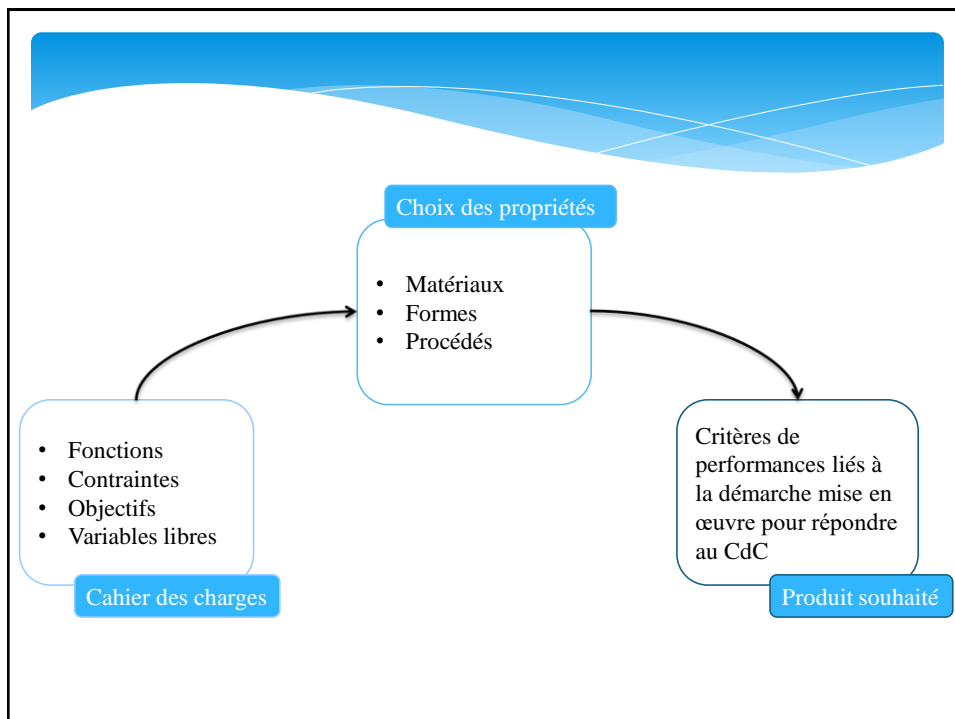
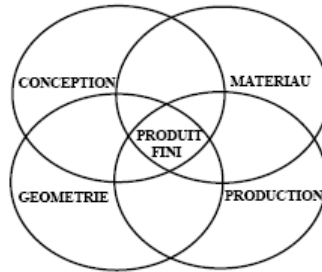


Critères de choix des matériaux et procédés

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.



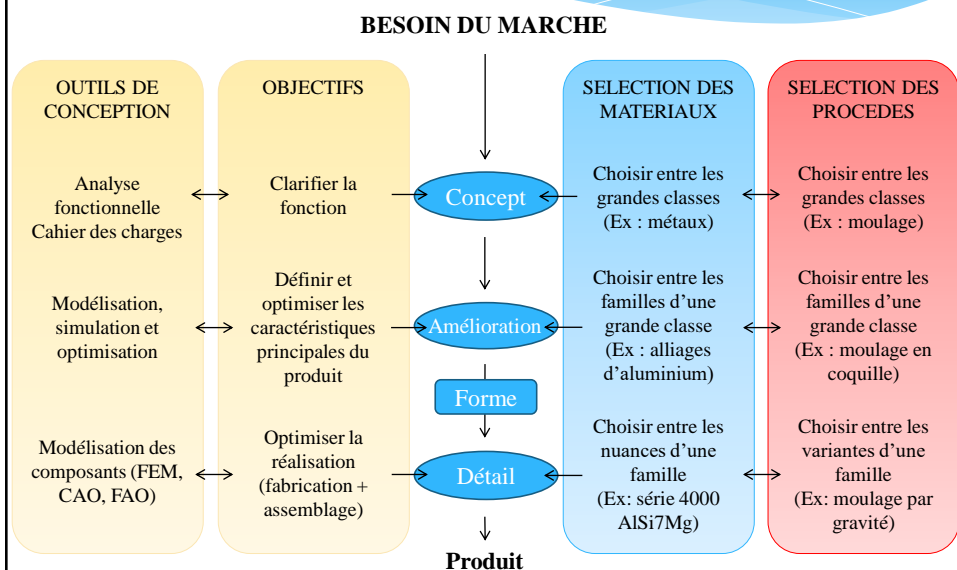


On estime à **60 000** le nombre de **matériaux** disponibles et à environ **6 000** le nombre de **procédés** possibles \Rightarrow Disposer d'une **procédure systématique** pour sélectionner le procédé et le matériau le mieux adapté à une fonction ou à une pièce donnée.

La méthode doit permettre d'explicitier 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**.

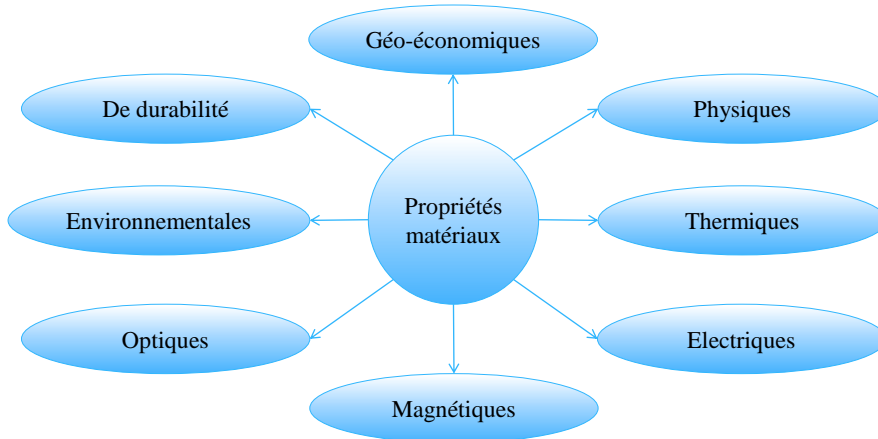
1. La sélection des matériaux et procédés dans la démarche de conception



1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

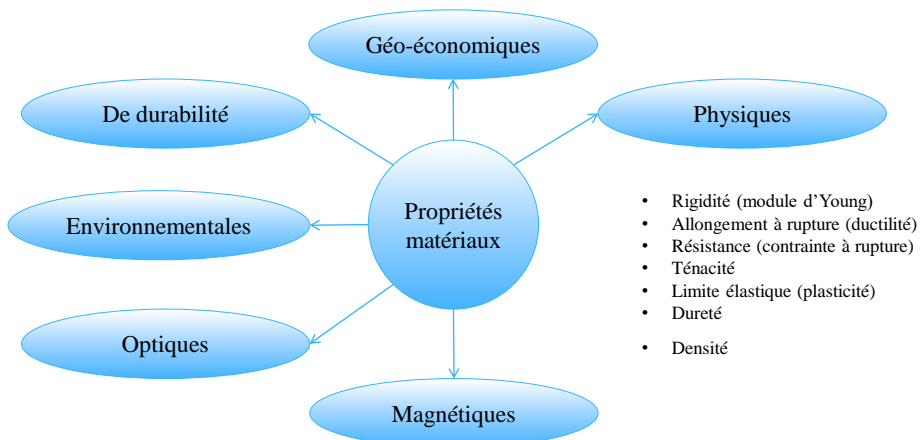
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

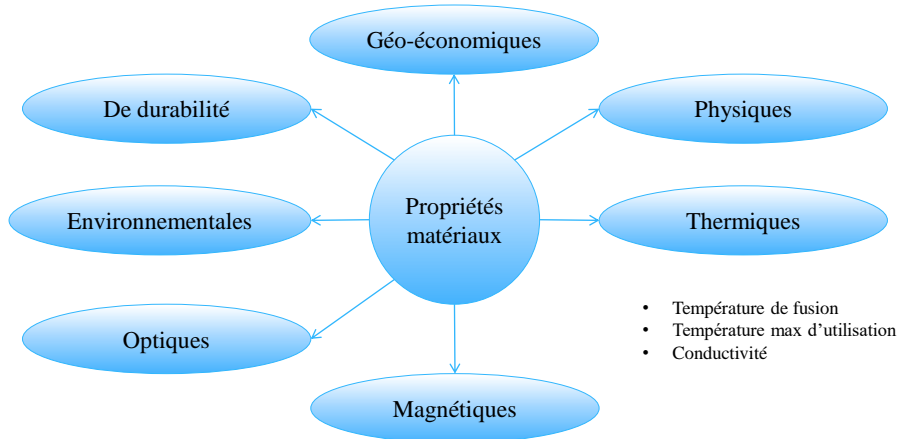
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

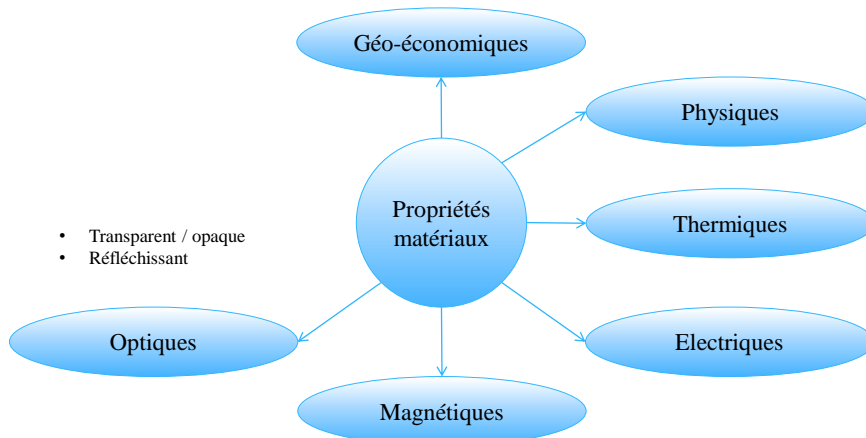
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

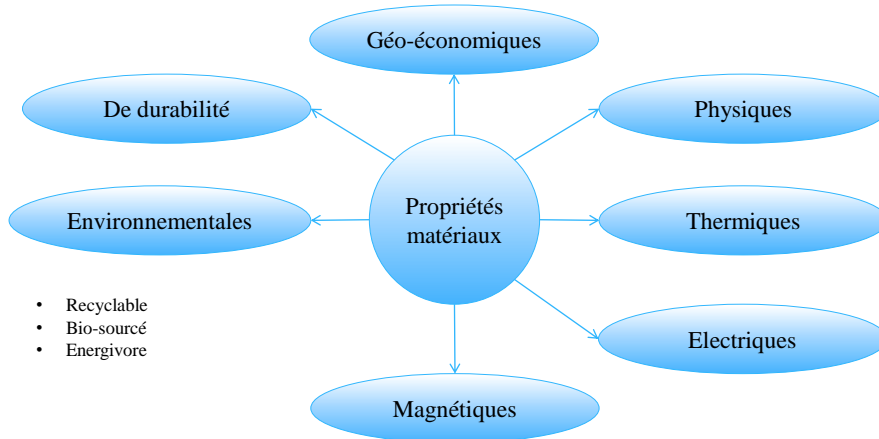
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



1. Propriétés des matériaux

Quantitatives : chiffrées, mesurables

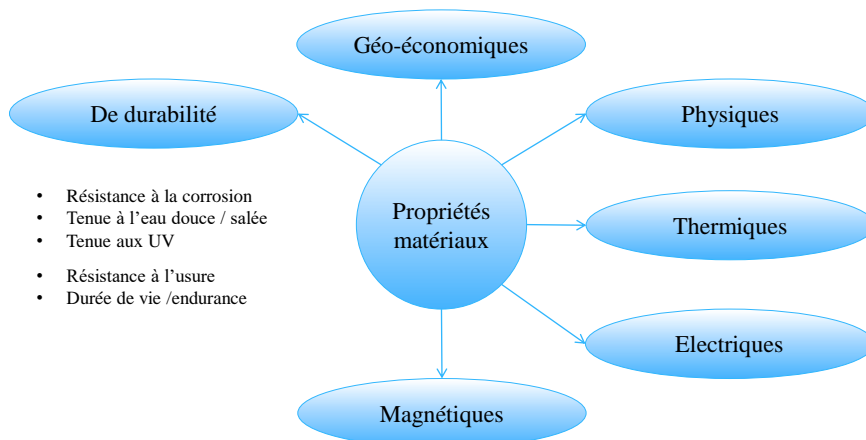
Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



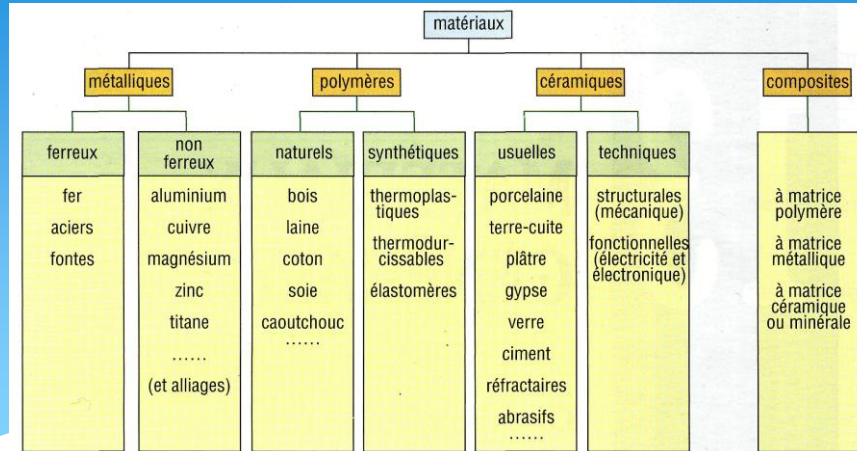
1. Propriétés des matériaux

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

\Rightarrow 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 élevée**

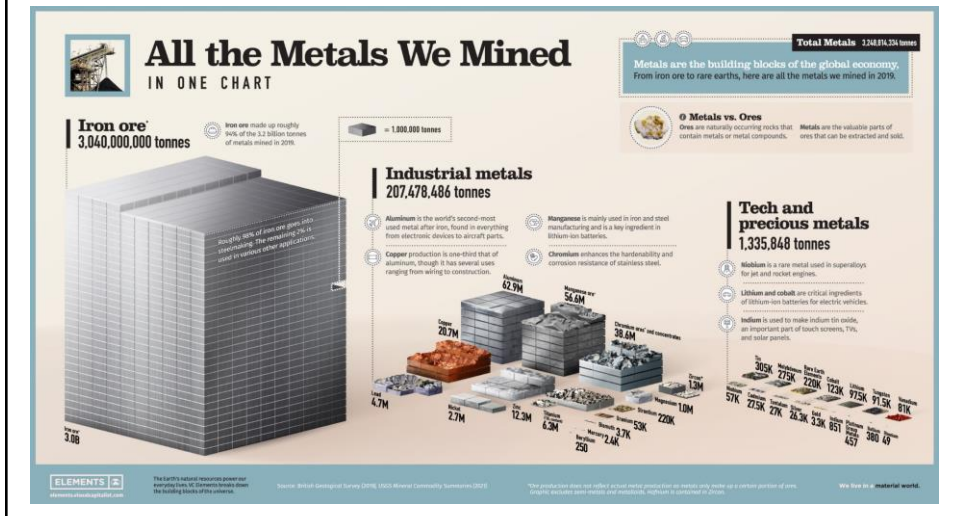
Mg : 650°C, Al : 660°C, Cu : 1084°C, Ni : 1445°C, Fe : 1538°C,
Ti : 1668°C, Cr : 1860°C, Mo : 2623°C, W : 3422°C



Structures cristallines des métaux - principales mailles			
Type	maille cubique centrée	maille cubique à face centrée	maille hexagonale compacte
Représentation 3D			
Représentation 2D			
Volume occupé par les atomes dans la maille	$V = 0.68$ et 2 atomes par maille	$V = 0.74$ et 4 atomes par maille	$V = 0.74$ et de la maille 6 atomes par maille
Exemples	Fe, Mn, Cr, W, Mo, V, Nb, Ta, Ti, Zr, Hf, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y, U, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr	Ni, Cu, Al, Ag, Au, Co, Cr, Fe, K, Li, Mg, Na, Pb, Pt, Rh, Ru, Sn, Zn, In, Ga, Tl, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr	Mg, Zn, Cd, Hg, Ca, Sr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y, U, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr
Caractéristiques	faible ductilité, peu ductile	ductile et facilement formable	ductile, peu ductile

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

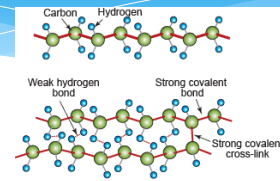


PROPRIETES DES CERAMIQUES

PROPRIETES	ALUMINE 97.6% Al ₂ O ₃	ALUMINE 99.5% Al ₂ O ₃	NITRURE D'ALUMINIUM AlN	ZIRCON ZrO ₂	CARBURE SILICIUM SiC	NITRURE SILICIUM Si ₃ N ₄
Densité (g/cm ³)	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
Témocté (MPa.m ^{1/2})			3.35	6	4	7
Dureté	HR 45N 75	HR 45N 81		KV 9.3 1120	HV0.5 2600	HV0.5 1450
Conductivité therm. (W/mK)	25.8	29.3	190	2.5	125	25
Coefficient dilatation thermique linéaire 25 à 1000°C (10 ⁻⁶ /°C)	9	9.4	5.6	10	5.2	4
Température maxi. d'utilisation (sans 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)

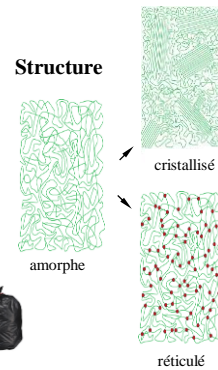
+ **matériaux souples** ($E < 3\text{GPa}$)

+ **isolants électriques et thermiques**

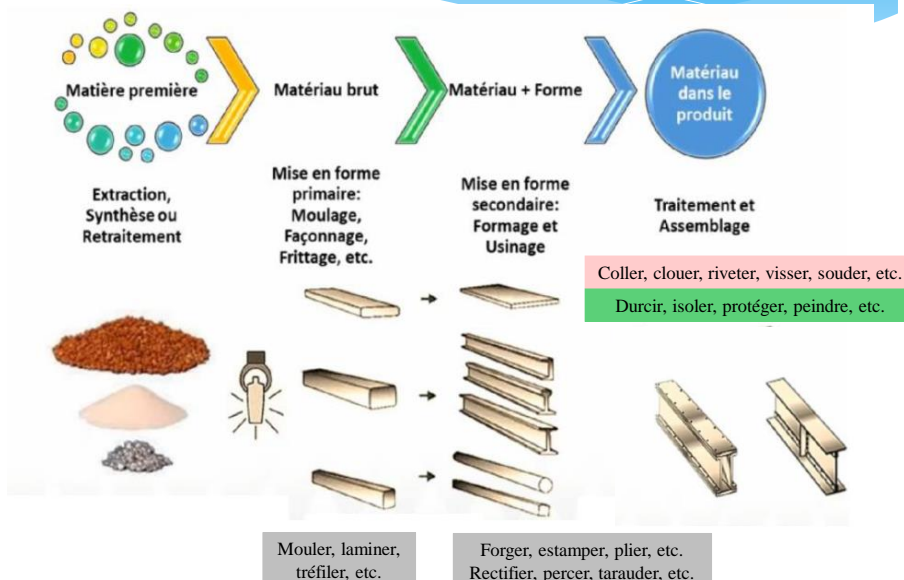
Ne sont stables **qu'à des températures modérées** (ramollissent/fondent à des températures entre 100 et 250°C)

Caractéristiques physiques moyennes de quelques polymères thermoplastiques usuels¹²

Code	Densité	Taux de cristallinité (%)	T _g (°C)	T _{fusion} T _m (°C)	T _{max} (°C)	Module E (GPa)
ABS	1.04-1.12	0	85-125	105-120	70-85	2.5
PA-6	1.13	60	52	215	85	1
PA-6.6	1.14	50	57	260	90	1.5
PC	1.20	0	150	220-250	120	2.4
PE-HD	0.96	80-98	-110	124-135	90	0.8-1.2
PE-LD	0.92	50-70	-110	100-125	70	0.15-0.3
PET amorphe	1.30	0	65-80	255	100	2.7
PET cristallin	1.40	40	65-80	260	100	4.1
PMMA	1.18	0	105	130-140	60-50	3
PP	0.91	60-70	-10	165	100	1.3
PS « cristallin »	1.05	0	80-100	100	60	3.2
PVC rigide	1.38	0-5	80	100-120	65	2.4



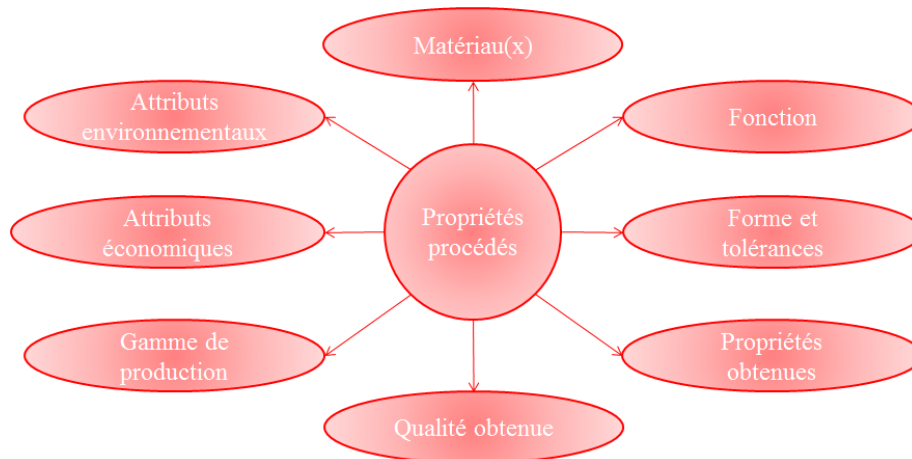
1. Propriétés des procédés



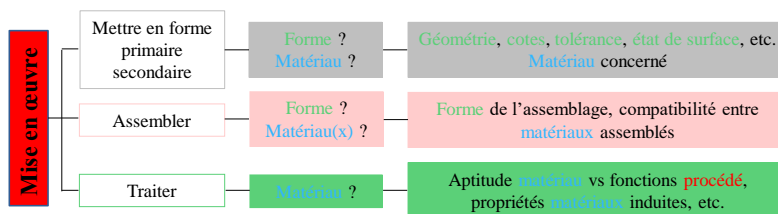
1. Propriétés des procédés

Quantitatives : chiffrées, mesurables

Qualitatives : booléennes, descriptives, non mesurables



1. Interactions matériaux/procédés/forme



Formes liées au procédé :

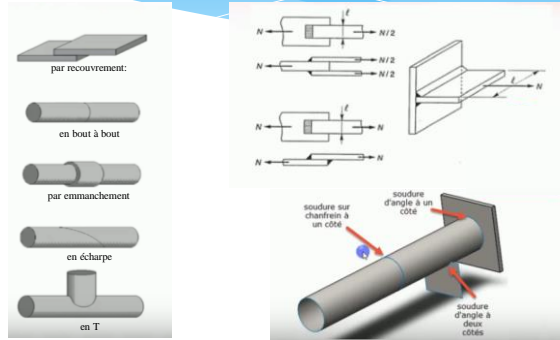
- 1D : poteau, tuyau, gouttière, mât
- 2D : paque, tôle, vitre, boîte, canette
- 3D : culasse, bielle, engrenage, profilé



1. Interactions matériaux/procédés/forme

Formes liées à l'assemblage :

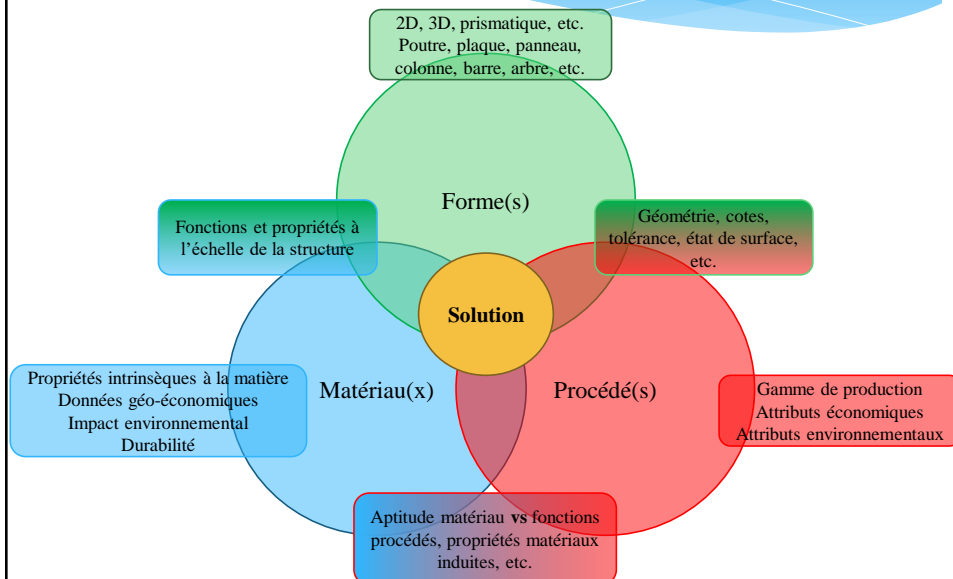
- Assemblages thermiques (soudage, brasage)
- Assemblages mécaniques (boulonnage, rivetage, sertissage, clinchage...)
- Assemblage physico-chimique (collage)



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



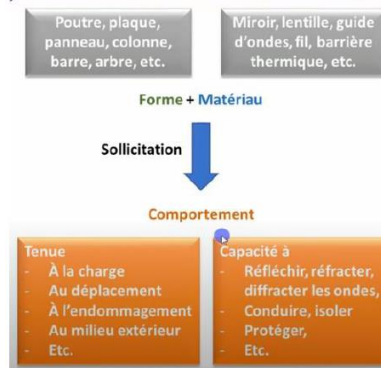
2. Traduction du cahier des charges

Cahier des charges

- Fonctions
- Contraintes
- Objectifs
- Variables libres

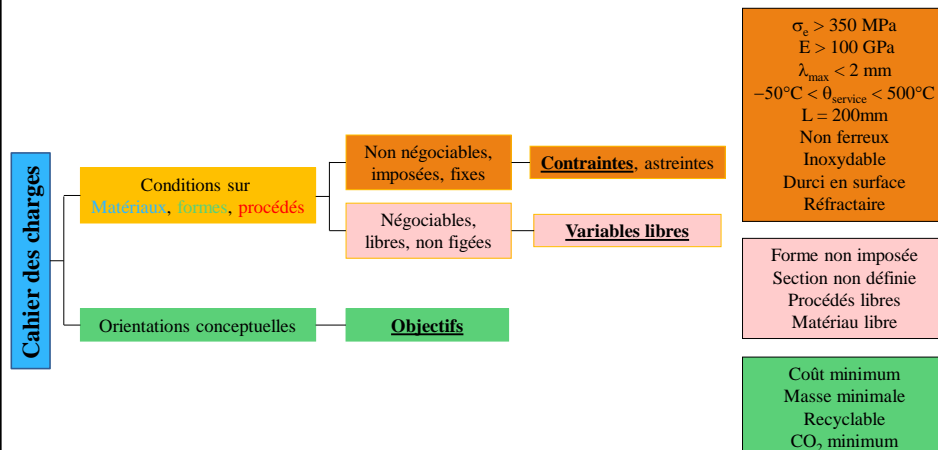
- **Fonction** : ce que doit accomplir le matériau, composant ou produit

- pour le matériau, la fonction est assurée par les propriétés de la matière, associées à la forme (« vision structurelle »)
- pour le composant ou le produit, la fonction est assurée par les propriétés combinées des matériaux assemblés (structure élémentaire ou complexe)



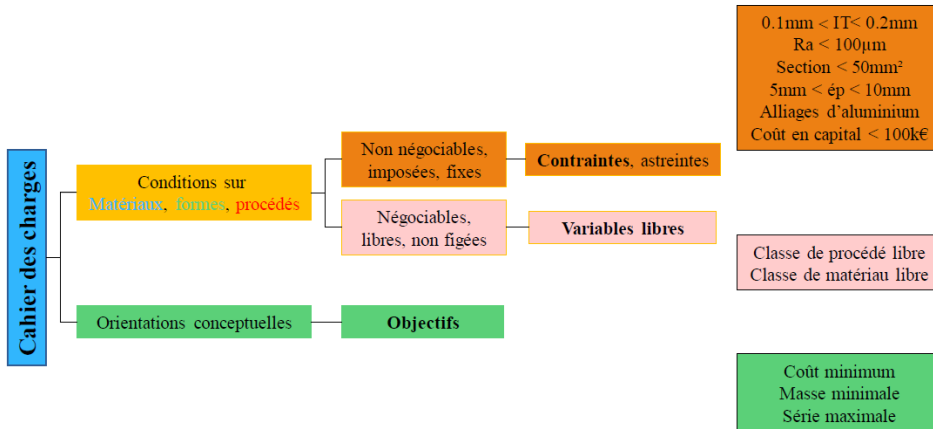
2. Traduction du cahier des charges

- **Contraintes, objectifs et variables libres – Matériaux :**



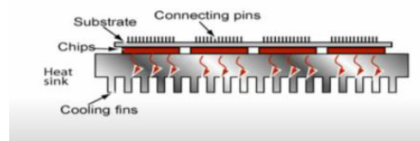
2. Traduction du cahier des charges

- Contraintes, objectifs et variables libres - Procédés :



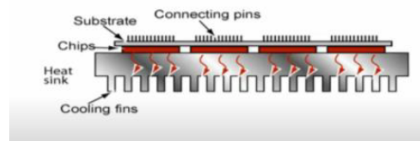
2. Exemples de traduction du cahier des charges

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.

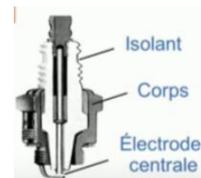


- **Fonction** : évacuer la chaleur d'un composant électronique
- **Contraintes** : de façon explicite, le matériau doit être un conducteur thermique, avec une conduction thermique $> 25 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ + le radiateur doit admettre dans sa température maximale de service 200°C + la forme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

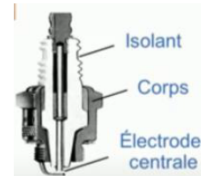
L'isolant à mettre en forme est un composant en alumine, d'une masse proche de 50g, avec une section d'épaisseur comprise entre 3 et 5 mm. Les tolérances dimensionnelles imposées doivent être inférieures à 0.5 mm, avec une rugosité inférieure à 100µm. La série de production est d'au minimum 2 000 000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



2. Exemples de traduction du cahier des charges

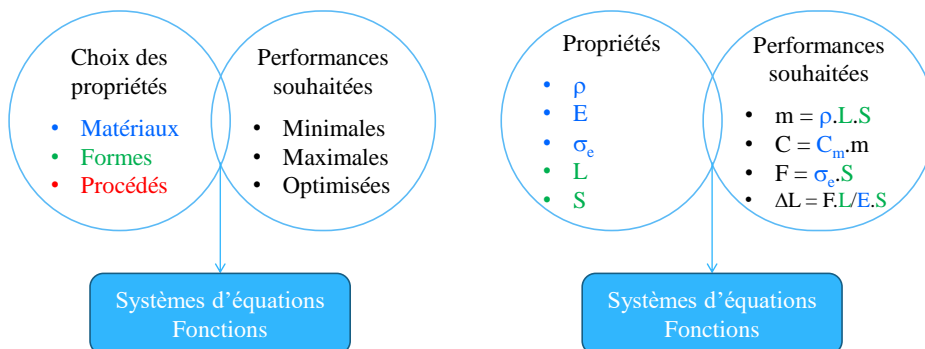
Mise en forme d'isolant de bougie : dans une entreprise fabriquant des bougies d'allumage, une machine permettant de fabriquer les isolants des bougies vient de tomber en panne. Le client souhaite revoir sa ligne de production incluant ces isolants, et trouver un moyen de production qui pourrait remplacer 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 100µm. 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 $> 0.5\text{mm}$ et une rugosité $< 100\mu\text{m}$ + série minimale de 1 000 000 de pièces
- **Objectifs** : minimiser le coût de production
- **Variables libres** : procédé (matériau et forme imposés)

3. Procédure de sélection : méthode des indices de performance



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



Visière de protection pour motocyclistes

Contraintes

- Transparent – de qualité optique
- Capacité à être moulé

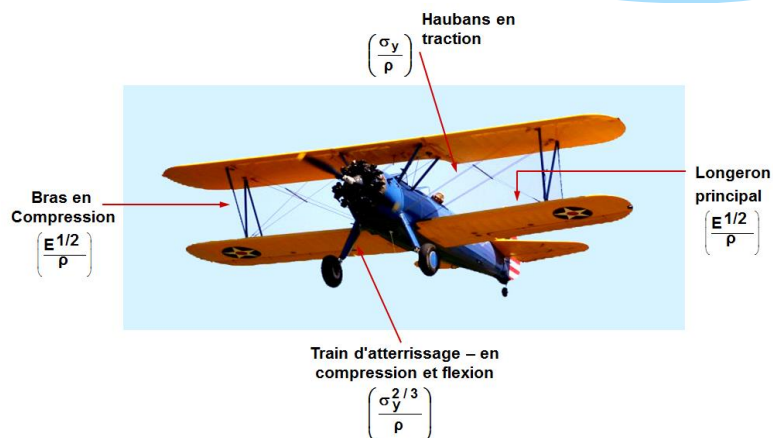
Objectif : aussi tenace que possible

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

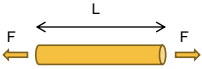


E = Module d'Young

ρ = Densité

σ_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
Fonctions Contraintes Objectifs Variables libres	Données utiles à leur définition Optimisation souhaitée (minimisation ou maximalisation)	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)	Conserver les quantités imposées et les constantes Paramétrer les quantités libres non matériaux Rétérer jusqu'à remplacer toutes ces quantités libres (si besoin, ajouter des équations à l'étape 2)	Isoler les quantités imposées et les constantes pour définir une fonction imposée non négociable Isoler les quantités libres matériaux pour définir une fonction d'optimisation Utiliser la fonction d'optimisation comme indice de performance de l'objectif ciblé
 <p>Tirant de longueur L connue devant résister en élasticité à un effort de traction F, à un coût C minimal</p> <p>F : résister à la traction C : force F, longueur L O : coût C minimal VL : section S, matériau, (procédé)</p>	$F = \sigma_e \cdot S$ $C = C_m \cdot m$ $m = \rho \cdot L \cdot S$	$F = \sigma_e \cdot S$ $C = C_m \cdot \rho \cdot L \cdot S$	$C = C_m \cdot \rho \cdot L \cdot F / \sigma_e$	$C = (L \cdot F) \cdot (C_m \cdot \rho / \sigma_e)$ $C \Leftrightarrow C_m \cdot \rho / \sigma_e$
		Dimensionnement		Choix Matériau

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

Dimensionnement :
Longueur L imposée
Section S libre



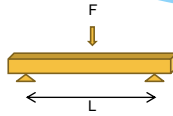
Fonction	Contraintes	Objectif	Variables libres	Résultat
	F, L	Minimiser la mase m	Matériau, forme, procédé	
Assurer la résistance en élasticité à un effort de traction F	$F = \sigma_e \cdot S$	$m = \rho \cdot L \cdot S$	$\sigma_e, \rho, S, \text{procédé}$	$m = \rho \cdot L \cdot F / \sigma_e$ $I_1 = \rho / \sigma_e$
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	$\sigma_f = M_f \cdot y / I_z$ $\sigma_f = 0.5c \cdot F \cdot L / (4c^4/12)$ $\sigma_f = C_1 \cdot F \cdot L / S^{3/2}$	$m = \rho \cdot L \cdot S$ $S^{3/2} = C_1 \cdot F \cdot L / \sigma_f$ $S = (C_1 \cdot F \cdot L / \sigma_f)^{2/3}$	$\sigma_e, \rho, S, \text{procédé}$	$m = \rho \cdot L \cdot (C_1 \cdot F \cdot L / \sigma_f)^{2/3}$ $I_3 = \rho / \sigma_f^{3/2}$
Contrôler la flèche élastique sous un effort de flexion F	$y'' = M_f / (E \cdot I_z)$ $y'' = F \cdot L / (4 \cdot E \cdot I_z)$ $y_{\max} = \lambda = F \cdot L^3 / (48 \cdot E \cdot I_z)$ $F = (48 \cdot E \cdot I_z / L^3) \cdot \lambda$ $F/\lambda = (C_2 \cdot E \cdot S^4 / L^3) = k_f$	$m = \rho \cdot L \cdot S$ $S^4 = k_f \cdot L^3 / (C_2 \cdot E)$ $S = (k_f \cdot L^3 / (C_2 \cdot E))^{1/4}$	$\sigma_e, \rho, S, \text{procédé}$	$m = \rho \cdot L \cdot (k_f \cdot L^3 / (C_2 \cdot E))^{1/4}$ $I_4 = \rho / E^{1/2}$

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

Fonction	Contraintes	Objectif	Variables libres	Résultat
 	Rigidité Résistance Fatigue Géométrie Conductivité thermique	Coût minimal Poids minimal Flèche minimale Impact environnemental minimal Déplacement minimal	Epaisseur Section Largeur Longueur	$I_1 = \rho / \sigma_e$ $I_2 = \rho / E$ $I_3 = \rho / \sigma_f^{3/2}$ $I_4 = \rho / E^{1/2}$

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)
Barre de traction Rigidité et longueur spécifiées, section libre	E/ρ	Barre de traction Solidité et longueur spécifiées, section libre	R_e/ρ
Arbre de torsion Rigidité, longueur et forme spécifiées, section libre	$G^{1/2}/\rho$	Arbre de torsion Solidité, longueur et forme spécifiées, section libre	$R_e^{2/3}/\rho$
Rigidité, longueur, rayon externe spécifiés, épaisseur libre	$G^{1/2}/\rho$	Solidité, longueur, rayon externe spécifiés, épaisseur libre	R_e/ρ
Rigidité, longueur, épaisseur spécifiées, rayon externe libre	$G^{1/3}/\rho$	Solidité, longueur, épaisseur spécifiées, rayon externe libre	$R_e^{1/2}/\rho$
Poutre en flexion Rigidité, longueur, forme spécifiées, section libre	$E^{1/2}/\rho$	Poutre en flexion Solidité, longueur, forme spécifiées, section libre	$R_e^{2/3}/\rho$
Rigidité, longueur, hauteur spécifiées, largeur libre	E/ρ	Solidité, longueur, hauteur spécifiées, largeur libre	R_e/ρ
Rigidité, longueur, largeur spécifiées, hauteur libre	$E^{1/3}/\rho$	Solidité, longueur, largeur spécifiées, hauteur libre	$R_e^{1/2}/\rho$
Colonne soumise au flambement Longueur, charge, forme spécifiées, section libre	$E^{1/2}/\rho$	Colonne soumise au flambement Longueur, charge, forme spécifiées, section libre	R_e/ρ
Plaque en flexion Rigidité, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$E^{1/3}/\rho$	Plaque en flexion Rigidité, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$R_e^{1/2}/\rho$
Plaque en compression Charge, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$E^{1/3}/\rho$	Plaque en compression Charge, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$R_e^{1/2}/\rho$
Cylindre sous pression interne Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	E/ρ	Cylindre sous pression interne Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	R_e/ρ
Coquille sphérique sous pression Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	$E/(1-\nu)\rho$	Coquille sphérique sous pression Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	R_e/ρ
(1) Pour avoir les indices à coût minimal et à volume minimal, il suffit de remplacer ρ masse volumique par $\rho \cdot C$ ou par 1 respectivement. (2) G = module de cisaillement C = coût E = module d'élasticité.		(1) Pour avoir les indices à coût minimal et à volume minimal, il suffit de remplacer ρ masse volumique par $\rho \cdot C$ 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)
Barre de traction Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en charge	K_{Ic} et R_e
Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en déplacement	K_{Ic}/E et R_e
Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en énergie	K_{Ic}^2/E et R_e
Arbre de torsion Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en charge	K_{Ic} et R_e
Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en déplacement	K_{Ic}/E et R_e
Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en énergie	K_{Ic}^2/E et R_e
Poutre en flexion Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en charge	K_{Ic} et R_e
Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en déplacement	K_{Ic}/E et R_e
Maximiser la tolérance au défaut, contrôle en énergie	K_{Ic}^2/E et R_e
Cylindre sous pression interne Plastification avant rupture	K_{Ic}/R_e
Fuite avant rupture	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

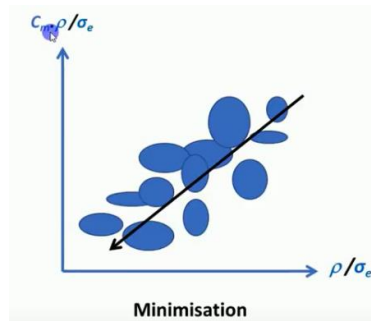
Les cartes de sélection offrent une utilisation très visuelle des indices de performance, et malgré leur caractère approximatif, permettent souvent un premier « débroussaillage » du problème.



Fonction : résister à la contrainte
 Contraintes : F , L imposées
 Objectifs : **minimiser** le coût (I_1) et la masse (I_2)

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

$$I_2 = \rho / \sigma_e$$



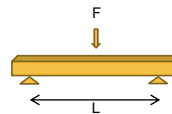
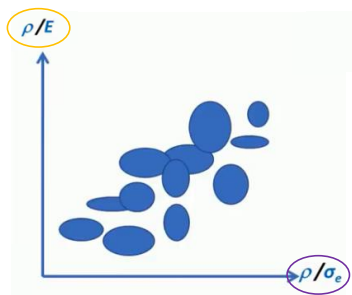
3. Utilisation des indices de performance : cartes de sélection

Plan de visualisation **métrique** :



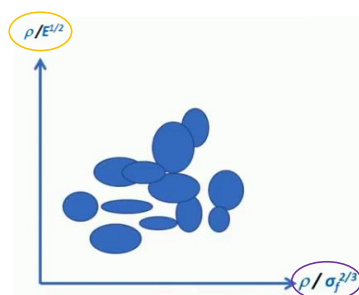
$$I_1 = \rho / E$$

$$I_2 = \rho / \sigma_e$$



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

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



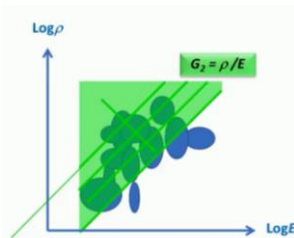
3. Utilisation des indices de performance : cartes de sélection

Plan de visualisation métrique :

$$I_1 = \rho / E$$

$$\begin{aligned}\log I_1 &= \log \rho - \log E \\ \log \rho &= \log E + \log I_1\end{aligned}$$

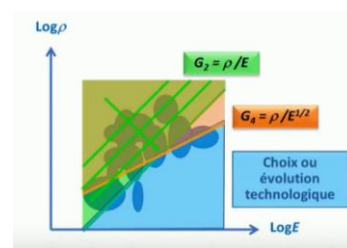
$$\begin{aligned}Y &= 1X + B_1 \\ \text{Pente } 1 \\ B_1 &\text{ décroissant}\end{aligned}$$



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

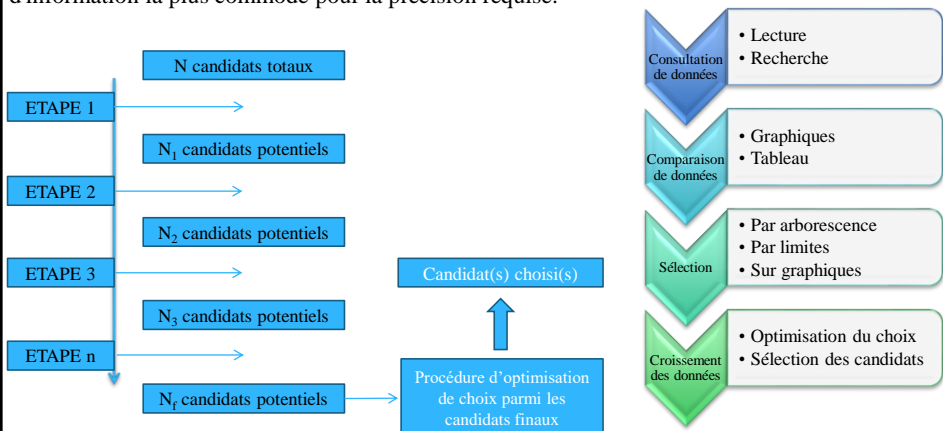
$$\begin{aligned}\log I_4 &= \log \rho - 0.5 \log E \\ \log \rho &= 0.5 \log E + \log I_4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Y &= 0.5X + B_4 \\ \text{Pente } 0.5 \\ B_4 &\text{ décroissant}\end{aligned}$$



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 (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 (Batiment)

4. Logiciels d'aide à la sélection

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

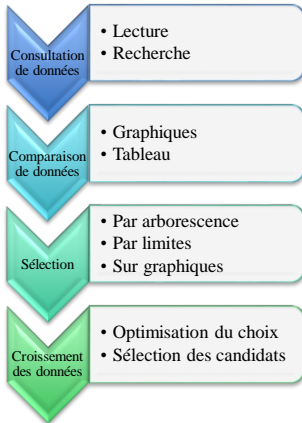
- soit sur un ensemble très vaste de matériaux,
- soit au contraire sur une classe très étroite de matériaux sur laquelle on aura des données beaucoup plus précises.

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.

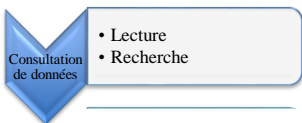
Ces critères peuvent relever de l'archivage de connaissances ; c'est le cas des logiciels conçus pour la promotion d'un matériau : ils proposent de faire une recherche de matériau par **application**.

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.

5. Logiciel CES Edupack



5. Logiciel CES Edupack

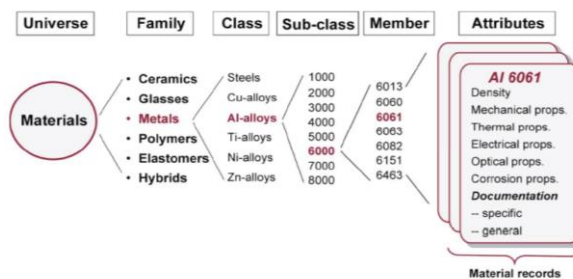


Fiche matériau / procédé

Description et informations
textuelles générales

Propriétés

Description et informations
textuelles spécifiques



5. Logiciel CES Edupack

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	6061 Afficher/Masquer
Metals and alloys > Non-ferrous > Aluminum > Wrought > 6000 series (Mg and Si-alloyed) > 6061 >	
General information	
Designation	
6061, wrought	
Condition	T4 (Solution heat-treated and naturally aged to a substantially stable condition)
UNS number	A90001
EN name	EN AW-6061 (EN AW-Al Mg1SiCu)
EN number	3.3211
Typical uses	
Trucks, towers, canoes, railroads cars, furniture, pipelines, and other structural applications where strength, weldability, and corrosion resistance are needed	
Composition overview	
Compositional summary	
Al99.99 / Mg0.8-1.2 / 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	Metal (non-ferrous)
Base material	Al (Aluminum)
Composition detail (metals, ceramics and glasses)	
Al (aluminum)	95.8 - 98.6 %
Cr (chromium)	0.04 - 0.25 %
Cu (copper)	0.15 - 0.4 %
Fe (iron)	0 - 0.7 %
Mg (magnesium)	0.8 - 1.2 %
Mn (manganese)	0 - 0.15 %
Si (silicon)	0.4 - 0.8 %
Ti (titanium)	0 - 0.15 %
Zn (zinc)	0 - 0.25 %
Other	0 - 0.15 %

5. Logiciel CES Edupack

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) (CH₂-CH(CH₃))_n

Le polypropylène, PP, dont 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. Comme le PE, il est produit en 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 également, la longueur de sa molécule et ses ramifications latérales peuvent être ajustées par une catalyse intelligente, donnant un contrôle précis de sa résistance à l'impact et des propriétés qui influencent son aptitude à être moulé ou extrudé. Sous sa forme pure, le polypropylène est inflammable et se dégrade à la lumière solaire. Des stabilisants peuvent résister sa combustion et des stabilisants lui donnent une très bonne stabilité tant aux rayonnements UV qu'à l'oxydation ou même aux acides qui la placent dans les solutions aqueuses.



Propriétés Générales	
Densité	900 - 910 kg/m ³
Prix	1.102 - 1.61 USD/kg
Propriétés Mécaniques	
Module de Young	0.996 - 1.55 GPa
Module de cisaillement	0.3158 - 0.5483 GPa
Module de compressibilité	2.5 - 2.6 GPa
Coefficient de Poisson	0.4052 - 0.4269
Moyenne de dureté Vickers	6.2 - 11.2 HV
Limite élastique	20.7 - 37.2 MPa
Limite de traction	27.6 - 41.4 MPa
Résistance à la compression	25.1 - 55.5 MPa
Élongation	100 - 600 %
Limite de fatigue	11.04 - 16.56 MPa
Traçabilité	3 - 4.5 MPa.m ^{3/2}
Coefficient d'amortissement	0.02581 - 0.04064
Propriétés Thermiques	
Conducteur ou isolant thermique ?	Bon isolant
Conductivité thermique	0.113 - 0.167 W/m.K
Coefficient de dilatation	122.4 - 180 µm/m.K
Chaleur spécifique	1870 - 1956 J/kg.K
Température de fusion	423 - 448 K
Température de transition vitreuse	248 - 258 K
Température maximale d'utilisation	256 - 300 K
Température minimale d'utilisation	150 - 200 K
Propriétés Électriques	
Conducteur ou isolant électrique ?	Bon isolant
Résistivité électrique	2.3e2 - 3e23 ohm.cm
Constante diélectrique	2.2 - 2.3
Facteur de puissance	5e-4 - 5e-4
Tension de claquage	22.7 - 24.6 10 ⁶ V/m
Recommandations pour la conception	
Le PP standard est bon marché, léger et durable mais il a une faible tenue mécanique. Il est plus rigide que le PE et peut être utilisé à plus hautes températures. Les propriétés du PP sont similaires à celles du PPSI mais il est plus rigide et tend à une température plus élevée (165-170°C). Sa rigidité et sa résistance mécanique peuvent être améliorées en le renfortant avec des fibres de verre, de la craie ou du talc. Lorsqu'il est étiré en fibre, le PP a une résistance et une résistance exceptionnelle. Ceci, ainsi que sa résistance à l'eau, en font un matériau intéressant pour les câbles et les tissus. Il est plus facile à mouler que le PE, a une bonne transparence et peut accepter une gamme plus large et plus vive de couleurs. Le PP est couramment produit sous forme de feuilles, de produits moulés et de fibres, il peut également être extrudé. Les développements des catalyseurs permettent de nouveaux copolymères de PP avec des combinaisons plus intéressantes de résistance aux chocs, stabilité et facilité de mise en œuvre. Les fibres monofilamentaires ont une haute résistance à l'abrasion et sont presque deux fois plus tenaces que les fibres PE. Les fils multifilamentaires ou les cordes s'abîment par frottement, flottent sur l'eau et se colorent facilement.	
Notes techniques	
Les nombres grades de polypropylène tombent dans trois groupes de base : les homopolymères (polypropylène avec toute une gamme de poids moléculaires et donc de propriétés), copolymères (faits par copolymérisation du propylène avec d'autres oléfines comme l'éthylène, le butylène ou le styrène) et les composites (polypropylène renforcé avec du mica, des fibres ou des fibres de verre...) qui sont plus rigides et résistent mieux à la chaleur que des simples polypropylènes.	
Applications typiques	
Câbles, pièces techniques, conduites d'air, fibres à air, et pièces arrière pour l'automobile, mobilier de jardin, tambour de machines à laver, boîtier de batterie, tapis et moquettes, caisses de bouteilles de bière, coques de chaise, capacités diélectriques, isolants de câbles, bouillottes, parois de voitures, vantage anti-effraction, caisses de rangement, valises, gazon synthétique, semi-vêtements thermiques.	

5. Logiciel CES Edupack

Consultation
de données

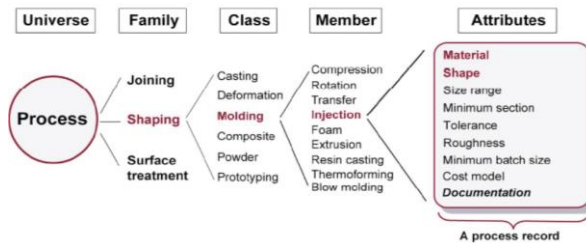
- Lecture
- Recherche

Fiche matériau / procédé

Description et informations
textuelles générales

Propriétés

Description et informations
textuelles spécifiques



5. Logiciel CES Edupack

Consultation
de données

- Lecture
- Recherche

Fiche matériau / procédé

Description et informations
textuelles générales

Propriétés

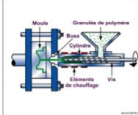
Description et informations
textuelles spécifiques

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. Les produits moulés par injection apparaissent dans tous les secteurs de la conception de produits : des produits de consommation, des articles de bureau, des pièces industrielles, des ordinateurs, des instruments de communication, des articles médicaux 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 la presse avec vis réciproquante, représentée schématiquement dans l'illustration. Les granules de polymère sont amenés dans une presse en spirale où ils se mélangent et se ramolissent pour atteindre une consistance pâteuse qui peut être finie de polir par un ou plusieurs canaux (carottes) dans le moule. Le polymère se solidifie en maintenant une pression (pression de maintien) et les pièces sont alors éjectées.

Les thermoplastiques, les thermosensibles et les élastomères peuvent chacun être moulés par injection. La co-injection permet le moulage de pièces avec des matériaux, des couleurs ou des caractéristiques différents. Le moulage par injection d'alliage permet la production économique de grandes pièces moulées en utilisant un gel noir ou un agent de gommage chimique pour faire des pièces qui ont une peau compacte et une structure interne cellulaire.



Attributs économiques

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

Caractéristiques du procédé

Discrétion : Très

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 complexes. Le fini de surface est bon, on peut facilement changer la texture et le décor en modifiant le moule et des détails fins sont bien reproduits. On peut travailler sur des échantillons décoratifs qui apparaissent à la surface des pièces (voir décoration dans le moule). La seule opération de finition est le découvrage.

Notes techniques

On peut mouler 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 composés basés sur des thermoplastiques renforcés par des fibres courtes ou des charges particulières à condition que le taux de charge ne soit pas trop important. Des changements importants dans la section des pièces ne sont pas recommandés. Des petits angles en contre-dépouille et des formes complexes sont possibles, bien que certaines caractéristiques (i.e. contre-dépouilles, parties filantes et usures) peuvent accroître le coût de l'outillage. On peut également utiliser le procédé de moulage par injection avec des thermosensibles et des élastomères. L'équipement le plus courant pour le moulage des thermoplastiques est la presse avec vis réciproquante (cf. illustration). Les granules de polymère sont amenés sur une vis. La rotation de cette vis mélange et fait fondre le polymère qui atteint une consistance pâteuse. Le polymère fonde d'accumuler devant la vis et la force à reculer (vis réciproquante). Lorsqu'une quantité suffisante de matière fondue a été accumulée devant la vis, on lui applique une pression assez élevée appelée pression d'injection. Celle-ci force la matière fondue à pénétrer par un ou plusieurs canaux (carottes) dans le moule. Pendant que le polymère se solidifie, on maintient une certaine pression appelée pression de maintien qui permet de compenser la rétraction de la matière due au refroidissement. Lorsque la matière est suffisamment solidifiée, l'objet est éjecté.

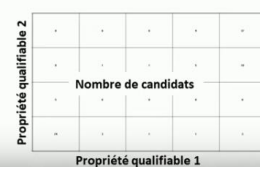
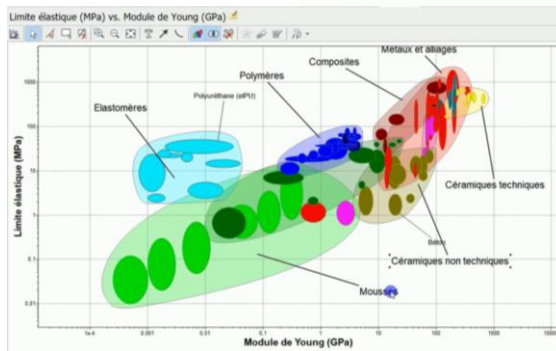
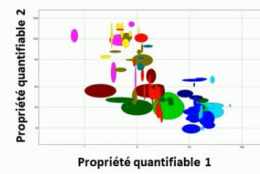
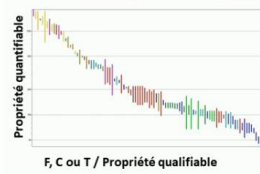
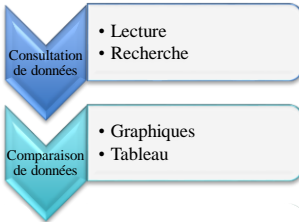
Utilisations typiques

Existence variée. Des capots, des récipients, des couvercles, des boutons, des poignées d'outils, des pièces de plomberie, des outils en.

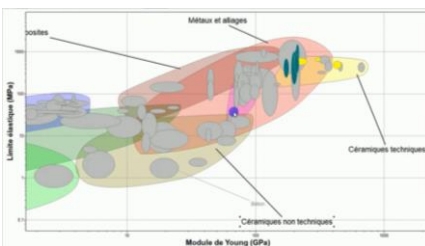
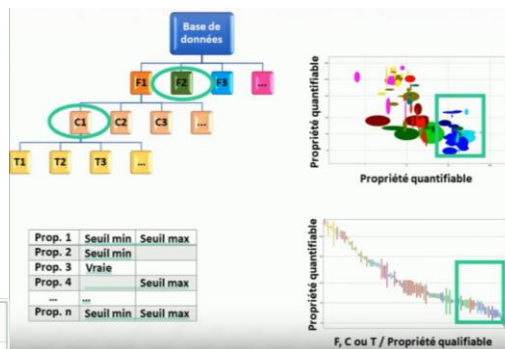
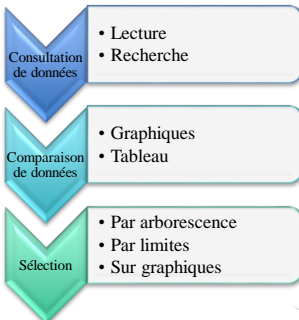
Les données économiques

Le coût en capital est moyen à élevé, les coûts d'outillage sont d'habitude élevés - ce qui rend le moulage par injection économique uniquement pour les grandes séries. La vitesse de production peut être élevée particulièrement pour de petites pièces. Les moules multi-cavités sont parfois utilisés. Les moulages de prototypes peuvent être faits en utilisant des moules mono-empresse faits dans des matériaux mouleur marché.

5. Logiciel CES Edupack



5. Logiciel CES Edupack



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

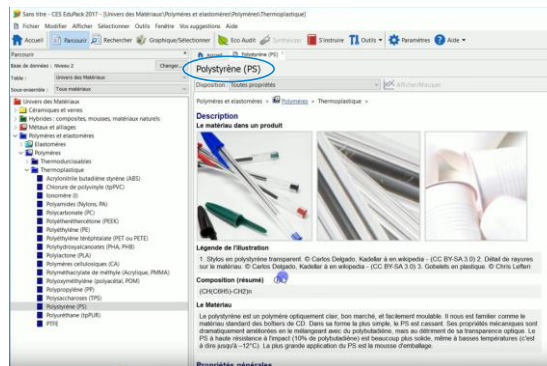
- Lecture
- Recherche

Polystyrène (PS)

Disposition : Toutes propriétés

Voir un premier exemple : [Ingénierie - Matériaux - Volume 1](#)

Propriétés mécaniques			
Module de Young	1.2	- 2.5	GPa
Module de cisaillement	0.5	- 0.9	GPa
Coefficient de Poisson	2.9	- 3.1	GPa
Limite élastique	6.383001	- 6.42671	MPa
Limite élastique	26.72	- 36.2	MPa
Résistance en traction	35.9	- 36.5	MPa
Résistance à la compression	31.992	- 41.62	MPa
Allongement	1.2	- 3.6	% strain
Mesure de dureté Vickers	8.6	- 16.9	HV
Limite de fatigue	14.46	- 45.287	MPa
Limite de fatigue	0.7	- 1.1	MPa/m ^{0.5}
Coefficient d'amortissement (tan delta)	0.013301	- 0.040449	
Propriétés thermiques			
Température de transition vitreuse	73.85	- 109.85	°C
Température maximale d'utilisation	76.85	- 102.85	°C
Température maximale d'utilisation	173.15	- 73.15	°C
Conductivité thermique	0.121	- 0.131	W/m.K
Chaleur spécifique	0.96	- 1.06	J/kg.K
Coefficient de dilatation	60	- 103	ppm/°C
Propriétés optiques			
Transparent ou opaque?	Qualité Optique		
Indice de réfraction	1.57	- 1.59	



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

Matériaux pour boîtier de CD :

Consultation
de données

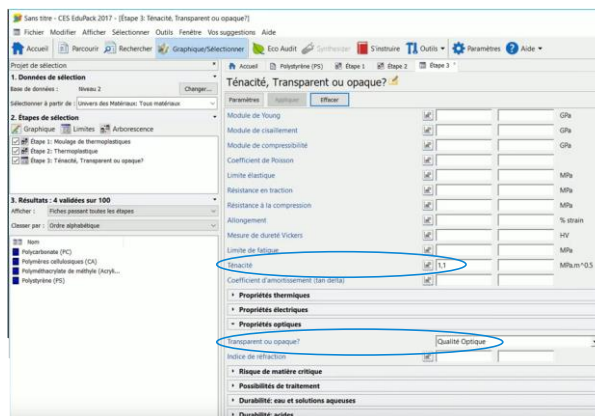
- Lecture
- Recherche

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

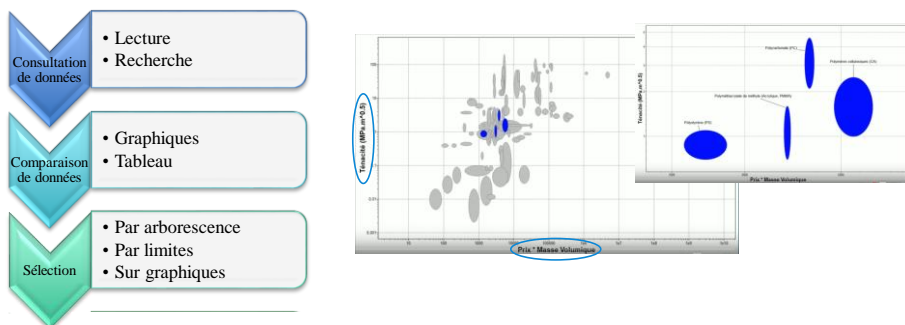
- Graphiques
- Tableau

Sélection

- Par arborescence
- Par limites
- Sur graphiques

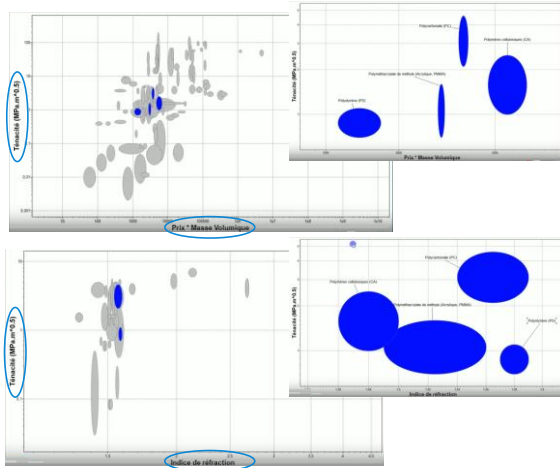
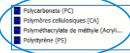
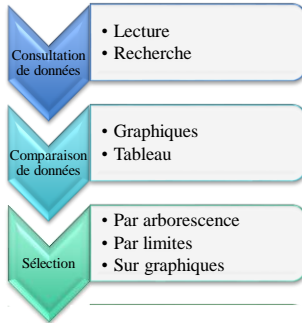
6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

Matériaux pour boîtier de CD :



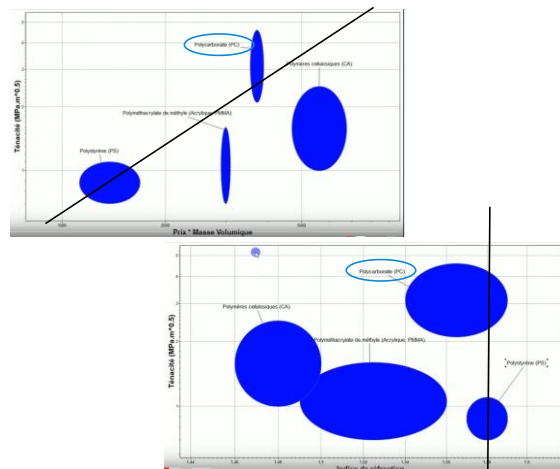
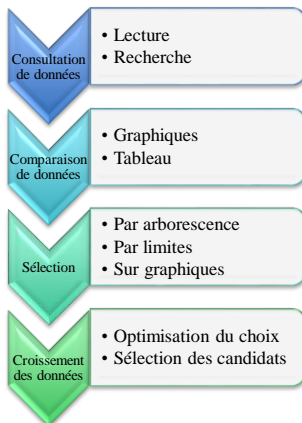
6. Exemples d'application : sélection de matériau avec CES Edupack

Matériaux pour boîtier de CD :



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

Matériaux pour boîtier de CD :



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
- Être moulable par injection
- Être recyclable



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

Objectifs

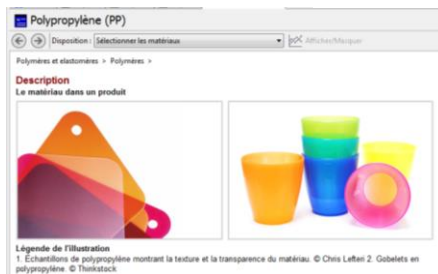
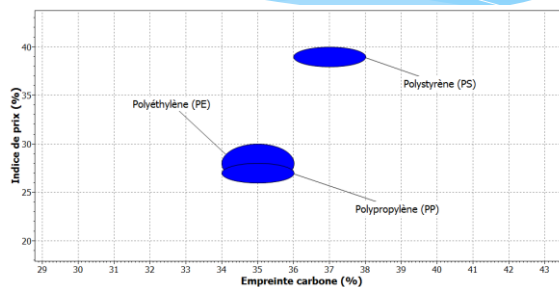
- Coût
- Impact environnemental



- 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.



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

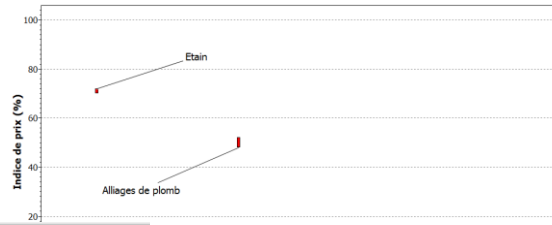
Coût



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 électroniques, la plomberie et l'étanchéité des boîtes de conserve. Maintenant les problèmes liés à la toxicité des sels de plomb limite de plus en plus leur utilisation. © Grantia Design 3. Toiture 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.

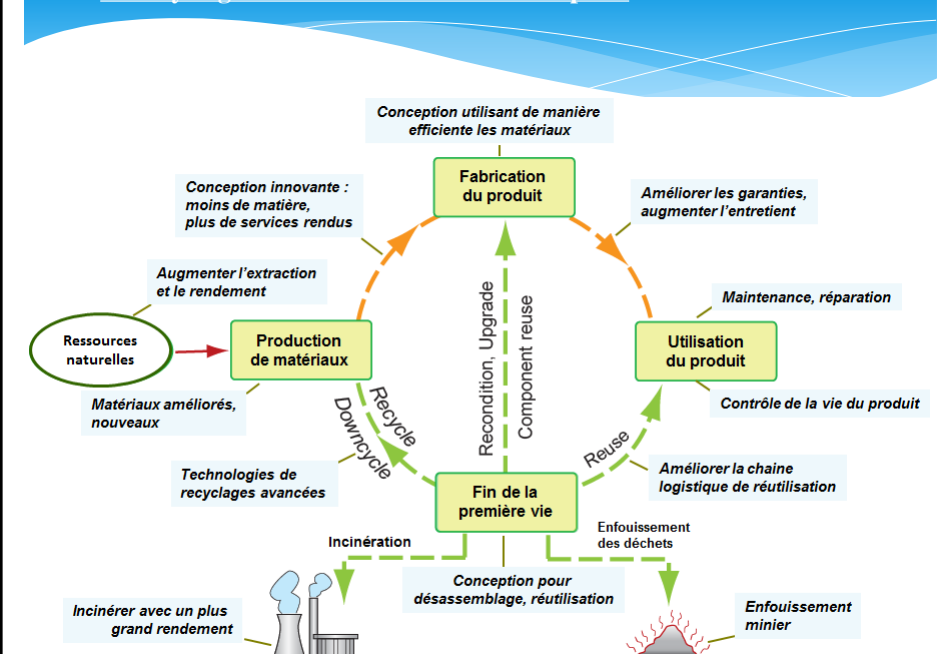
Depuis 1990, la conception s'est enrichie d'une nouvelle approche du cycle de vie du produit : le produit est maintenant pris en compte dans sa globalité, depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie. Cette démarche est définie par le terme d'éco-conception.

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.

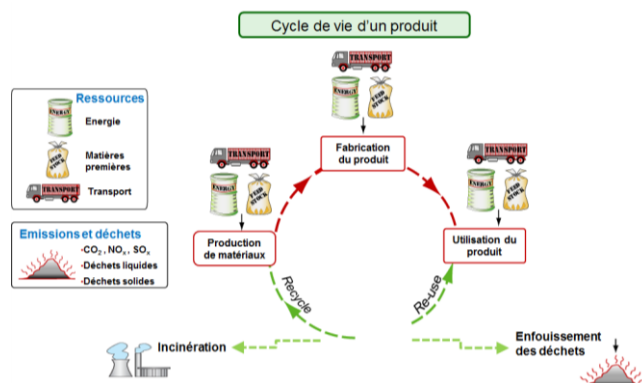
Le **développement durable** est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (Rapport de la commission Brundtland, 1987).

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



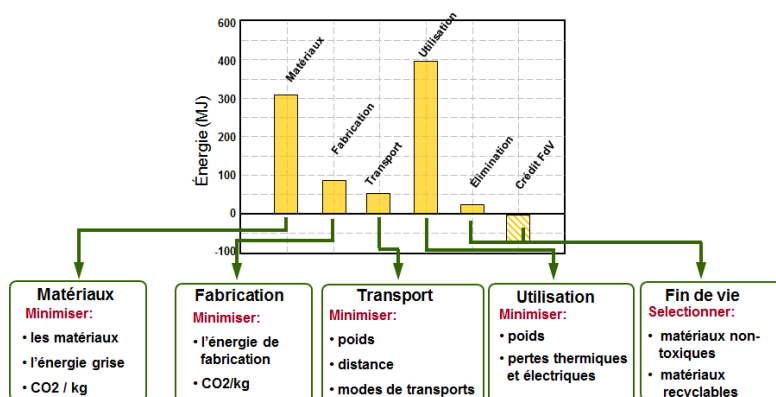
7. L'éco-audit

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 (CO_2). Au niveau national, les efforts se portent plutôt sur la réduction de l'énergie consommée (étroitement lié au CO_2).



7. L'éco-audit

CES Edupack propose un outil EcoAudit, permettant d'estimer la consommation d'énergie ou l'émission de 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

Données Utilisateur

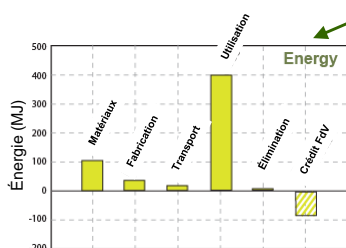
- Liste des matériaux
- Procédés de fabrication
- Transport
- Utilisation
- Choix de fin de vie



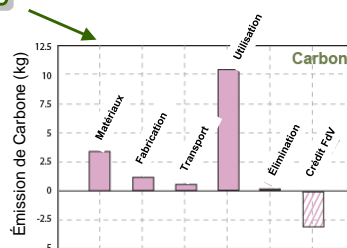
Données éco de CES

- Energies grises
- Energies de fabrication
- Empreintes CO₂
- Energies de transport
- Recyclage / combustion

Modèle Eco Audit



Résultats (Incluant les données tabulaires)



7. L'outil EcoAudit CES Edupack

Liste des matériaux
(remplie ou importée)

Utile pour scénarios "et si?"

Aide disponible à chaque étape

Informations à utiliser

The screenshot shows the 'Projet Eco Audit' window with the following details:

- Informations produit:** Nom: Bouteille d'eau minérale (100 unités) - Bouteille en verre.
- Matériaux, fabrication et fin de vie:**

Nom du composant	Matériau	Teneur recyclée	Masse (kg)	Produit primaire	Fin de vie
100 Bouteille	Verre minéral	Verre (0 %)	0.45	Moulage de verre	Recyclage
100 Bouchon	Aluminium	Verre (0 %)	0.002	Laminage d'ébauche	Recyclage
100 (1 litre d'eau)			1		Aucom
- Transport:** Nom: Type de transport: (empty fields)
- Utilisation:**
 - Durée de vie du produit: 1 Année
 - Pays d'utilisation: Royaume-Uni
 - Mode statique: ☒ Le produit utilise l'énergie suivante: Électrique à mécanique (moteurs élec.)
 - Mode mobile: ☐ Le produit fait partie d'un véhicule ou est transporté dans un véhicule.
 - Apport énergétique et énergie produite: 0.12 kWh
 - Puissance nominale: 2 jours par an
 - Utilisation: 24 heures par jour
 - Type de carburant et de mobilité: (empty field)
 - Utilisation: 0 jours par an
 - Distance: 0 km par jour
- Fiche:**
 - Tableau récapitulatif: (empty table)
 - Image: (empty field)
 - Remarque: "Static Mode": Énergie utilisée pour refroidir le produit une fois arrivé au point de vente. Énergie pour refroidir 100 bouteilles à 4°C = 0.12kWh

7. L'outil EcoAudit CES Edupack

Nom du Composant	Matériau	Procédé	Masse (kg)	Fin de vie
Composant 1	Alliages d'alu	Moulage	2.3	Recyclage

- Univers des Matériaux
- ☐ Céramiques et verres
 - ☐ Composants électriques (uniquement pour audit Eco)
 - ☐ Hybrides : composites, mousses, matériaux naturels
 - ☑ Métaux et alliages
 - ☑ Alliages ferreux
 - ☑ Alliages non ferreux
 - ☑ Alliages d'aluminium
 - ☑ Alliages de cuivre
 - ☑ Alliages de magnésium
 - ☑ Alliages de nickel
 - ☑ Alliages de plomb
 - ☑ Alliages de titane
 - ☑ Alliages de tungstène
 - ☑ Alliages de zinc
 - ☑ Etain
 - ☑ L'argent
 - ☑ L'or
 - ☑ Polymères et élastomères
 - ☑ Elastomères
 - ☑ Polymères

- Moulage
- Forgeage
- Extrusion
- Tréfilage
- Mise en forme de poudres métalliques
- Vaporisation

- Réutilisation
- Reconditionnement
- Recyclage
- Combustion
- Enfouissement

7. L'outil EcoAudit CES Edupack

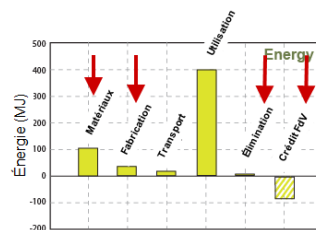
Composant 1	Alliages d'aluminium	Moulage	2.3	Recyclage
Composant 2	Polypropylène	Moulage polymère	1.85	Mise en décharge
Composant 3	Verre	Moulage de Verre	3.7	Réutilisation

Energie grise totale

Energie de fabrication totale

Masse totale

Energie totale de fin de vie



7. L'outil EcoAudit CES Edupack

Phase de transport Type de transport Distance (km)

Etape 1

Camion 32 tonnes

350

Etape 2

Fret maritime

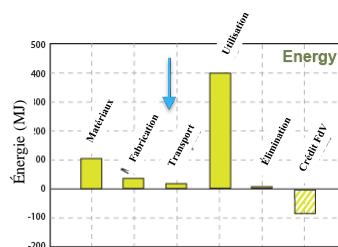
12000

- 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

CO₂ de transport

Liste des types de transport :
MJ / tonne.km
CO₂ / 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

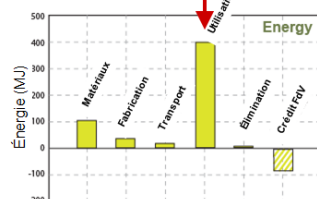
0.5

Heures par jour

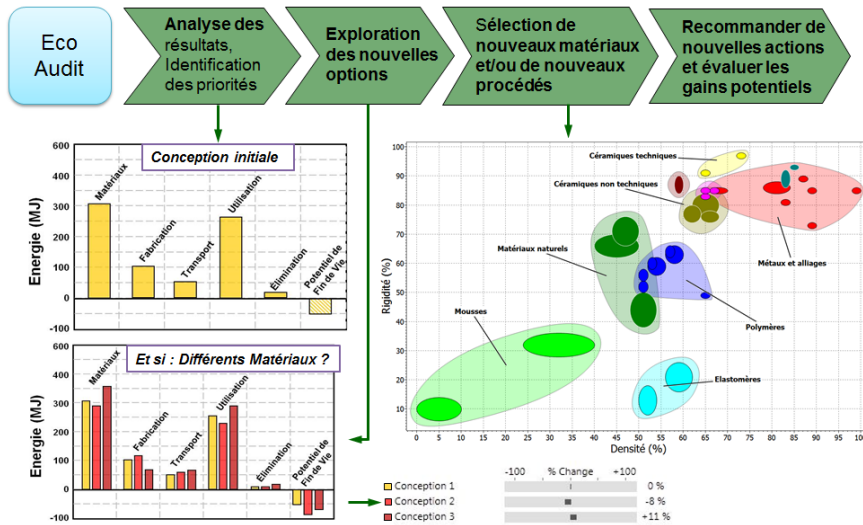
Energie totale ou
CO₂ d'utilisation

Voie de conversion d'énergie

- Combustible fossile en thermique - clos
- Combustible fossile en thermique - aéré
- Combustible fossile en électrique
- Combustible fossile en mécanique
- Electrique en thermique
- Electrique en mécanique (Moteur électrique)
- Electrique en chimique (batterie plomb acide)
- Electrique en chimique (Batterie lithium ion)
- Electrique en rayonnements EM (lampe à incandescence)
- Electrique en rayonnements EM (LED)



7. Principe d'une démarche d'éco-audit



7. Un exemple simple : la bouteille d'eau

- Bouteille en PET d'un litre avec bouchon en PP (Lot de 100 unités)
- Moulée par soufflage
- Fabriquée en France, transportée sur 550 km au RU
- Réfrigérée pendant 2 jour puis bue

