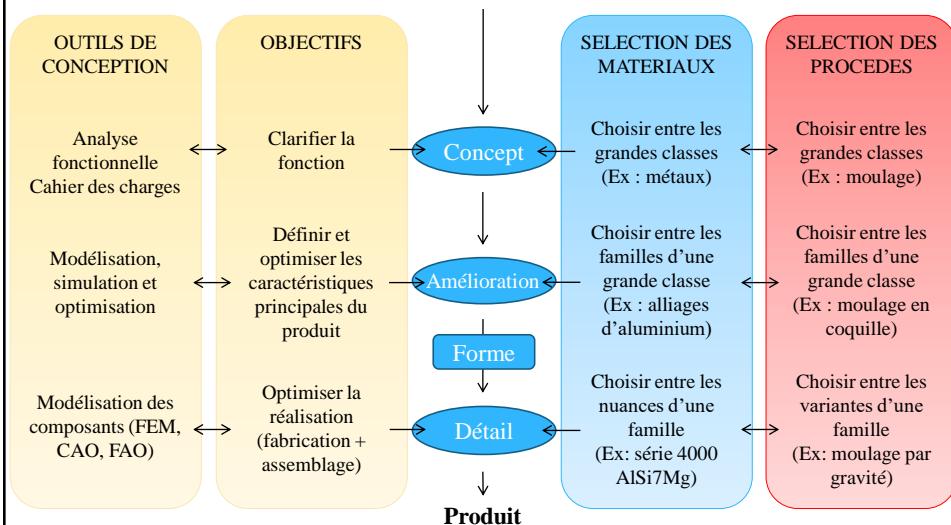
On estime à **60 000** le nombre de **matériaux** disponibles et à environ **6 000** le nombre de **procédés** possibles ⇒ Disposer d'une **procédure systématique** pour sélectionner le procédé et le matériau le mieux adapté à une fonction ou à une pièce donnée.

La méthode doit permettre d'expliciter de façon objective les requêtes du **cahier des charges** et de comparer la performance de matériaux/procédés très différents pour une fonction donnée (**indices de performance**).

Pour pouvoir choisir efficacement parmi un grand nombre de matériaux et de procédés, il est naturel d'avoir recours à des **banques de données** et à des **logiciels d'aide à la sélection**.

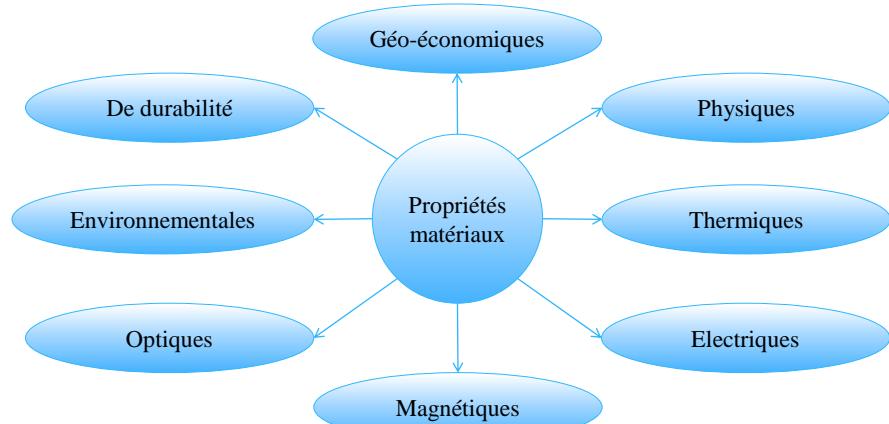
### 1. La sélection des matériaux et procédés dans la démarche de conception

#### BESOIN DU MARCHE



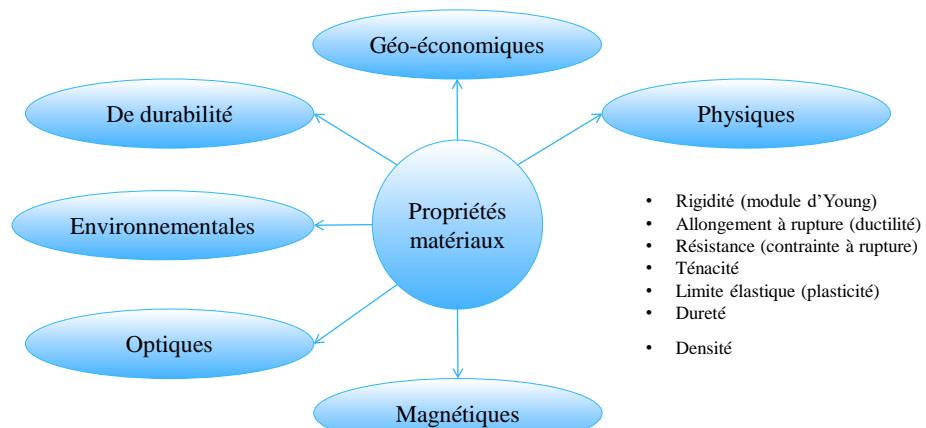
## 1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables  
 Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



## 1. Propriétés des matériaux

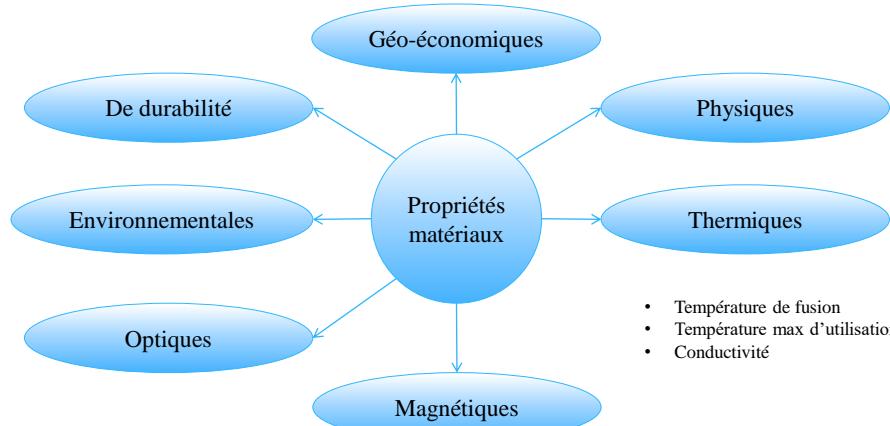
Quantitatives : chiffrées, mesurables  
 Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



## 1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

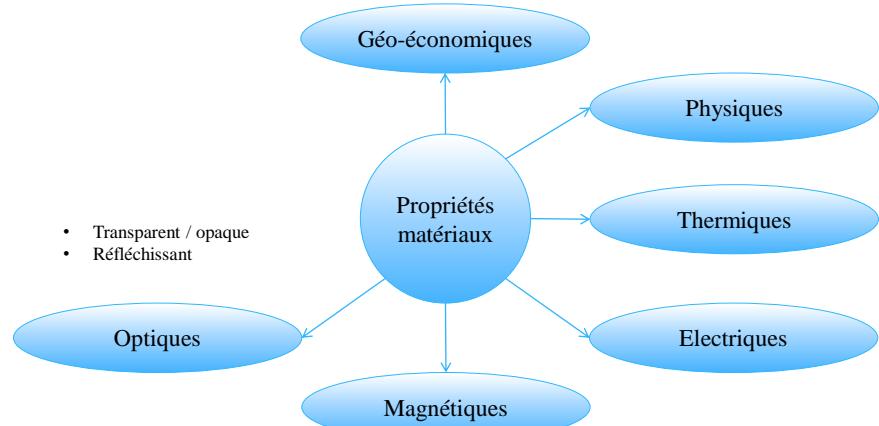
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



## 1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

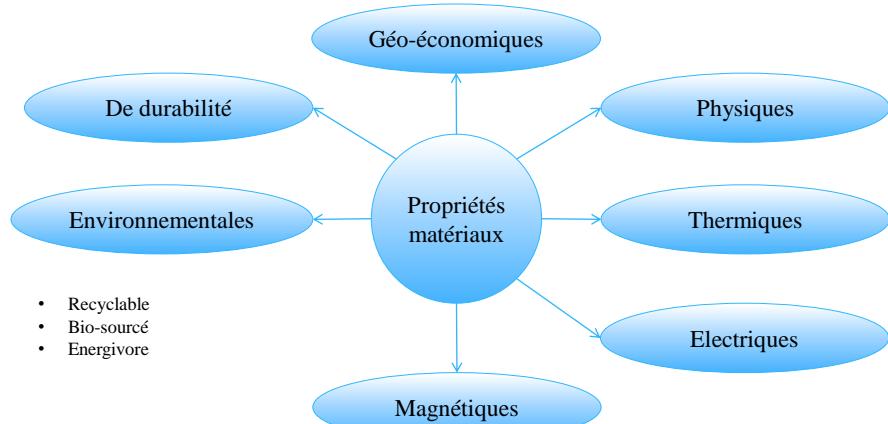
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



## 1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

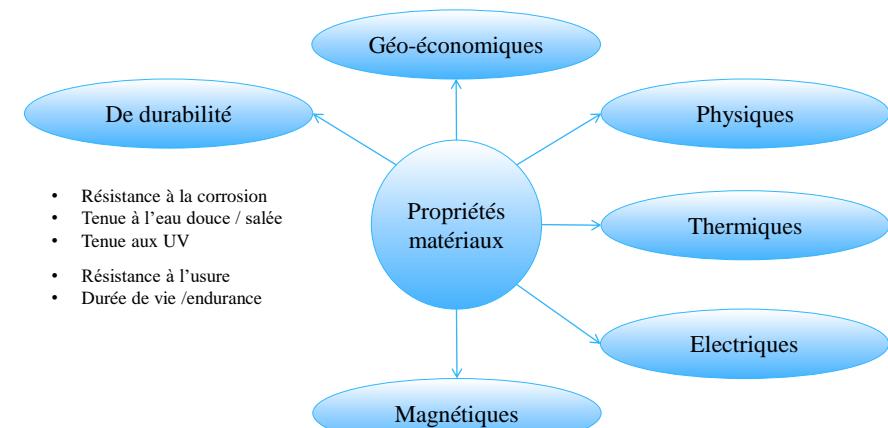
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



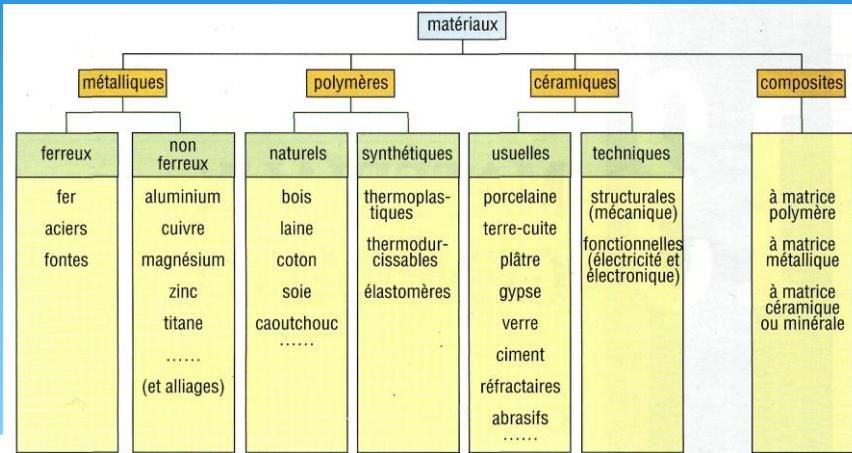
## 1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



## 1. Propriétés des matériaux



## 1. Propriétés des matériaux

**Les métaux** : matériaux dont les atomes sont unis par des liaisons métalliques = atomes ionisés entourés d'un nuage d'électrons libres  $\Rightarrow$  **bons conducteurs électriques et thermiques**

Ce sont des solides **opaques** qui **réfléchissent la lumière**

Ce sont des solides cristallisés, suivant des structures généralement compactes

⇒ les métaux ont une **densité élevée**

Ni : 9.8, Fe : 7.8, Cr : 7.1, Ti : 4.5, Al : 2.7, Mg : 1.7

- + la plupart sont **durs** et **rigides**,  
avec une certaine **ductilité** et une bonne **ténacité**
  - + la plupart possèdent une **température de fusion**



Structures cristallines des métaux : principes maitres			
type	maille cubique centre	maille cubique à face centrale	maille hexagonale compacte
forme de la maille			
volume occupé par les atomes	$V = 0,074 \mu^3$ 2 atomes par maille	$V = 0,174 \mu^3$ 4 atomes par maille	$V = 0,274 \mu^3$ est de la maille 8 atomes par maille
empilements	Na, Mn, Cr, Cu, W, Mo, V, Li, Zr, Ta, Ba, Cu = BCC	Al, Mg, Ag, Cr, Pt, Ni, Au, Pd, Ti, Cr, Cd, Cu = FCC	Li, Cs, Be = HCP
propriétés	haute résistance bonnes propriétés électriques et thermiques	résiste au coachtement et à la corrosion	fragiles

## 1. Propriétés des matériaux

Les métaux :



## 1. Propriétés des matériaux

**Les céramiques** : matériaux dont les atomes sont unis par des liaisons fortes et directionnelles (ioniques ou covalentes)

⇒ les électrons liés sont peu mobiles ⇒ **isolants électriques**



Ces liaisons sont très énergétiques

⇒ **températures de fusion très élevées**

+ **très bonne tenue en température** (réfractaires)



+ **dureté élevée** (grande résistance à l'usure)  
bonne résistance mécanique  
mais **grande fragilité**

Masse volumique moyenne  
**Inertie chimique**

PROPRIÉTÉS	ALUMINIC 97,6% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ALUMINIC 99,5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NITRURE D'ALUMINUM	ZIRCONIE ZrO <sub>2</sub>	CARBURE SILICIUM	NITRURE SILICIUM
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	3,6	3,85	3,33	5,65	3,2	3,3
Porosité (% absorption eau)	0	0	0	0	0	0
Résistance à la flexion (Mpa)	295	310	300	545	400	700
Résistance à la compression (Mpa)	1750	2100	2000	1700	2200	2500
Module Young (Gpa)	320	370	310	205	410	300
Ténacité (Mpa.m <sup>1/2</sup> )			3,35	6	4	7
Dureté	HR 45N 75	HR 45N 81		IV 0,3 1120	HV0,5 2600	HV0,5 1450
Conductivité therm. (W/mK)	26,8	29,3	180	2,5	125	25
Coefficient dilatation thermique linéaire 25 à 1000°C (10 <sup>-6</sup> °C)	9	9,4	5,6	10	5,2	4
Température maxi. d'utilisation (sous charge) (°C)	1650	1725	1200	1000	1800	1400

## 1. Propriétés des matériaux

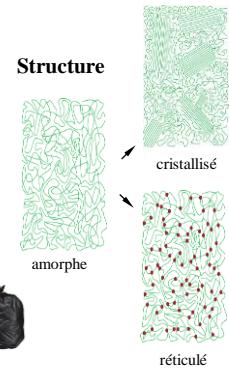
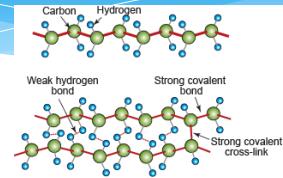
**Les polymères** : assemblages de macromolécules organiques, liées entre elles par des liaisons faibles (Van Der Waals, hydrogène dans les thermoplastiques) ou covalentes (dans les thermodurcissables)

⇒ **masse volumique faible** (généralement < 1.5)

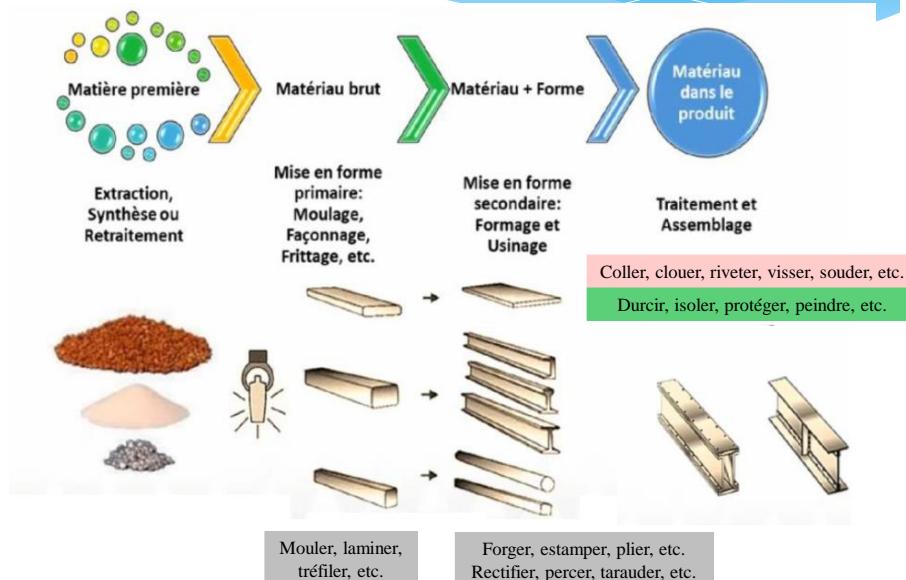
- + **matériaux souples** ( $E < 3\text{GPa}$ )
- + **isolants électriques et thermiques**

Ne sont stables **qu'à des températures modérées** (ramollissent/fondent à des températures entre 100 et 250°C)

Caractéristiques physiques moyennes de quelques polymères thermoplastiques usuels <sup>12</sup>						
Code	Densité	Taux de cristallinité (%)	$T_g$ (°C)	$T_f$ ou $T_d$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	Module $E$ (GPa)
ABS	1.04-1.12	0	85-125	105-120	200-205	2.5
PA-6	1.13	60	62	215	95	1
PA6,6	1.14	50	57	260	90	1.5
PC	1.26	0	150	220-250	120	2.4
PE-HD	0.96	80-96	-110	124-135	90	0.8-1.2
PELD	0.92	50-70	-110	100-125	70	0.15-0.3
PET amorphe	1.30	0	65-80	250	100	2.7
PET cristallé	1.46	40	65-80	260	100	4.1
PMMA	1.18	0	105	130-140	60-90	3
PP	0.91	60-70	-10	165	100	1.3
PS à cristal	1.05	0	80-100	100	60	3.2
PVC rigide	1.36	0-5	80	100-120	65	2.4

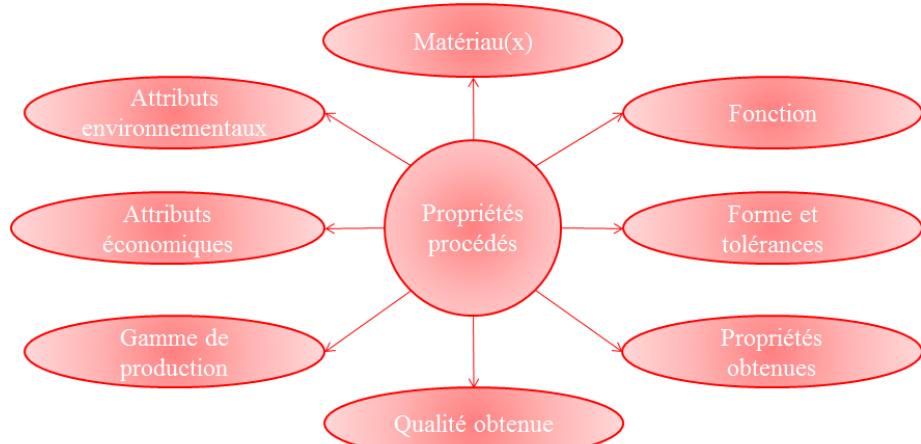


## 1. Propriétés des procédés

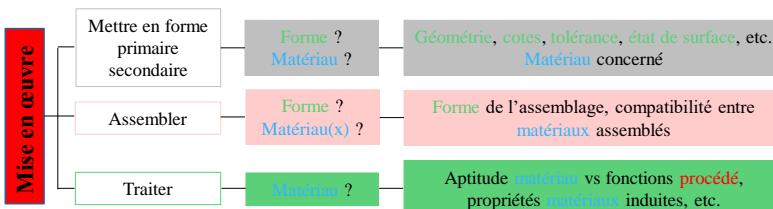


## 1. Propriétés des procédés

Quantitatives : chiffrées, mesurables  
 Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



## 1. Interactions matériaux/procédés/forme



Formes liées au procédé :

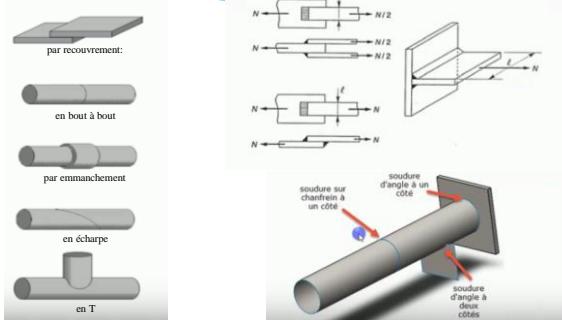
- 1D : poteau, tuyau, gouttière, mât
- 2D : paque, tôle, vitre, boîte, canette
- 3D : culasse, bielle, engrenage, profilé



## 1. Interactions matériaux/procédés/forme

### Formes liées à l'assemblage :

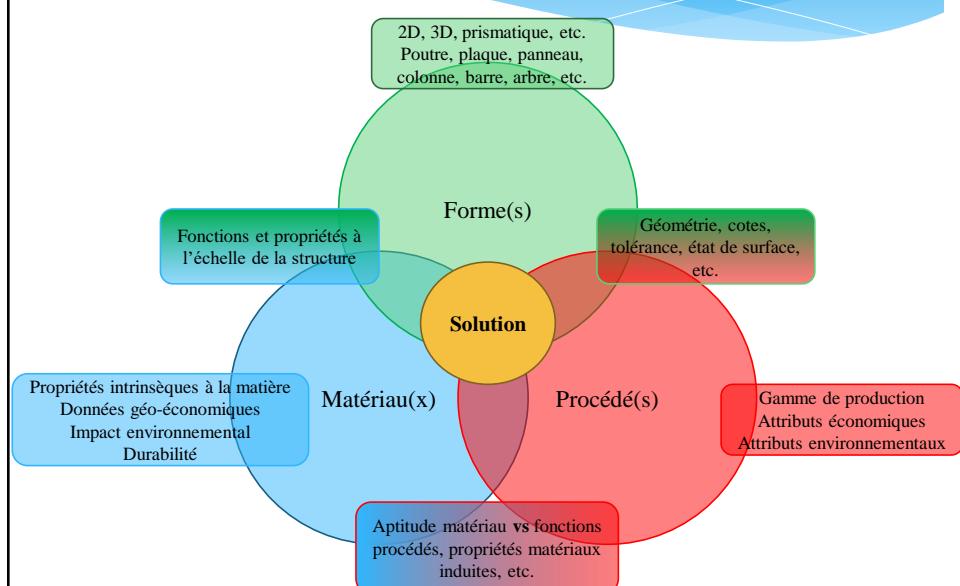
- Assemblages thermiques (soudage, brasage)
- Assemblages mécaniques (boulonnage, rivetage, sertissage, clinchage...)
- Assemblage physico-chimique (collage)

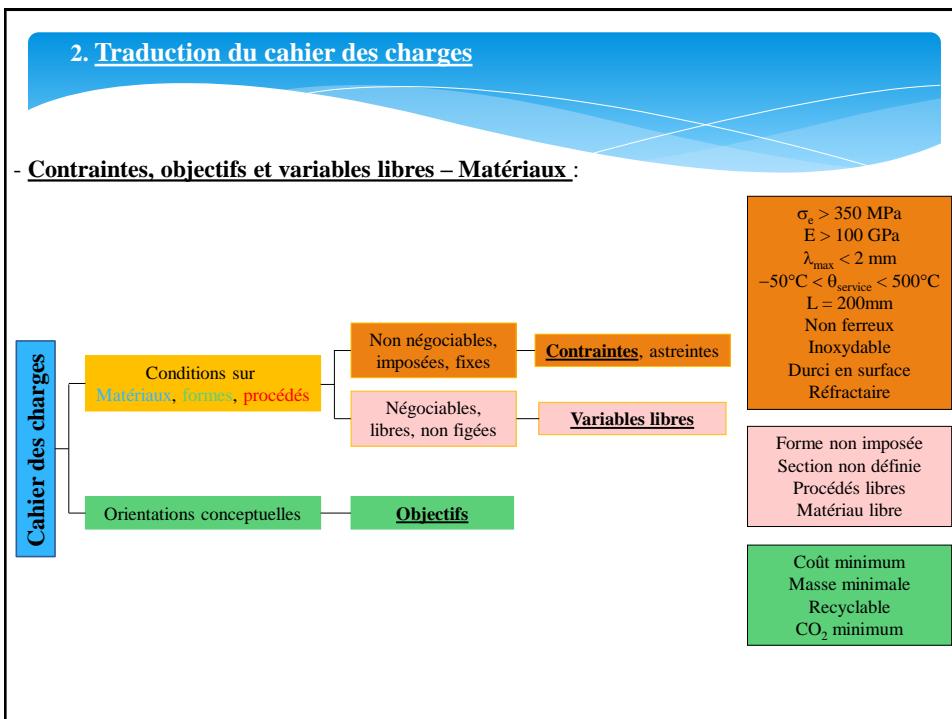
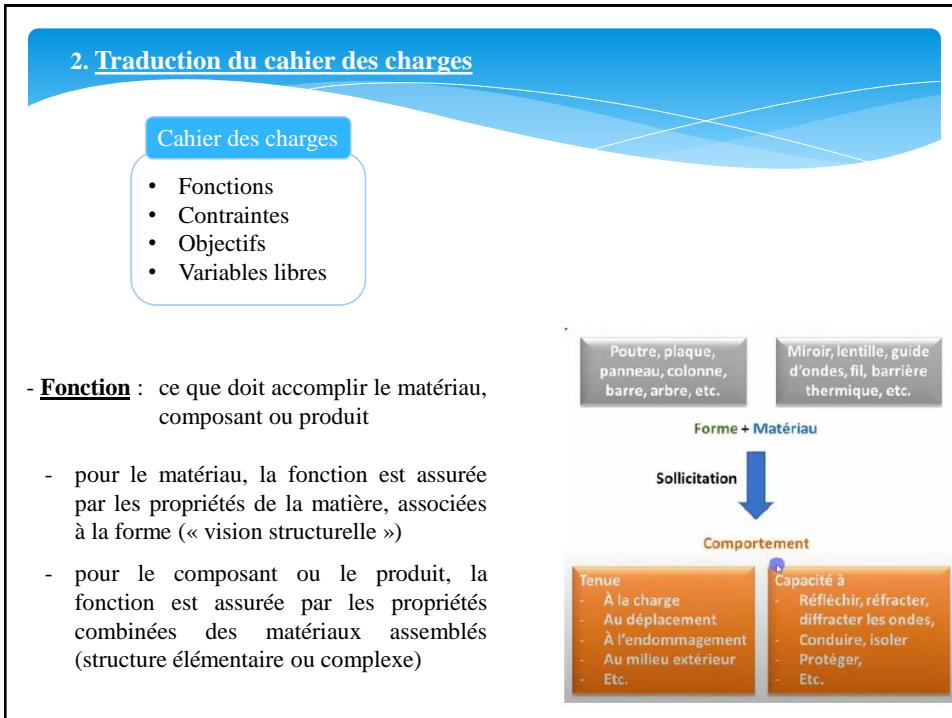


### Fonctions liées au traitement :

- modification des propriétés matériau (traitements thermiques, thermochimique, mécaniques, dopage...)
- ajout d'une propriété (revêtement, traitement électrochimique,...), majoritairement **anti-corrosion / anti-usure**
- action sur l'esthétique (peinture, bandeau, stickers,...)

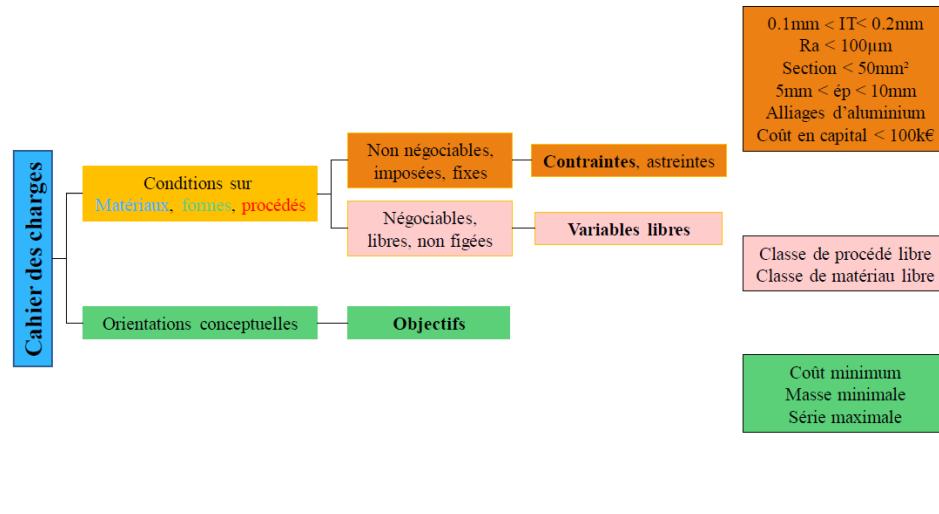
## 1. Interactions matériaux/procédés/forme





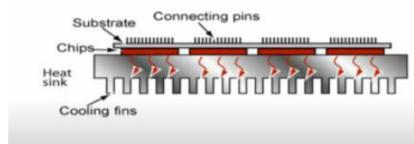
## 2. Traduction du cahier des charges

### - Contraintes, objectifs et variables libres - Procédés :



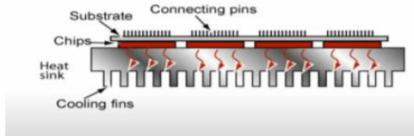
## 2. Exemples de traduction du cahier des charges

**Radiateur thermique pour le refroidissement d'un processeur électronique** : un client souhaite choisir un matériau pour un radiateur thermique, qu'il a préalablement dessiné et dimensionné, pour refroidir des processeurs. 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°C, et que pour un bon refroidissement du processeur, il faut que le matériau du radiateur présente une conduction thermique supérieure à 25 W/m.°C.



## 2. Exemples de traduction du cahier des charges

**Radiateur thermique pour le refroidissement d'un processeur électronique** : un client souhaite choisir un matériau pour un radiateur thermique, qu'il a préalablement dessiné et dimensionné, pour refroidir des processeurs. 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°C, et que pour un bon refroidissement du processeur, il faut que le matériau du radiateur présente une conduction thermique supérieure à 25 W/m.°C.

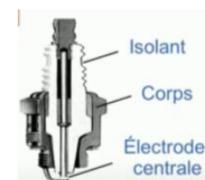


- Fonction : évacuer la chaleur d'un composant électronique
- Contraintes : de façon explicite, le matériau doit être un conducteur thermique, avec une conduction thermique  $> 25 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$  + le radiateur doit admettre dans sa température maximale de service 200°C + la forme est imposée par le client + non explicitées : il faut un matériau 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.

## 2. Exemples de traduction du cahier des charges

**Mise en forme d'isolant de bougie** : dans une entreprise fabriquant des bougies d'allumage, une machine permettant de fabriquer les isolants des bougies vient de tomber en panne. Le client souhaite revoir sa ligne de production incluant ces isolants, et trouver un moyen de production qui pourrait remplacer celui qui est en panne, tout en minimisant le coût de production..

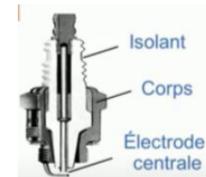
L'isolant à mettre en forme est un composant en alumine, d'une masse proche de 50g, avec une section d'épaisseur comprise entre 3 et 5 mm. Les tolérances dimensionnelles imposées doivent être inférieures à 0.5 mm, avec une rugosité inférieure à 100µm. La série de production est d'au minimum 2 000 000 de pièces.



## 2. Exemples de traduction du cahier des charges

**Mise en forme d'isolant de bougie** : dans une entreprise fabriquant des bougies d'allumage, une machine permettant de fabriquer les isolants des bougies vient de tomber en panne. Le client souhaite revoir sa ligne de production incluant ces isolants, et trouver un moyen de production qui pourrait remplacer celui qui est en panne, tout en minimisant le coût de production..

L'isolant à mettre en forme est un composant en alumine, d'une masse proche de 50g, avec une section d'épaisseur comprise entre 3 et 5 mm. Les tolérances dimensionnelles imposées doivent être inférieures à 0.5 mm, avec une rugosité inférieure à 100 $\mu$ m. La série de production est d'au minimum 2 000 000 de pièces.



- Fonction : mettre en forme des isolants
- Contraintes : matériau imposé (alumine) et forme de la pièce imposée + une masse de 50g, une épaisseur comprise entre 3 et 5 mm, des tolérances dimensionnelles > 0.5mm et une rugosité < 100 $\mu$ m + série minimale de 1 00 000 de pièces
- Objectifs : minimiser le coût de production
- Variables libres : procédé (matériau et forme imposés)

## 3. Procédure de sélection : méthode des indices de performance

- Choix des propriétés
  - Matériaux
  - Formes
  - Procédés

- Performances souhaitées
  - Minimales
  - Maximales
  - Optimisées

Systèmes d'équations Fonctions

- Propriétés
  - $\rho$
  - $E$
  - $\sigma_e$
  - $L$
  - $S$

- Performances souhaitées
  - $m = \rho \cdot L \cdot S$
  - $C = C_m \cdot m$
  - $F = \sigma_e \cdot S$
  - $\Delta L = F \cdot L / E \cdot S$

Systèmes d'équations Fonctions

### 3. Procédure de sélection : indice simple à une seule propriété



Visière de protection pour motocyclistes

#### Contraintes

- Transparent – de qualité optique
- Capacité à être moulé

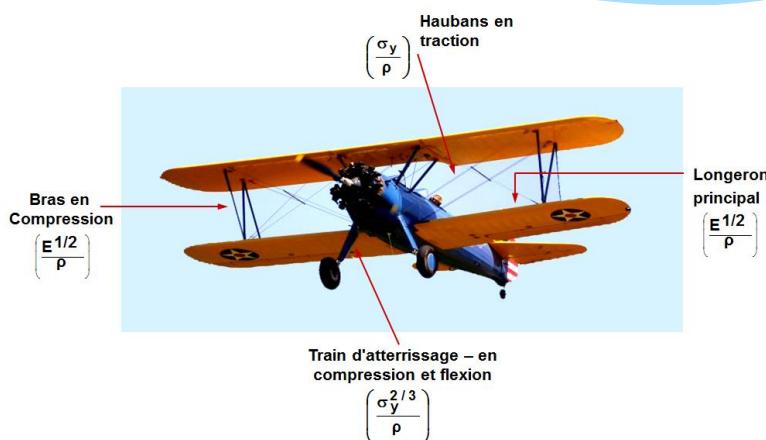
#### Objectif : aussi tenace que possible

Indice de performance : ténacité  $K_{ic}$   
À maximiser

#### Objectif alternatif : le moins cher possible

Indice de performance : coût de matériau  $C_m$   
À minimiser

### 3. Procédure de sélection : indice combinant les propriétés



$E$  = Module d'Young

$\rho$  = Densité

$\sigma_y$  = Limite élastique

### 3. Mise en œuvre de la méthode des indices de performance

1 - Traduction du CdC pour définir l'ensemble des données et quantités nécessaires	2 - Ecriture des équations de dimensionnement et des critères de performances liés au objectifs	3 - Vérification du système d'équations	4 - Dissociation des données libres / imposées dans les équations de performance	5 - Extraction des indices de performance
<p>Fonctions Contraintes Objectifs Variables libres</p> <p></p> <p>Tirant de longueur L connue devant résister en élasticité à un effort de traction F, à un coût C minimal</p>	<p>Données utiles à leur définition Optimisation souhaitée (minimisation ou maximisation)</p>	<p>Remonter aux inconnues les plus « basiques » Vérifier que nombre d'équations = nombre d'inconnues Si non, supprimer / imposer des inconnues ou des équations (retour étape 2)</p>	<p>Conserver les quantités imposées et les constantes Paramétriser les quantités libres non matériau Réitérer jusqu'à remplacer toutes ces quantités libres (si besoin, ajouter des équations à l'étape 2)</p>	<p>Isoler les quantités imposées et les constantes pour définir une fonction imposée non négociable Isoler les quantités libres matériau pour définir une fonction d'optimisation Utiliser la fonction d'optimisation comme indice de performance de l'objectif ciblé</p>

F : résister à la traction  
C : force F, longueur L  
O : coût C minimal  
VL : section S, matériau, (procédé)

$$F = \sigma_e \cdot S$$

$$C = C_m \cdot m$$

$$m = \rho \cdot L \cdot S$$

$$F = \sigma_e \cdot S$$

$$C = C_m \cdot \rho \cdot L \cdot S$$

$$C = C_m \cdot \rho \cdot L \cdot F / \sigma_e$$

$$C = (L \cdot F) \cdot (C_m \cdot \rho / \sigma_e)$$

$$C \Leftrightarrow C_m \cdot \rho / \sigma_e$$

Dimensionnement

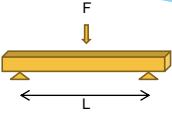
Choix Matériaux

### 3. Mise en œuvre de la méthode des indices de performance

Dimensionnement :	Longueur L imposée	Section S libre		
Fonction	Contraintes	Objectif	Variables libres	Résultat
$F, L$		Minimiser la mase m	$\text{Matériaux, forme, procédé}$	
Assurer la résistance en élasticité à un effort de traction F	$F = \sigma_e \cdot S$	$m = \rho \cdot L \cdot S$	$\sigma_e, \rho, S, \text{procédé}$	$m = \rho \cdot L \cdot F / \sigma_e$ $I_1 = \rho / \sigma_e$
Contrôler l'allongement élastique sous un effort de traction F	$F/\Delta L = k = E \cdot S/L$	$m = \rho \cdot L \cdot S$	$\sigma_e, \rho, S, \text{procédé}$	$m = \rho \cdot L \cdot k \cdot L / E$ $I_2 = \rho / E$

### 3. Mise en œuvre de la méthode des indices de performance

Dimensionnement :  
Longueur  $L$  imposée  
Section  $S$  libre, mais carrée de côté  $c$



Fonction	Contraintes	Objectif	Variables libres	Résultat
	$F, L$	Minimiser la masse $m$		Matériau, forme, procédé

---

Assurer la résistance en élasticité à un effort de flexion  $F$

$$\sigma_f = M_f y / I_z$$

$$\sigma_f = 0.5 \cdot F \cdot L / (4 \cdot E \cdot I_z)$$

$$\sigma_f = C_1 \cdot F \cdot L / S^{3/2}$$

$$S^{3/2} = C_1 \cdot F \cdot L / \sigma_f$$

$$S = (C_1 \cdot F \cdot L / \sigma_f)^{3/2}$$

$$m = \rho \cdot L \cdot S$$

$$\sigma_e, \rho, S, \text{procédé}$$

$$m = \rho \cdot L \cdot (C_1 \cdot F \cdot L / \sigma_f)^{3/2}$$

$$I_3 = \rho / \sigma_f^{3/2}$$


---

Contrôler la flèche élastique sous un effort de flexion  $F$

$$y'' = M_f / E \cdot I_z$$

$$y'' = F \cdot L / (4 \cdot E \cdot I_z)$$

$$y_{\max} = \lambda = F \cdot L^3 / (48 \cdot E \cdot I_z)$$

$$F = (48 \cdot E \cdot I_z / L^3) \cdot \lambda$$

$$F / \lambda = (C_2 \cdot E \cdot S^2 / L^3) = k_f$$

$$m = \rho \cdot L \cdot S$$

$$S^2 = k_f \cdot L^3 / (C_2 \cdot E)$$

$$S = (k_f \cdot L^3 / (C_2 \cdot E))^{1/2}$$

$$\sigma_e, \rho, S, \text{procédé}$$

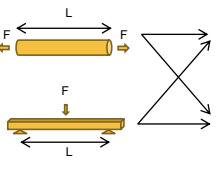
$$m = \rho \cdot L \cdot (k_f \cdot L^3 / (C_2 \cdot E))^{1/2}$$

$$I_4 = \rho / E^{1/2}$$

### 3. Mise en œuvre de la méthode des indices de performance

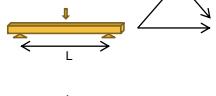
Fonction	Contraintes	Objectif	Variables libres	Résultat

Rigidité



Coût minimal

Résistance



Poids minimal

Epaisseur

$$I_1 = \rho / \sigma_e$$

Section

$$I_2 = \rho / E$$

Largeur

$$I_3 = \rho / \sigma_f^{3/2}$$

Longueur

$$I_4 = \rho / E^{1/2}$$

Fatigue

Géométrie

Flèche minimale

Impact environnemental minimal

Conductivité thermique

Déplacement minimal

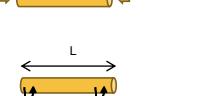
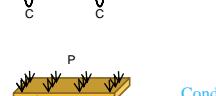




Tableau 1 – Indices de performance en rigidité à masse minimale		Tableau 2 – Indices de performance en solidité à masse minimale	
Fonction et contrainte	Indice de performance (1) (2)	Fonction et contrainte	Indice de performance (1) (2)
<b>Barre de traction</b> Rigidité et longueur spécifiées, section libre	$E/p$	<b>Barre de traction</b> Solidité et longueur spécifiées, section libre	$R_e/p$
<b>Arbre de torsion</b> Rigidité, longueur et forme spécifiées, section libre Rigidité, longueur, rayon externe spécifiés, épaisseur libre Rigidité, longueur, épaisseur spécifiées, rayon externe libre	$G^{1/2}/\rho$ $G^{1/2}/\rho$ $G^{1/3}/\rho$	<b>Arbre de torsion</b> Solidité, longueur et forme spécifiées, section libre Solidité, longueur, rayon externe spécifiés, épaisseur libre Solidité, longueur, épaisseur spécifiées, rayon externe libre	$R_e^{2/3}/\rho$ $R_e/\rho$ $R_e^{1/2}/\rho$
<b>Poutre en flexion</b> Rigidité, longueur, forme spécifiées, section libre Rigidité, longueur, hauteur spécifiées, largeur libre Rigidité, longueur, largeur spécifiées, hauteur libre	$E^{1/2}/\rho$ $E/p$ $E^{1/3}/\rho$	<b>Poutre en flexion</b> Solidité, longueur, forme spécifiées, section libre Solidité, longueur, hauteur spécifiées, largeur libre Solidité, longueur, largeur spécifiées, hauteur libre	$R_e^{2/3}/\rho$ $R_e/p$ $R_e^{1/2}/\rho$
<b>Colonne soumise au flambement</b> Longueur, charge, forme spécifiées, section libre	$E^{1/2}/\rho$	<b>Colonne soumise au flambement</b> Longueur, charge, forme spécifiées, section libre	$R_e/p$
<b>Plaque en flexion</b> Rigidité, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$E^{1/3}/\rho$	<b>Plaque en flexion</b> Rigidité, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$R_e^{1/2}/\rho$
<b>Plaque en compression</b> Charge, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$E^{1/3}/\rho$	<b>Plaque en compression</b> Charge, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$R_e^{1/2}/\rho$
<b>Cylindre sous pression interne</b> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiées, épaisseur libre	$E/p$	<b>Cylindre sous pression interne</b> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiées, épaisseur libre	$R_e/p$
<b>Coquille sphérique sous pression</b> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiées, épaisseur libre	$E/(1-\nu)$	<b>Coquille sphérique sous pression</b> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiées, épaisseur libre	$R_e/p$
(1) Pour avoir les indices à coût minimal et à volume minimal, il suffit de remplacer $\rho$ masse volumique par $\rho_c$ ou par 1 respectivement. (2) $G$ = module de cisaillement $C$ = coût $E$ = module d'élasticité.		<b>Volants d'inertie</b> Énergie cinétique par unité de volume maximale, vitesse imposée Énergie cinétique par unité de masse maximale, pas de rupture	$\rho$ $R_e/p$
		(1) Pour avoir les indices à coût minimal et à volume minimal, il suffit de remplacer $\rho$ masse volumique par $\rho_c$ ou par 1 respectivement. (2) $C$ = coût $R_e$ = limite d'élasticité.	

Tableau 3 – Indices de performance en tolérance au dommage	
Fonction et contrainte	Indice de performance (1)
<b>Barre de traction</b> Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en charge Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en déplacement Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en énergie	$K_{Ic}$ et $R_e$ $K_{Ic}/E$ et $R_e$ $K_{Ic}^2/E$ et $R_e$
<b>Arbre de torsion</b> Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en charge Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en déplacement Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en énergie	$K_{Ic}$ et $R_e$ $K_{Ic}/E$ et $R_e$ $K_{Ic}^2/E$ et $R_e$
<b>Poutre en flexion</b> Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en charge Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en déplacement Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en énergie	$K_{Ic}$ et $R_e$ $K_{Ic}/E$ et $R_e$ $K_{Ic}^2/E$ et $R_e$
<b>Cylindre sous pression interne</b> Plastification avant rupture Fuite avant rupture	$K_{Ic}/R_e$ $K_{Ic}^2/R_e$
(1) $K_{Ic}$ : facteur d'intensité de contrainte en MPa $\sqrt{m}$ . $E$ : module d'élasticité. $R_e$ : limite d'élasticité.	

### 3. Utilisation des indices de performance : cartes de sélection

Les cartes de sélection offrent une utilisation très visuelle des indices de performance, et malgré leur caractère approximatif, permettent souvent un premier « débroussaillage » du problème.



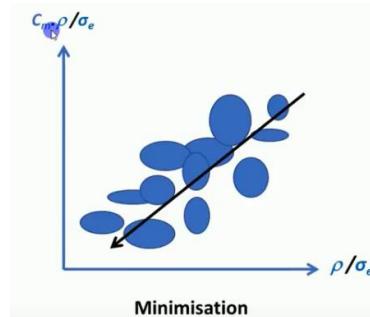
Fonction : résister à la contrainte

Contraintes : F, L imposées

Objectifs : minimiser le coût ( $I_1$ ) et la masse ( $I_2$ )

$$I_1 = C_m \cdot \rho / \sigma_e$$

$$I_2 = \rho / \sigma_e$$



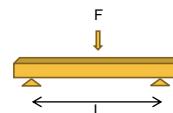
### 3. Utilisation des indices de performance : cartes de sélection

Plan de visualisation métrique :



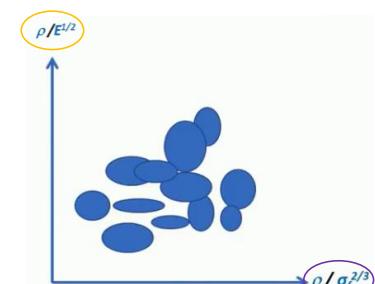
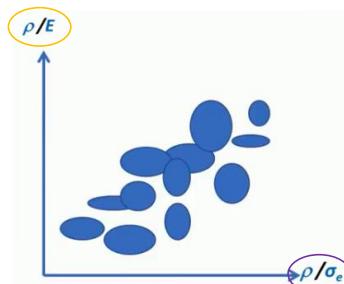
$$I_1 = \rho / E$$

$$I_2 = \rho / \sigma_e$$



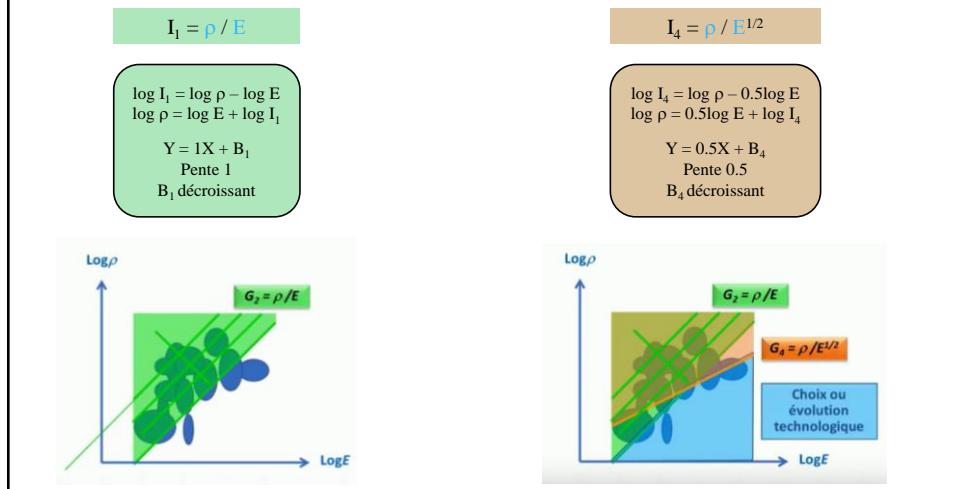
$$I_3 = \rho / \sigma_f^{3/2}$$

$$I_4 = \rho / E^{1/2}$$



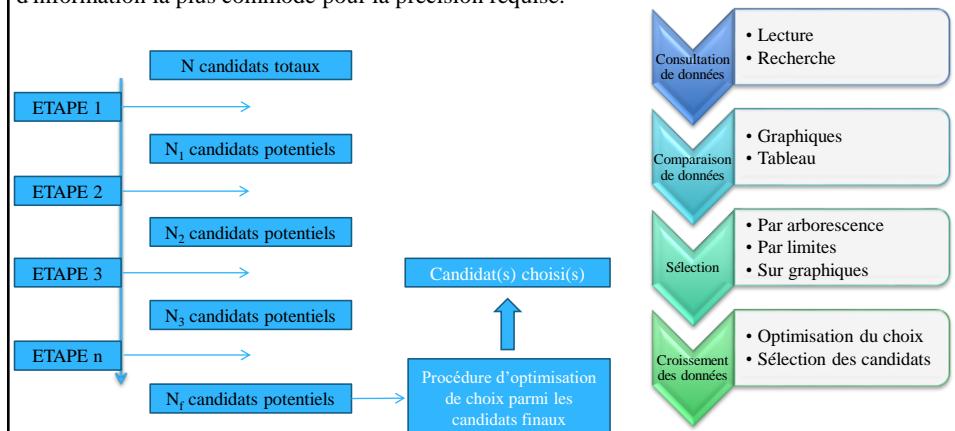
### 3. Utilisation des indices de performance : cartes de sélection

Plan de visualisation **métrique** :



### 4. Sources et banques de données

La nature et la **précision des données** requises dans la procédure de conception et dans les différentes étapes de sélection des matériaux **varient considérablement suivant le degré d'avancement dans la procédure**. À chaque étape, il conviendra donc de sélectionner la source d'information la plus commode pour la précision requise.



#### 4. Sources et banques de données

Les sources d'information sont traditionnellement données par livres, catalogues et fiches techniques de fournisseurs. De plus en plus, ces données existent maintenant sous forme de banques de données informatisées consultables en ligne (payantes ou non) :

- Généralistes : Matweb, Matdata (de CES Design), Azom, [www.materio.com](http://www.materio.com) (payant), etc.
- Spécialisées :
  - matériau type platine : PGM Database
    - polymères : PolyInfo, Omnexus, Campus Plastics GEM (materiautech), etc.
    - semi-conducteurs : NSM Archive
    - aciers : Construire Acier (anciennement OTUA), etc.
    - alliages d'Al et non-ferreux : Euralliage, etc.
    - matériaux de construction : Innovatechs
  - Revues spécialisées : emballagedigest
  - Centre techniques d'informations et de tests : Cetim, [www.cetiba.tn](http://www.cetiba.tn) (Bâtiment)

#### 4. Logiciels d'aide à la sélection

Un système informatique d'aide à la sélection des matériaux comporte bien sûr une banque de données :

- soit sur un ensemble très vaste de matériaux,
- soit au contraire sur une classe très étroite de matériaux sur laquelle on aura des données beaucoup plus précises.

Mais c'est aussi un système de sélection, c'est-à-dire qu'il est capable *a priori* d'explorer cette base de données en utilisant pour guide des critères de sélection.

Ces critères peuvent relever de l'archivage de connaissances ; c'est le cas des logiciels conçus pour la promotion d'un matériau : ils proposent de faire une recherche de matériau par **application**.

On peut aussi explorer la base de données à partir des **propriétés** des matériaux ; c'est le cas de la plupart des systèmes qui proposent une aide à la sélection : on cherchera par exemple les alliages qui ont une limite d'élasticité supérieure à 250 MPa.

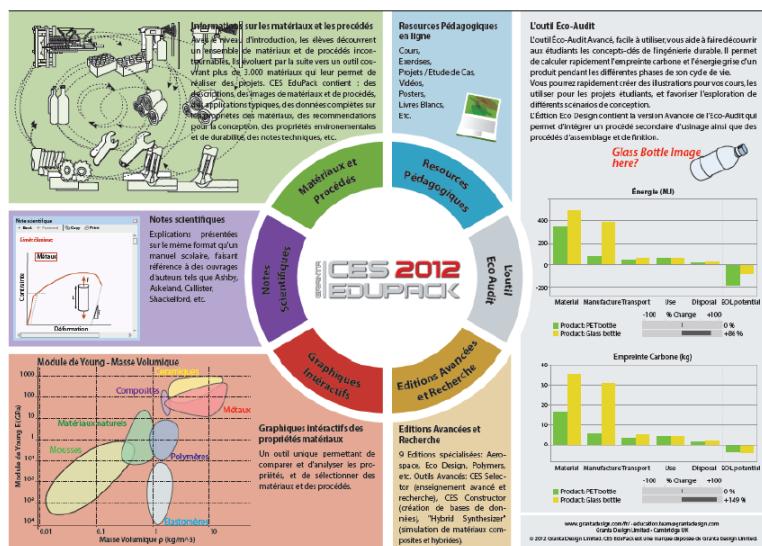
#### **4. Logiciels d'aide à la sélection des matériaux / procédés**

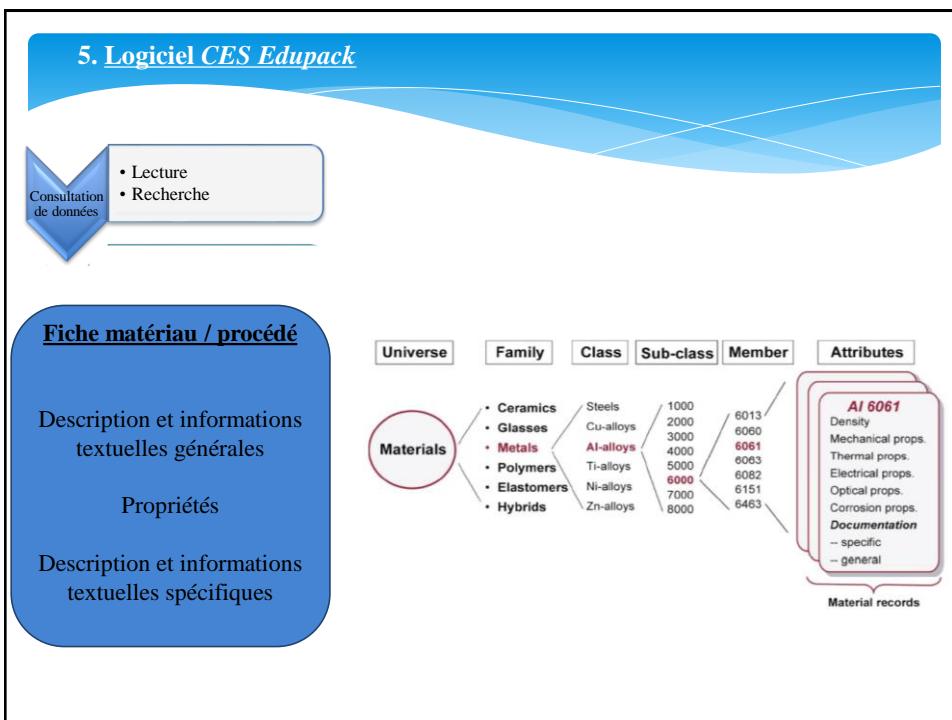
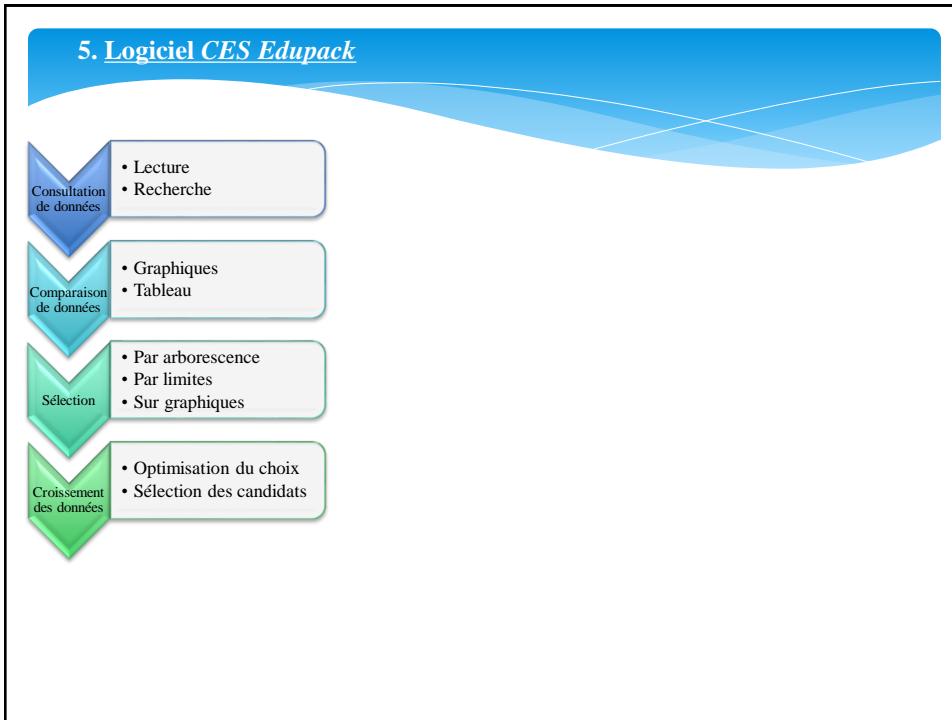
Deux systèmes leaders permettent une sélection non seulement à partir des propriétés matériau, mais aussi à partir des **indices de performance**:

- Le logiciel CES Granta (CES Edupack, CES Selector, Granta MI,...), développé à Cambridge, permet, à partir d'une banque de données de matériaux, de tracer les cartes de sélection appropriées au problème considéré : sur les axes on peut indiquer des propriétés, des indices de performance, des caractéristiques qualitatives des matériaux (soudabilité, tenue à la corrosion...) et on peut effectuer avec l'ordinateur des sélections en série, mettant en jeu de multiples critères.
  - Le logiciel Fuzzymat, développé à Grenoble, est complémentaire du *CES Granta*, en ce sens qu'il s'attache à gérer les problèmes de sélection multicritère, tout en permettant d'aider à la pondération des critères de sélection. La spécificité informatique du logiciel *Fuzzymat* est de permettre par une technique de logique floue de gérer la possibilité de renoncer à certaines exigences si l'on peut gagner sur d'autres performances ; cette possibilité est particulièrement utile en sélection de matériaux où tout est affaire de compromis.

On peut ajouter à ces deux logiciels, d'autres logiciels tels que TotalMateria, ou des logiciels spécifiques de certains corps de métiers.

## 5. Logiciel *CES Edupack*





## 5. Logiciel CES Edupack

V
  
Consultation de données

- Lecture
- Recherche

### Fiche matériau / procédé

Description et informations textuelles générales

Propriétés

Description et informations textuelles spécifiques

**Aluminum, 6061, T4**

Disposition : All attributes Afficher/Masquer

Metals and alloys > Non-ferrous > Aluminum > wrought > 6000 series(Mg and Fe-alloyed) > 6061 >

**General information**

Designation i  
6061, wrought

Condition i T4 (Solution heat-treated and naturally aged to a substantially stable condition)

UNS number i A96061

EN name i EN AW-6061 (EN AW-Al Mg1SiCu)

EN number i 3.3211

**Typical uses** i  
Trucks, towers, canoes, railroads cars, furniture, pipelines, and other structural applications where strength, weldability, and corrosion resistance are needed

**Composition overview**

**Compositional summary** i  
Al96-99 / Mg1.8-2.2 / Si0.4-0.8 / Cu0.15-0.4 / Cr0.04-0.35 (impurities: Fe<0.7, Zn<0.25, Mn<0.15, Ti<0.15, Other<0.15)

Material family	①	Metal (non-ferrous)
Base material	①	Al (Aluminum)
Al (aluminum)	①	* 95.6 - 98.6 %
Cr (chromium)	①	0.04 - 0.35 %
Cu (copper)	①	0.15 - 0.4 %
Fe (iron)	①	0 - 0.7 %
Mg (magnesium)	①	0.8 - 1.2 %
Mn (manganese)	①	0 - 0.15 %
Si (silicon)	①	0.4 - 0.8 %
Ti (titanium)	①	0 - 0.15 %
Zn (zinc)	①	0 - 0.25 %
Other	①	0 - 0.15 %

**Composition detail (metals, ceramics and glasses)**

Element	Al (aluminum)	Cr (chromium)	Cu (copper)	Fe (iron)	Mg (magnesium)	Mn (manganese)	Si (silicon)	Ti (titanium)	Zn (zinc)	Other
Al (aluminum)	① * 95.6 - 98.6 %									
Cr (chromium)	① 0.04 - 0.35 %	①								
Cu (copper)	① 0.15 - 0.4 %	①	①							
Fe (iron)	① 0 - 0.7 %	①	①	①						
Mg (magnesium)	① 0.8 - 1.2 %	①	①	①	①					
Mn (manganese)	① 0 - 0.15 %	①	①	①	①	①				
Si (silicon)	① 0.4 - 0.8 %	①	①	①	①	①	①			
Ti (titanium)	① 0 - 0.15 %	①	①	①	①	①	①	①		
Zn (zinc)	① 0 - 0.25 %	①	①	①	①	①	①	①	①	
Other	① 0 - 0.15 %	①	①	①	①	①	①	①	①	①

## 5. Logiciel CES Edupack

V
  
Consultation de données

- Lecture
- Recherche

### Fiche matériau / procédé

Description et informations textuelles générales

Propriétés

Description et informations textuelles spécifiques

**Extrait d'une fiche de matériau : le polypropylène**

**Polypropylène (PP) (CH<sub>2</sub>-CH(CH<sub>3</sub>)<sub>n</sub>)**

Le polypropylène, PP, dans la première production commerciale date de 1958, est le frère cadet du polyéthylène : une molécule très semblable avec un peu, des méthodes de mise en œuvre et des applications très similaires. Il est produit dans de très grandes quantités (plus de 30 millions de tonnes par an en 2000), avec un taux de croissance de presque 10% par an. Comme le PE (polyéthylène), il est un plastique très polyvalent qui peut être ajusté par une catalyse intelligente, donnant un contrôle précis au fabricant à l'impôt et des propriétés qui améliorent son aptitude à servir dans de nombreux domaines pour le polypropylène : PP est dégradé à la lumière solaire. Des propriétés de PP sont très similaires à celles du PE, mais lui donner une très bonne stabilité aux rayonnements UV qu'à l'eau douce ou salée ainsi qu'à la plupart des solutions aquatiques.

**Propriétés Générales**

Propriété	Donnée	Unité
Densité	0.900	kg/m <sup>3</sup>
Prise	1.102	1.61 USD/kg

**Propriétés Mécaniques**

Propriété	Donnée	Unité
Module de Young	0.896	1.55 GPa
Module de cisaillement	0.3158	0.5483 GPa
Module de compression	2.1	2.6 GPa
Coefficient de Poisson	0.4052	0.4252
Mesure de dureté Vickers	6.2	11.2 HV
Limite élastique	27.7	41.4 MPa
Résistance en traction	27.6	41.4 MPa
Résistance à la compression	25.1	55.2 MPa
Élongation à la cassure	100	%
Limite de fatigue	11.04	16.56 MPa
Ténacité	1	1.04 MPa m <sup>0.5</sup>
Coefficient d'amortissement	0.02581	0.04000

**Propriétés Thermiques**

Propriété	Donnée	Unité
Conducteur ou isolant thermique?	Conducteur	Bon isolant
Conductivité thermique	0.113 - 0.160 W/m.K	
Coefficient de dilatation	122.4 - 180 ppm/K	
Chaleur spécifique	1870 - 1950 J/kg.K	
Température de cristallisation	120 - 125 K	
Température de transition vitreuse	248 - 258 K	
Température maximale d'utilisation	350 - 380 K	
Température minimale d'utilisation	150 - 200 K	

**Propriétés Électriques**

Propriété	Donnée	Unité
Conducteur ou isolant électrique?	Conducteur	Bon isolant
Conductivité électrique	3.32x10 <sup>-2</sup> - 3e23	300m cm
Conductivité thermique	0.113 - 0.160 W/m.K	
Facteur de puissance	5e-4 - 7e-4	
Tension de claquage	22.7	24.6 - 1e9 V/m

**Conseillers pour la conception**

Le PP standard est un bon marché, léger et ductile mais il a une faible tenue mécanique. Il est plus rapide que le PE et peut être utilisé à plus hautes températures. Les propriétés du PP sont semblables à celles du PE mais il est plus rigide et fond à une température plus élevée. Il est donc moins propice à la fabrication de pièces complexes et peut être difficile à travailler avec des fibres de verre de la crème ou du talc. Lorsqu'il est étiré en fil, le PP a une résistance et une résilience exceptionnelles. Cela, ainsi que sa résistance à l'eau, en font un matériau intéressant pour les cordages et les tressis. Il est plus facile à imprimer que le PE et peut être imprimé à une vitesse élevée. Le PP est couramment produit sous forme de feuilles, de produits moulés et de fibres, il peut également être moulé. Les développements des catalyseurs promettent de nouveaux copolymères de PP avec des combinaisons plus intéressantes de résistance mécanique, de stabilité et facilité de mise en œuvre. Les fibres monofilament sont un autre domaine à l'avenir et sont presque deux fois moins coûteux que les fibres PE. Les fibres monofilament ou les cordes à monofilament sont très courantes.

**Notes techniques**

Les toutes premières polypropylènes tombent dans trois groupes de base : les homopolymères (polypropylènes avec toute une gamme de poids moléculaires et donc de propriétés), copolymères (faits par copolymérisation du propylène avec d'autres molécules), et l'ultimo, le bâtonnets ou le filaments (polypropylènes réalisées avec du mica, des billes ou des fibres de verre, qui sont rigides et résistent mieux à la chaleur que les simples polypropylènes).

**Applications typiques**

Cordages, pêces techniques, cordes d'ar, fibres à ar, et plages arrêtées pour l'automobile, mobilier de jardin, tambour de machines à laver, boîtier de batterie, boîtier et raccords, caisses de bouteilles de bière, coupes de chaise, capacités d'absorption d'eau, sacs à cendre, boîtes, parfums de voiture, vitrage anti-effraction, caisses de manutention, valises, gauze synthétique, sous-vêtements thermiques.

24

## 5. Logiciel CES Edupack

- Lecture
- Recherche

**Extrait d'une fiche de procédé : le moulage par injection**

**Moulage par injection**

Aucun autre procédé n'a plus changé la conception de produits que le moulage par injection. Il a permis de développer de nouveaux matériaux dans tous les secteurs de la conception de produits : des produits de consommation, des articles de bureau, des pièces industrielles, des ordinateurs, des imprimantes, des appareils électroniques, des voitures et pour la recherche, des jouets, des emballages de cosmétiques et des équipements de sports. L'équipement le plus courant pour le moulage des thermoplastiques est le moulage par injection. Le principe est représenté schématiquement dans l'illustration. Les granules de polymère sont amenés dans une cuve de polymérisation et sont ensuite chauffés pour atteindre une consistance pâleuse qui peut être forcée de passer par un ou plusieurs canaux (carottes) dans le moule. Le polymère se solifie en maintenant une pression (pression de refroidissement). Les pièces sont alors éjectées

Le moulage par injection est recommandable et les éléments peuvent être fabriqués chacun par injection. La co-injection permet le moulage de pièces avec des matériaux, des couleurs ou des caractéristiques différents. Le moulage par injection est également recommandable pour la fabrication de pièces moulées en utilisant un gaz inerte ou un agent de goulage chimique pour faire des pièces qui ont une peau compacte et une structure interne cellulaire.

**Attributs économiques**

Coût initial de l'équipement	Haut
Coût relatif de la production	Très haut
Importance de la main-d'œuvre	Faible

**Caractéristiques du procédé**

Discontinu	True
------------	------

**Recommandations pour la conception**

Le moulage par injection est le meilleur moyen de produire en masse des petits articles en polymère, précis et avec des formes compliquées. Le fait de suivre les bonnes pratiques pour changer la texture et le décor en modifiant le moule et des détails fins sont bien recommandés. On peut surmonter de nombreuses difficultés qui apparaissent à la surface des pièces (voir décoration dans la partie 10 et opération de finition et le décoratifs).

**Notes techniques**

On peut moulé par injection la plupart des thermoplastiques, bien que ceux qui ont une température de fusion élevée (i.e. le PTFE) soient difficiles à injecter. On peut mettre en œuvre par injection les compétences fondamentales pour la conception et la fabrication de pièces moulées par injection. Des changements importants dans la section des pièces ne sont pas recommandés. Des petits angles en contre-dépouille et des formes complexes sont recommandés, bien que certaines caractéristiques (i.e. contre-dépouilles, parties flottantes d'inserts) peuvent nécessiter des modifications. On peut utiliser des supports pour la production de pièces moulées par injection et la fabrication de l'élastomère. L'équipement le plus courant pour le moulage des thermoplastiques est la presse avec vis réciprocante (cf. illustration). Le polymère fonds s'écoule devant la vis et la force à reculer (vis réciprocante). Lorsqu'une quantité suffisante de matière fondue a été accumulée devant la vis, on lui applique une pression assez élevée pour empêcher la pénétration de la matière dans les canaux et la formation d'une peau compacte et une structure interne cellulaire. Pendant que le polymère se solifie, on maintient une certaine pression après pression de matériau qui permet de compenser la rétractation de la matière due au refroidissement. Lorsque la matière est suffisamment solide, l'objet est ejected.

**Utilisations typiques**

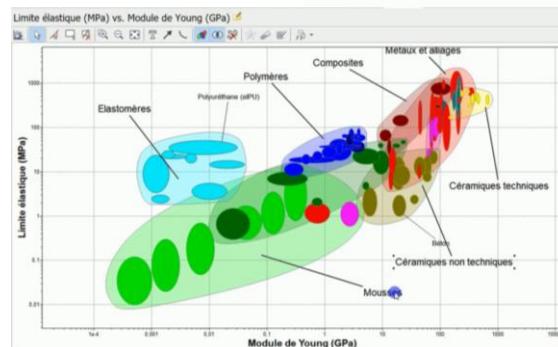
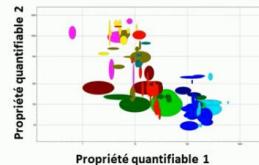
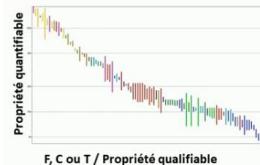
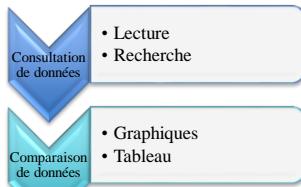
Étiquettes, vêtements, des capes, des roupas, des couvertures, des boutons, des poignées d'outils, des pièces de plomberie, des lentilles etc.

**Les données économiques**

Le coût en capital est relativement élevé, les coûts d'exploitation sont relativement élevés - ce qui rend le moulage par injection économiquement peu recommandable pour les petits articles. Les coûts d'exploitation peuvent être élevés pour les articles avec de nombreuses parties et de nombreux détails fins.

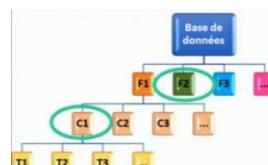
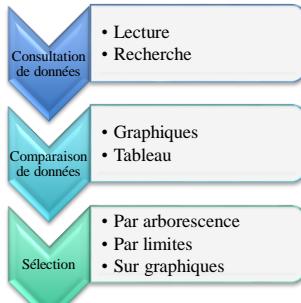
Les moulages multi-empreinte sont parfois utilisés. Les moulages de plusieurs parties peuvent être faits en utilisant des moulages multi-empreinte faits dans des matériaux meilleur marché.

## 5. Logiciel CES Edupack

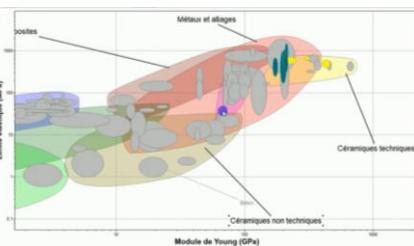
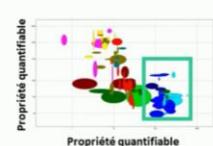


Propriété qualifiable 2	Nombre de candidats				
	1	2	3	4	5
Propriété qualifiable 1	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+
	+	+	+	+	+

## 5. Logiciel CES Edupack



Prop. 1	Seuil min	Seuil max
Prop. 2	Seuil min	
Prop. 3	Vraie	
Prop. 4		Seuil max
...		
Prop. n	Seuil min	Seuil max



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

Pb : retour de boîtiers de CD en polystyrène (PS) pour cause de fissures

⇒ Demande d'optimisation : remplacer le PS en respectant le CdC initial (fonctions, forme et procédé) + à moindre coût



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

Pb : retour de boîtiers de CD en polystyrène (PS) pour cause de fissures

⇒ Demande d'optimisation : remplacer le PS en respectant le CdC initial (fonctions, forme et procédé) + à moindre coût

1 - Traduction du CdC pour définir l'ensemble des données et quantités nécessaires

Fonctions  
Contraintes  
Objectifs  
Variables libres



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

1 - Traduction du CdC pour définir l'ensemble des données et quantités nécessaires

Fonctions  
Contraintes  
Objectifs  
Variables libres

Fonctions : contenir et protéger le CD  
permettre de voir la jaquette

Contraintes : ténacité > PS  
*a minima* propriétés optiques du PS  
forme et procédé fixés  
(→ moulage thermoplastiques)

Objectif : coût minimum

Variables libres : matériau (→ thermoplastique)

## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

1 - Traduction du CdC pour définir l'ensemble des données et quantités nécessaires

Fonctions  
Contraintes  
Objectifs  
Variables libres

Fonctions : contenir et protéger le CD  
permettre de voir la jaquette

Contraintes : ténacité > PS  
propriétés optiques du PS  
forme et procédé fixés  
(→ moulage thermoplastiques)

Objectif : coût minimum

Variables libres : matériau (→ thermoplastique)

2 - Ecriture des équations de dimensionnement et des critères de performances liés au objectifs

Données utiles à leur définition  
Optimisation souhaitée  
(minimisation ou maximisation)

Données utiles : ténacité  
indice de réfraction optique  
coût volumique

Optimisation : maximiser  $I = K_{IC}/C_v$

## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

Consultation de données

- Lecture
- Recherche

Polystyrène (PS)

Propriétés mécaniques

Module de Young	1.2	2.6	GPa
Module de cisaillement	0.8	1.9	GPa
Module de compressibilité	2.9	3.1	GPa
Coefficient de Poisson	0.383001	0.40871	
Limite élastique	—	—	MPa
Resistance en traction	—	—	MPa
Resistance à la compression	31.592	61.82	MPa
Allongement	1.2	3.6	% strain
Meilleur deuret Vickers	8.8	16.9	MPa
Limites de fatigue	—	—	MPa
Resilience	0.7	1.102	MPa m <sup>0.5</sup>
Coefficient d'annométement (élast. déstr.)	0.011941	0.0145449	

Propriétés thermiques

Température de transition vitreuse	73.85	100.85	°C
Température de transition cristallisation	76.85	102.85	°C
Température minimale d'utilisation	273.15	—	°C

Conducteur ou isolant thermique (Cliquez pour déterminer les meilleures applications des matériaux)

Conducteur thermique	0.121	0.131	W/m °C
Chaleur spécifique	1990.59	1708.21	J/kg °C
Coefficient de dilatation	90	153	μm/m °C

Propriétés optiques

Indice de réfraction	1.57	1.59	Quotient Optique
----------------------	------	------	------------------

Polystyrène (PS)

Description

Le matériau dans un produit

Legende de l'illustration

Composition (résumé)

Le Matériau

Le polystyrène est un polymère optiquement clair, bon marché, et facilement moulable. Il nous est familier comme le matériau de la boîte de CD. Il est également utilisé dans le PSR (polystyrène rigide), qui est un matériau qui peut subir des changements anormaux en se réchauffant avec du polyéthylène, mais au détriment de sa transparence optique. Le PSR est également utilisé dans les boîtes de CD et de DVD, et dans les boîtes de plastique, même à basses températures (c'est à dire jusqu'à -12°C). La plus grande application du PS est le moulage d'emballage.

Propriétés générales

## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

Consultation de données

- Lecture
- Recherche

Comparaison de données

- Graphiques
- Tableau

Selection

- Par arborescence
- Par limites
- Sur graphiques

Ténacité, Transparent ou opaque?

1. Données de sélection

2. Etape de sélection

3. Résultats : 4 validées sur 100

Propriétés

Module de cisaillement	—	—	GPa
Module de compressibilité	—	—	GPa
Coefficient de Poisson	—	—	
Limite élastique	—	—	MPa
Resistance en traction	—	—	MPa
Resistance à la compression	—	—	MPa
Allongement	—	—	% strain
Meilleure deuret Vickers	—	—	MPa
Limite de fatigue	—	—	HV
Resilience	—	1.1	MPa m <sup>0.5</sup>
Coefficient d'annométement (élast. déstr.)	—	—	MPa m <sup>0.5</sup>

Propriétés thermiques

Propriétés électriques

Propriétés optiques

Indice de réfraction

Risque de matériau critique

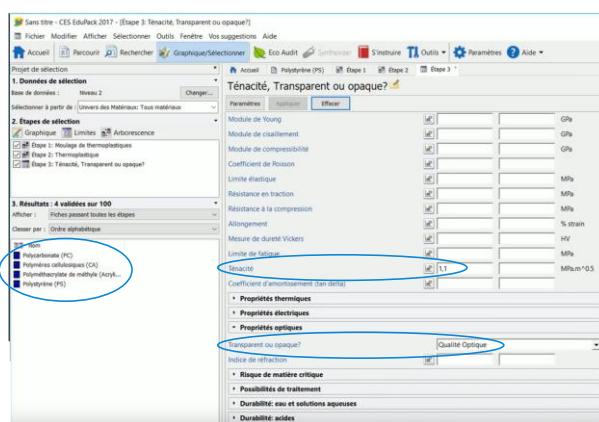
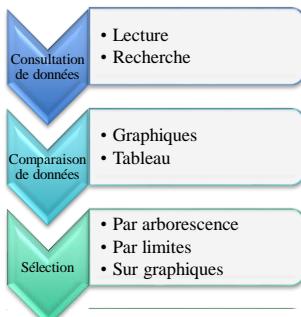
Possibilités de traitement

Durabilité: eau et solutions aqueuses

Durabilité: acides

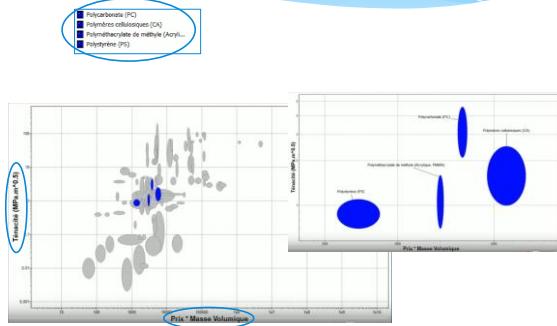
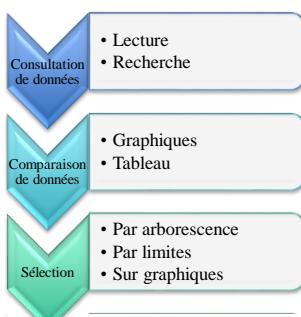
## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

#### Consultation de données

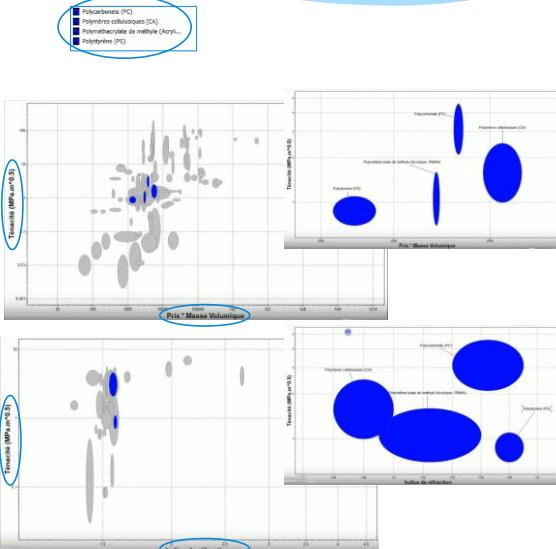
- Lecture
- Recherche

#### Comparaison de données

- Graphiques
- Tableau

#### Sélection

- Par arborescence
- Par limites
- Sur graphiques



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### Matériaux pour boîtier de CD :

#### Consultation de données

- Lecture
- Recherche

#### Comparaison de données

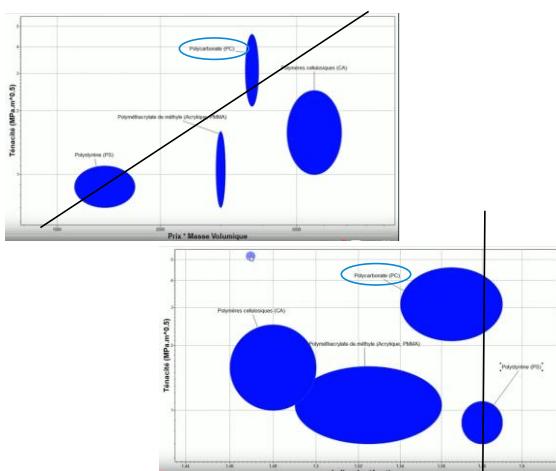
- Graphiques
- Tableau

#### Sélection

- Par arborescence
- Par limites
- Sur graphiques

#### Croissance des données

- Optimisation du choix
- Sélection des candidats



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

### 2 exemples à traiter :

- Sélection de matériaux pour un gobelet jetable pour boissons chaudes



- Sélection de matériaux pour du fil à souder



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

**Fonction** : optimiser la sélection matériau pour un gobelet jetable

**Contraintes** : le matériau doit :

- pouvoir supporter les boissons chaudes (100°C)
- ne pas conduire la chaleur pour éviter tout risque de brûlure
- être moulable par injection
- être recyclable

**Objectifs** :

- minimiser le coût
- minimiser l'impact environnemental



**Résultat attendu** : choix du meilleur matériau

## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack




**Contraintes**

- Supporter les boissons chaudes
- Éviter les risques de brûlure
- Etre moulable par injection
- Etre recyclable

- Température maximale d'utilisation > 100 °C [Limite]
- Conducteur thermique : Bon isolant [Limite]
- Moulage par injection [Arborescence]
- Recyclable : Oui [Limite]

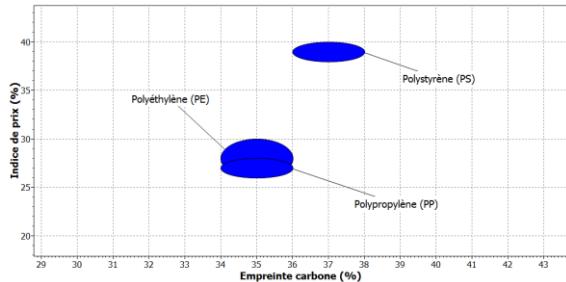
**Objectifs**

- Coût
- Impact environnemental

- Axe des ordonnées : Indice de prix
- Axe des abscisses : Empreinte carbone [Graphique]

## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

**Résultats :** le PP semble être le meilleur matériau pour minimiser le prix et l'impact environnemental.



**Description**

Le matériau dans un produit




Legendre de l'illustration

1. Échantillon de polypropylène montrant la texture et la transparence du matériau. © Chris Lettieri 2. Gobelets en polypropylène. © Thinkstock

## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

**Fonction** : on cherche un matériau qui pourra servir comme fil à souder pour un circuit électrique

**Contraintes** : le matériau doit :

- Conduire l'électricité
- Fondre à basse température (à partir de 100°C pour les fers à souder classiques)
- Pouvoir être enrouler et dérouler (déformation plastique facile)

**Objectifs** :

- Minimiser le coût

**Résultat attendu** : choix du meilleur matériau



## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack



### Contraintes

- Conduire l'électricité
- Fondre à basse température
- Déformable facilement
- Déformable plastiquement

- Conducteur électrique : Bon conducteur [Limite]
- Température max d'utilisation <100°C [Limite]
- Rigidité (axe des ordonnées) [Graphique]
- Limite élastique (axe des abscisses) [Graphique]

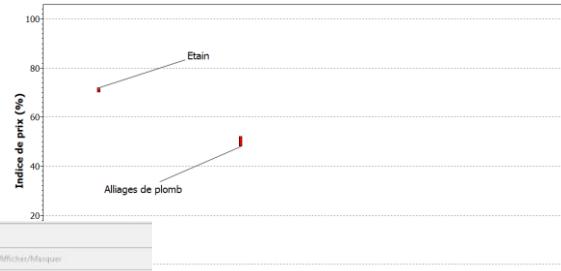
### Objectifs

Coût

Axe des ordonnées : Indice de prix [Graphique]

## 6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

**Résultats** : le plomb semble être plus judicieux, car moins cher.



**Alliages de plomb**

Disposition : Sélectionner les matériaux

Métaux et alliages > Alliages non ferreux >

**Description**  
Le matériau dans un produit

**Légende de l'illustration**

1. Le plomb métallique est majoritairement utilisé pour la fabrication d'électrodes dans les batteries au plomb et à l'acide, elle représente 70 % de toute la production. 2. Les alliages plomb-étain étaient, jusqu'à récemment, les soudures les plus largement utilisées pour les appareils électriques, la plomberie et l'étanchéité des bouteilles de conserve. Maintenant les problèmes liés à la **toxicité** des sels de plomb limite de plus en plus leur utilisation. © Granta Design 3. Totume de plomb à King's College Chapel, Cambridge, Royaume-Uni. © John Fernandez

**Analyse du résultat** : les fils dans le laboratoire de technologie sont en étain, le plomb n'étant plus utilisé du fait de sa toxicité.

## 7. Le recyclage des matériaux et l'éco-conception

80% de l'impact écologique final d'un produit est lié à l'étape de conception.

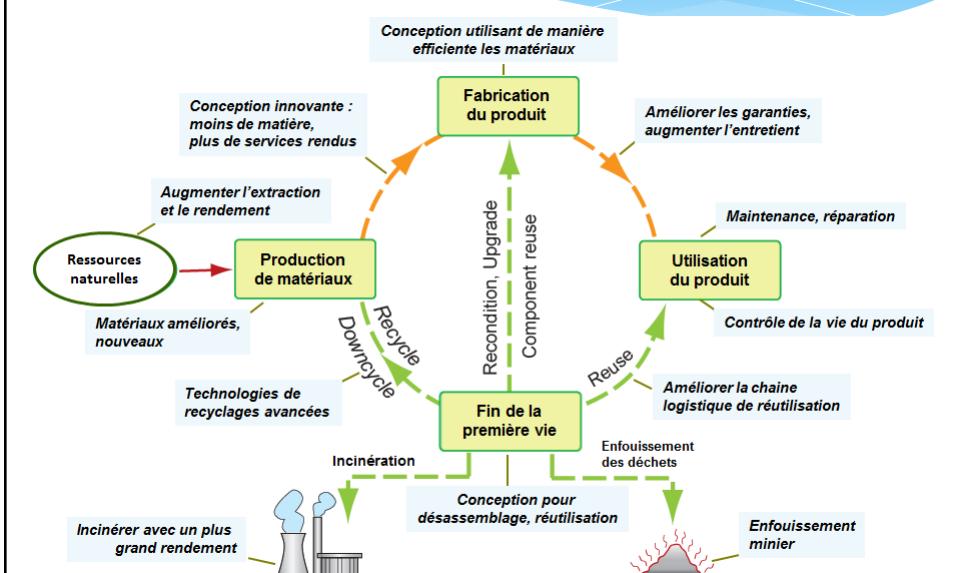
Depuis 1990, la conception s'est enrichie d'une nouvelle approche du cycle de vie du produit : le produit est maintenant pris en compte dans sa globalité, depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie. Cette démarche est définie par le terme d'éco-conception.

### Définitions de l'éco-conception :

- d'après l'ADEME (Agence Nationale de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), l'éco-conception est une démarche préventive qui permet de réduire les impacts négatifs des produits sur l'environnement, en agissant sur l'ensemble du cycle de vie, tout en conservant leur qualité d'usage.
- Pour un spécialiste, l'éco-conception a pour objectif d'améliorer la performance environnementale et fonctionnelle à toutes les étapes du cycle de vie des produits.

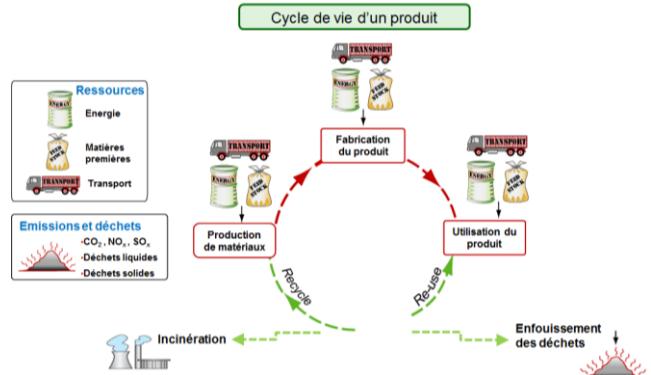
Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (Rapport de la commission Brundtland, 1987).

## 7. Le recyclage des matériaux et l'éco-conception



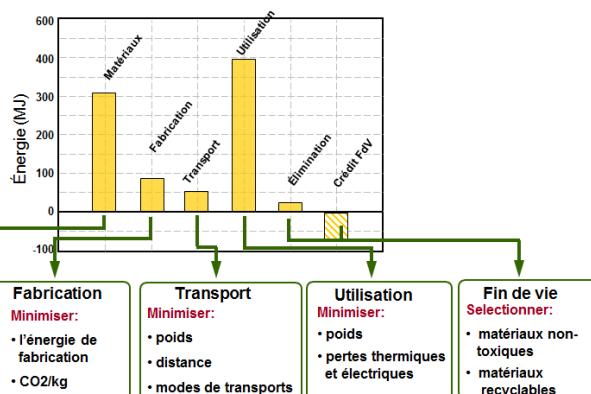
## 7. L'éco-audit

Un éco-audit consiste à mesurer et analyser l'impact environnemental d'un produit, en prenant en compte l'intégralité de son cycle de vie. Le protocole de Kyoto (1997) engage les pays réduire progressivement les émissions de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Au niveau national, les efforts se portent plutôt sur la réduction de l'énergie consommée (étroitement lié au  $\text{CO}_2$ ).

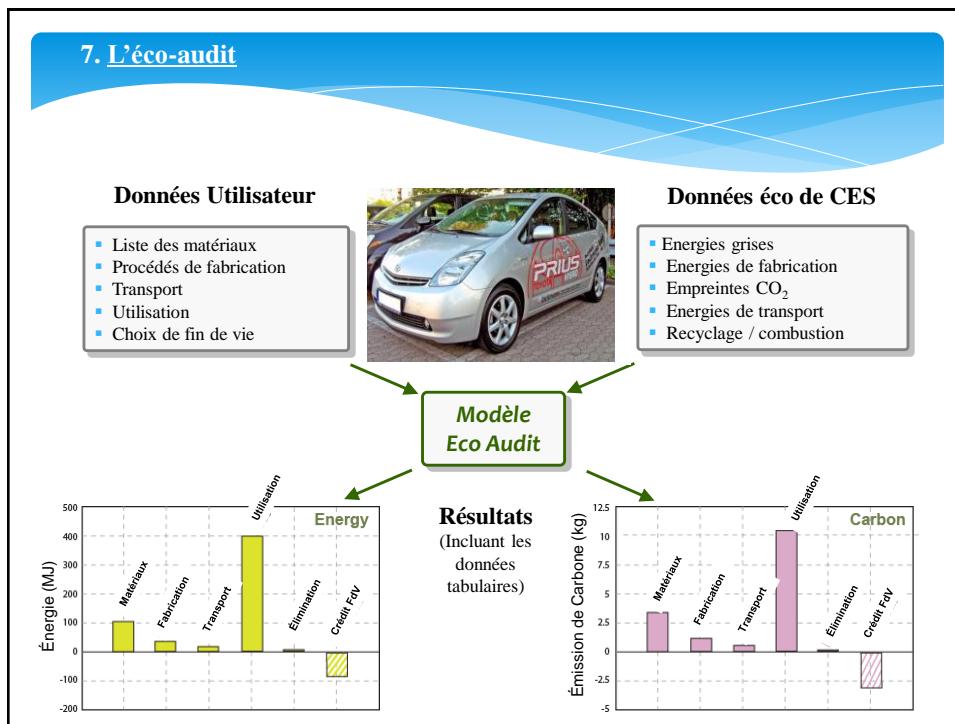


## 7. L'éco-audit

CES Edupack propose un outil EcoAudit, permettant d'estimer la consommation d'énergie ou l'émission de  $\text{CO}_2$  d'un produit, en séparant les contributions des différentes phases de vie, pour déterminer celle qui sera dominante et baser les décisions de conception dessus. L'outil Eco Audit inclure aussi une estimation du coût de chaque phase dans l'analyse.



## 7. L'éco-audit



## 7. L'outil EcoAudit CES Edupack

**Liste des matériaux (remplie ou importée)**

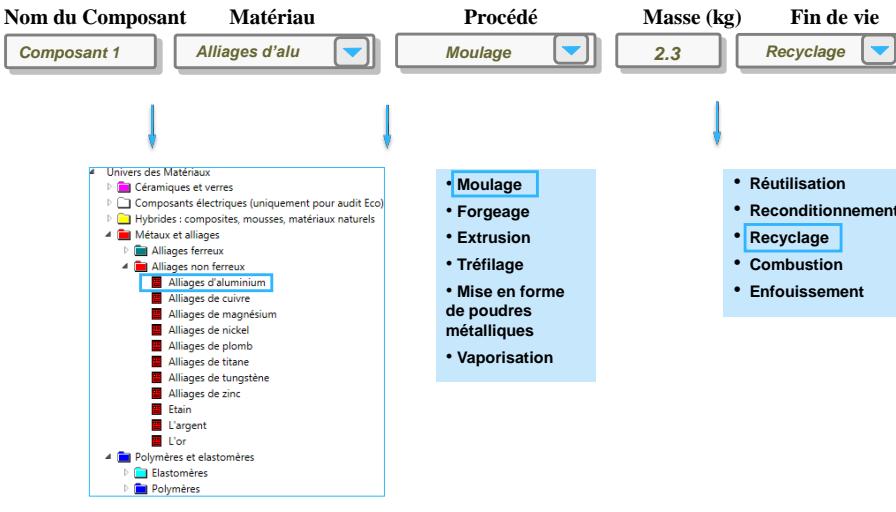
**Informations à utiliser**

**Aide disponible à chaque étape**

**Utile pour scénarios "et si?"**

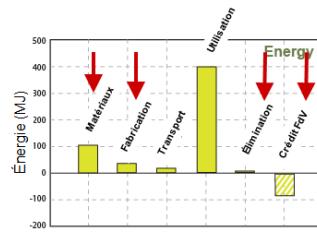
The screenshot shows the software interface for performing an environmental audit. It includes a sidebar for material lists, a main workspace for entering product details (like a glass bottle), and various tabs for transport, utilization, and energy calculations. Arrows point from callout boxes to specific features: 'Liste des matériaux' to the material list sidebar, 'Informations à utiliser' to the utilization tab, 'Aide disponible à chaque étape' to the help section, and 'Utile pour scénarios "et si?"' to the 'Comparer à...' (Compare to...) button.

## 7. L'outil EcoAudit CES Edupack



## 7. L'outil EcoAudit CES Edupack

Composant 1	Alliages d'aluminium	Moulage	2.3	Recyclage
Composant 2	Polypropylène	Moulage polymère	1.85	Mise en décharge
Composant 3	Verre	Moulage de Verre	3.7	Réutilisation
<b>Energie grise totale</b>	<b>Energie de fabrication totale</b>	<b>Masse totale</b>	<b>Energie totale de fin de vie</b>	



## 7. L'outil EcoAudit CES Edupack

Phase de transport   Type de transport   Distance (km)

Etape 1

Camion 32 tonnes

350

Etape 2

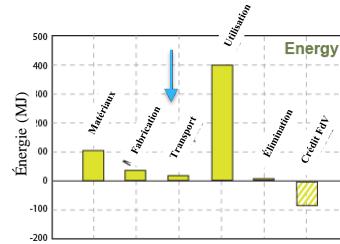
Fret maritime

12000

- Fret Maritime
- Fret fluvial
- Fret ferroviaire
- Camion 32 tonnes
- Camion 14 tonnes
- Véhicule utilitaire léger
- Fret aérien - long courrier
- Fret aérien - court courrier
- Hélicoptère

Energie de transport

CO<sub>2</sub> de transport



Liste des types de transport :

MJ / tonne.km

CO<sub>2</sub> / tonne.km

## 7. L'outil EcoAudit CES Edupack

Energie en entrée et en sortie

Electrique en mécanique

Puissance nominale

1.2

kW

Utilisation

365

Jours par an

Utilisation

0.5

Heures par jour

Energie totale ou  
CO<sub>2</sub> d'utilisation

Voie de conversion d'énergie

Combustible fossile en thermique - clos

Combustible fossile en thermique - aéré

Combustible fossile en électrique

Combustible fossile en mécanique

Électrique en thermique

Électrique en mécanique (Moteur électrique)

Électrique en chimique (batterie plomb acide)

kCal/yr Électrique en chimique (Batterie lithium ion)

BTU/yr Électrique en rayonnements EM (lampe à incandescence)

Électrique en rayonnements EM (LED)

