

Sélection des matériaux

Quels outils pour faire le meilleur choix ?

<http://sdm.univ-lyon1.fr/>

Science Des Matériaux



Enseignants

Jean Colombani

04 72 44 85 70

jean.colombani@univ-lyon1.fr

Damien Le Roy

04 72 43 15 19

damien.le-roy@univ-lyon1.fr

Oriane Bonhomme

04 72 44 85 58

oriane.bonhomme@univ-lyon1.fr

Pauline Schlosser

04 72 65 53 41

pauline.schlosser@univ-lyon1.fr

Supports de cours : Jean Colombani, Laurent Joly et Vittoria Pischedda

<http://sdm.univ-lyon1.fr/>

<http://ilm.univ-lyon1.fr/>



Université Lyon 1 et CNRS

Cadre de vélo : aciers

- le plus courant
- rigide, facile à travailler, peu coûteux
- lourd, sujet à la corrosion



vélo tandem



Pashley-Moulton TSR

- cadres premier prix:
(aciers au carbone)
- cadres de qualité:
(aciers Cr-Mo ou Mn-Mo)

Alliages d'aluminium

- plus légers que les aciers
- moins résistants / endurants (→ tubes plus épais)
- facile à souder ; meilleure tenue à la corrosion



vélo électrique



vélo pour enfant

Alliages de titane



vélo couché

- très cher
- résistance *spécifique* et tenue à la corrosion très bonnes
- rigidité spécifique faible



Composites (fibres de carbone)

- légèreté, résistance, tenue en corrosion, flexibilité de mise en forme
- anisotropie → réponse différente suivant l'orientation de l'effort
- tenue aux chocs médiocre, prix très élevé



vélo de course triathlon

Bois / bambou

- résistance / rigidité spécifiques excellentes
- esthétique et écolo



bois



carton



draisienne



bambou

Craig Calfee

Choix de matériau : évolution

- Construction : pierre, bois → béton, acier
- Transport : métaux → composites
- Accessoires : céramiques → plastiques

innovation ↔ matériaux

- Electronique/informatique : semi-conducteurs, nanomatériaux, cristaux liquides, disques optiques, fibres optiques



Santé et pollution

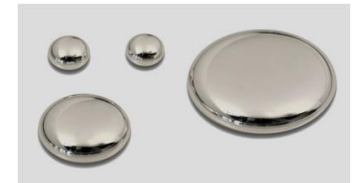
❖ **plomb** : retiré de l'essence automobile mais encore utilisé dans l'industrie



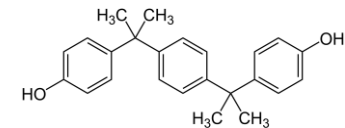
❖ **amiante** : interdite en France depuis 1997



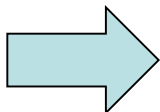
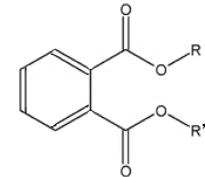
❖ **mercure** : traité international en négociation depuis juin 2010 par le PNUE



❖ **bisphénol** : interdit en 2012 en France pour la fabrication des biberons



❖ **phtalates** : interdites en 2006 en France dans les jouets destinés aux enfants de moins de 3 ans



connaître les matériaux et leurs propriétés

Propriétés des matériaux

propriétés mécaniques

rigidité, résistance, dureté, ductilité, fragilité,
ténacité, amortissement, frottement, ...

propriétés chimiques

tenue à la corrosion, aux solvants, ...

propriétés physiques

- électriques (conductivité, constante diélectrique, ...)
- magnétiques (susceptibilité magnétique, ...)
- optiques (transparence, réflectivité, couleur, indice, ...)
- thermiques (conductivité, capacité calorifique, ...)

Propriétés mécaniques

Domaine élastique

- modules d'élasticité (Young E , Coulomb G , compression K) [GPa]
- coefficient de Poisson $\nu = - \varepsilon_t / \varepsilon$ [sans dim.]

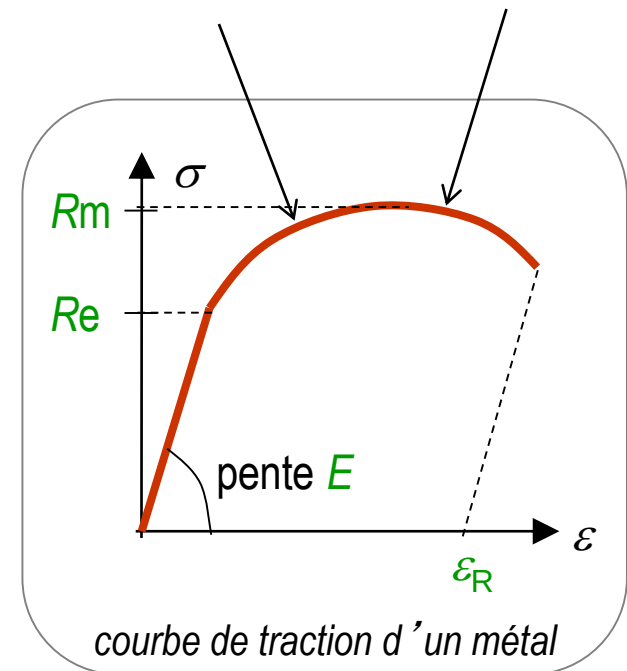
Domaine plastique

- limite élastique Re (traction/compression) [MPa]
- résistance en traction Rm [MPa]
- déformation après rupture ε_R [sans dim.]
- dureté H [sans dim.]

Quizz :

rigide
ductile
élastique/souple
résistant
dur
fragile
mou

E faible
 ε_R élevé
 E élevé
 H élevé
 ε_R faible/nul
 Re / Rm élevé
 H faible

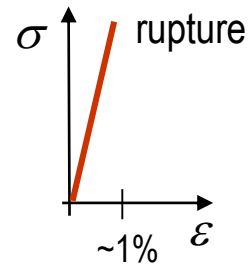


Propriétés mécaniques

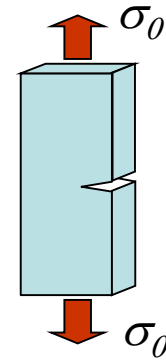
Rupture fragile

- ténacité K_{Ic}

[MPa m^{1/2}]



*courbe de traction
d'un matériau fragile*

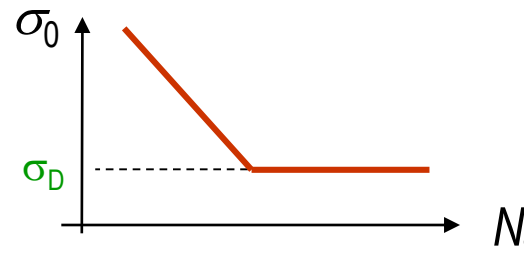


essai de fissuration

Fatigue

- limite d'endurance σ_D

[MPa]



fatigue : courbe de Wöhler

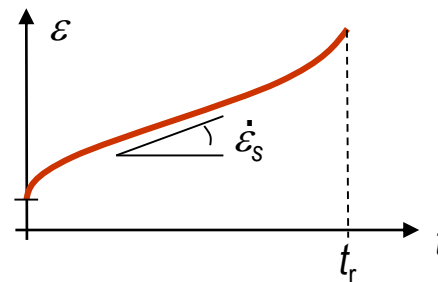
Fluage

- vitesse de fluage $\dot{\varepsilon}_s$

[% s⁻¹]

- durée de vie t_r

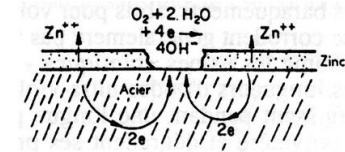
[s]



Propriétés chimiques

- Oxydation (sèche et aqueuse)
- Protection contre l'oxydation
(alliages inoxydables, protection sacrificielle)
- Résistance aux acides, aux bases, aux solvants, à la lumière, ...

Oxyde poreux ou fissuré	Oxyde dense	Oxyde volatil
Ni	Al	W
Oxydation rapide ralentissant avec le temps	Oxydation très lente	Oxydation rapide à vitesse constante



Propriétés physiques

- Propriétés électriques
 - conductivité électrique σ
 - permittivité diélectrique ε ...
- Propriétés optiques
 - réflectivité R / transmittivité T
 - densité optique
 - couleur ...
- Propriétés magnétiques
 - perméabilité magnétique μ ...
- Propriétés thermiques
 - conductivité thermique λ
 - capacité calorifique (=chaleur spécifique) C_p
 - température de fusion T_f
 - coefficient de dilatation thermique α ...

Autres propriétés

 Masse volumique

propriété intrinsèque

 Prix



 Disponibilité



 Impact environnemental



 Impact sanitaire

 ...

propriétés extrinsèques

Exercices

- Quelle relation physique utiliser pour :
 - limiter une déformation élastique ?
 - éviter toute déformation plastique ?
 - éviter la rupture d'un matériau ductile ?
 - éviter toute rupture par fatigue pour un acier ?
 - éviter la rupture fragile ?
 - choisir le matériau le plus ductile ?
 - limiter une déformation élastique transversale ?
 - éviter la rupture par fatigue pour un alliage d'aluminium ?

Classes de matériaux



Métaux



➤ solides atomiques à liaison métallique

➤ cristallins

denses, conducteurs, opaques, résistants, ductiles, ...



Métaux ferreux

Fe + C (+ ...)



Aciers

- au carbone / non-alliés
- alliés (rapides, inoxydables, ...)

Fontes

- blanches (F+Cémentite)
- grises (F+Graphite)
 - fonte ductile, ...



Métaux non-ferreux

- alliages légers (Al, Mg, Ti, ...)
- alliages de Cu, Zn, Ni, Zr, ...
- terres rares
- métaux réfractaires
- métaux précieux
- métaux nobles
- métaux lourds



Céramiques

liaisons ioniques, covalentes, parfois faibles

alumino-silicates

produits d'argile



ciment

verres minéraux



propriétés chimiques

propriétés physiques

céramiques techniques



carbone

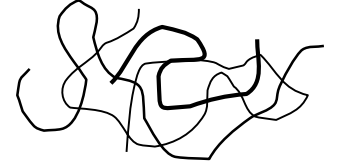


propriétés mécaniques

autre propriété

Polymères

Thermoplastiques

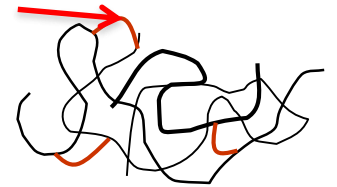


PE, PP, PS, PVC, PTFE, PMMA, PET, PC, PA, polyaramides, PEEK, cellulose...

Thermodurcissables



ponts chimiques



polyesters, phénolastes (PF), aminoplastes, polyépoxydes (EP), lignine...

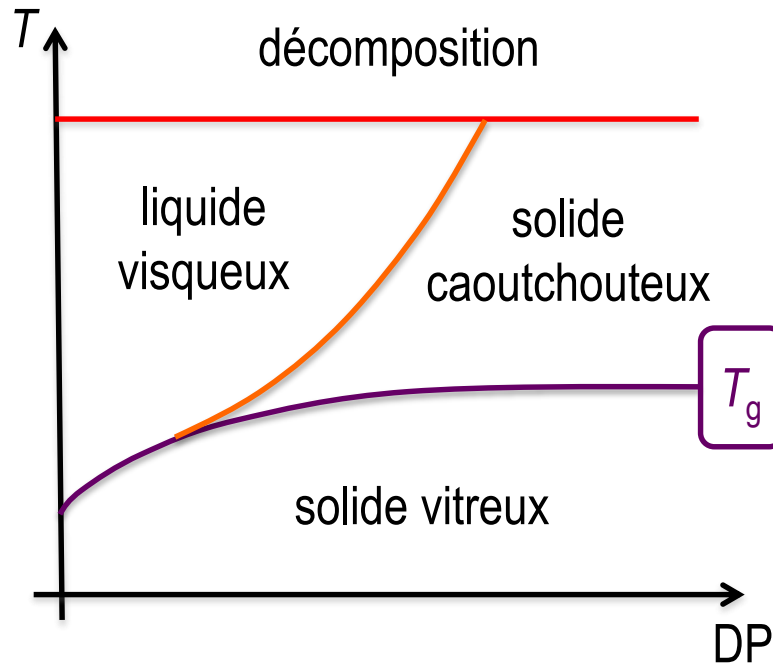
Elastomères



polyisoprènes (caoutchouc, gutta percha...), polyuréthanes (PUR), polysiloxanes/silicones (SI) ...

Polymères amorphes

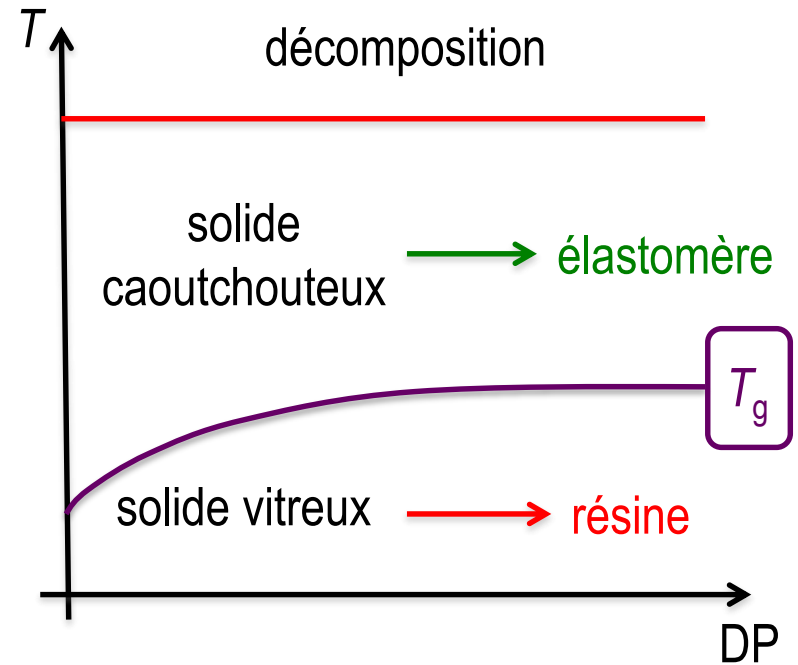
Thermoplastiques



Ex: PS, PMMA, PC...

↳ transparents

Thermodurcissables



Ex : **polyesters**, **phénolastes (PF)**,
aminoplastes, **polyépoxydes (EP)**, **lignine**,
polyisoprènes (caoutchouc, gutta percha...),
polyuréthanes (PUR), **polysiloxanes/silicones (SI)**

Composites

Composite = matrice + renfort

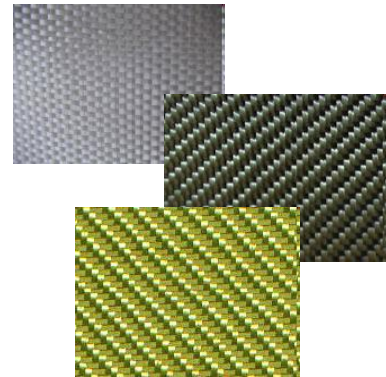


Composite techniques :

surtout matrice polymère → surtout thermodurcissables → surtout polyépoxydes

Renforts les plus fréquents :

- fibres de verre (bon compromis performance mécanique / prix)
- fibres de carbone (excellente rigidité et résistance)
- fibres d'aramide (bonne tenue aux chocs)



Composites à matrice céramique : construction (béton, béton armé)

Démarche

● Fonction (de l'objet) A quoi sert-il ? Que lui impose-t-on ?

Ex. : supporter une charge en compression sans rompre,
être étiré sans dépasser une certaine déformation élastique,
supporter une différence de température sans trop transmettre de chaleur...

● Objectif (commercial, environnemental...) Que faut-il optimiser ?

Ex. : minimiser le prix, maximiser le transfert thermique, minimiser la masse, ...

● Paramètres *fixes* : quels paramètres sont imposés (géométrie, fonction) ? *ajustable* : quel paramètre (unique) peut-on faire varier ? *matériau* : quelles propriétés du matériau sont mises en jeu ?

● Lois physiques régissant le problème :

Ex. : élasticité



loi de Hooke ($\sigma = E \varepsilon$)

propagation de fissure



$K \leq K_c$

résistance



$\sigma < R_m$ ou plus souvent $\sigma < R_m / s$

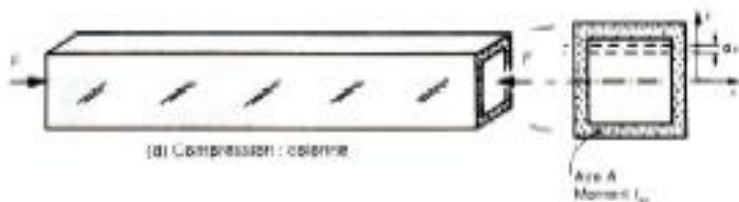
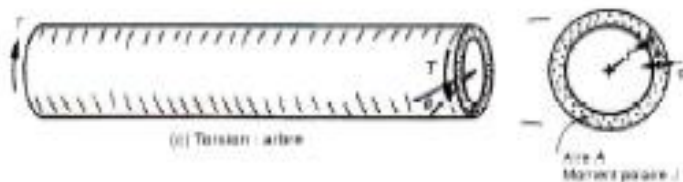
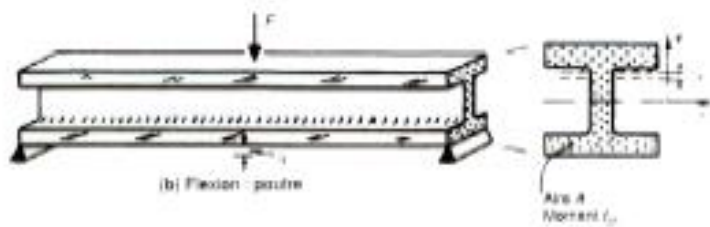
coefficient de
sécurité



Fonctions

- Nom donné à certains composants du fait de leur fonction quelle que soit leur géométrie

Nom	fonction
barre	➤ supporte charge en traction
poutre	➤ supporte moment de flexion
arbre	➤ supporte couple de torsion
colonne	➤ supporte charge en compression



Exemple de démarche

● Conception d'une colonne cylindrique :



1) Fonction : soutenir un toit → supporter une charge en compression F
avec un allongement élastique limité

2) Objectif : minimiser la masse M

3) Paramètres :

- *fixés* par le cahier des charges :

-
-
-

- *ajustable* :

-

- *matériau* :

- domaine élastique →
- masse minimale →

4) Equations :

• exprimer l'*objectif* en fonction des autres paramètres :

• équation physique liée à la *fonction* :

Fonction objectif



5) Fonction objectif : objectif exprimé sans paramètre ajustable

Ex. : masse M

Ex. : section de la colonne S

1) isoler le paramètre ajustable
dans l'équation physique liée à la *fonction*

$$\frac{F}{S} = E \frac{Dh}{h} \Rightarrow S = \frac{Fh}{EDh}$$

2) l'intégrer dans l'expression de l'*objectif*

$$M = \rho h S$$

3) séparer les paramètres fixes et les paramètres matériau

Fonction objectif

Indice de performance

rappel fonction objectif :

$$M = \left(\frac{\rho}{E} \right) \left(\frac{F h^2}{\Delta h} \right)$$

- minimiser la masse $\rightarrow$ minimiser $\frac{\rho}{E} \rightarrow$ maximiser $\frac{E}{\rho}$
indice de performance, noté I , à maximiser

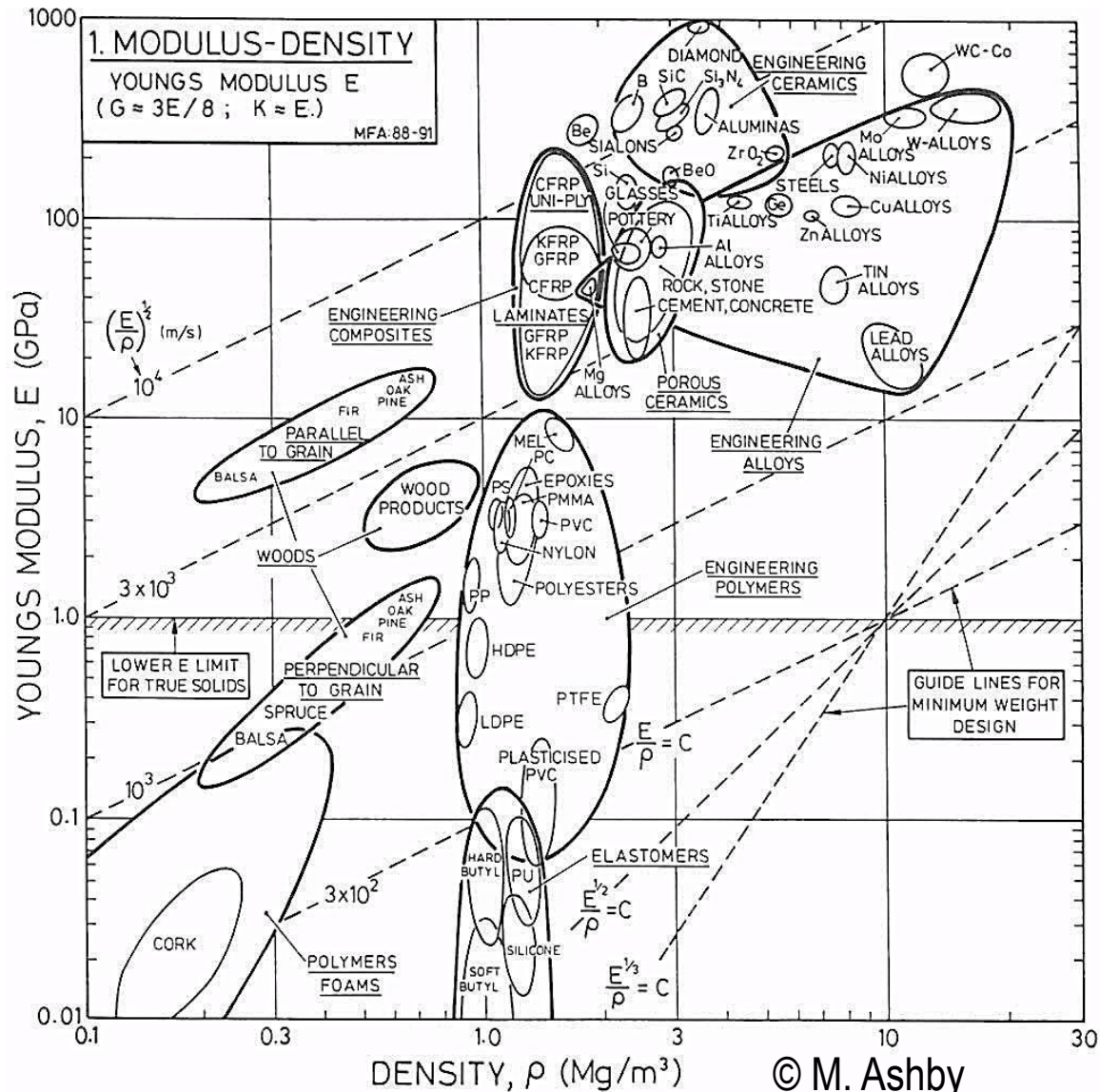
- 6) Indice de performance = $\left\{ \begin{array}{l} \text{partie matériau (objectif à maximiser)} \\ \frac{1}{\text{partie matériau}} \text{ (objectif à minimiser)} \end{array} \right.$

- maximiser l'indice de performance = obtenir le **meilleur compromis** entre deux propriétés **pour un problème donné** (ex. : E et ρ)



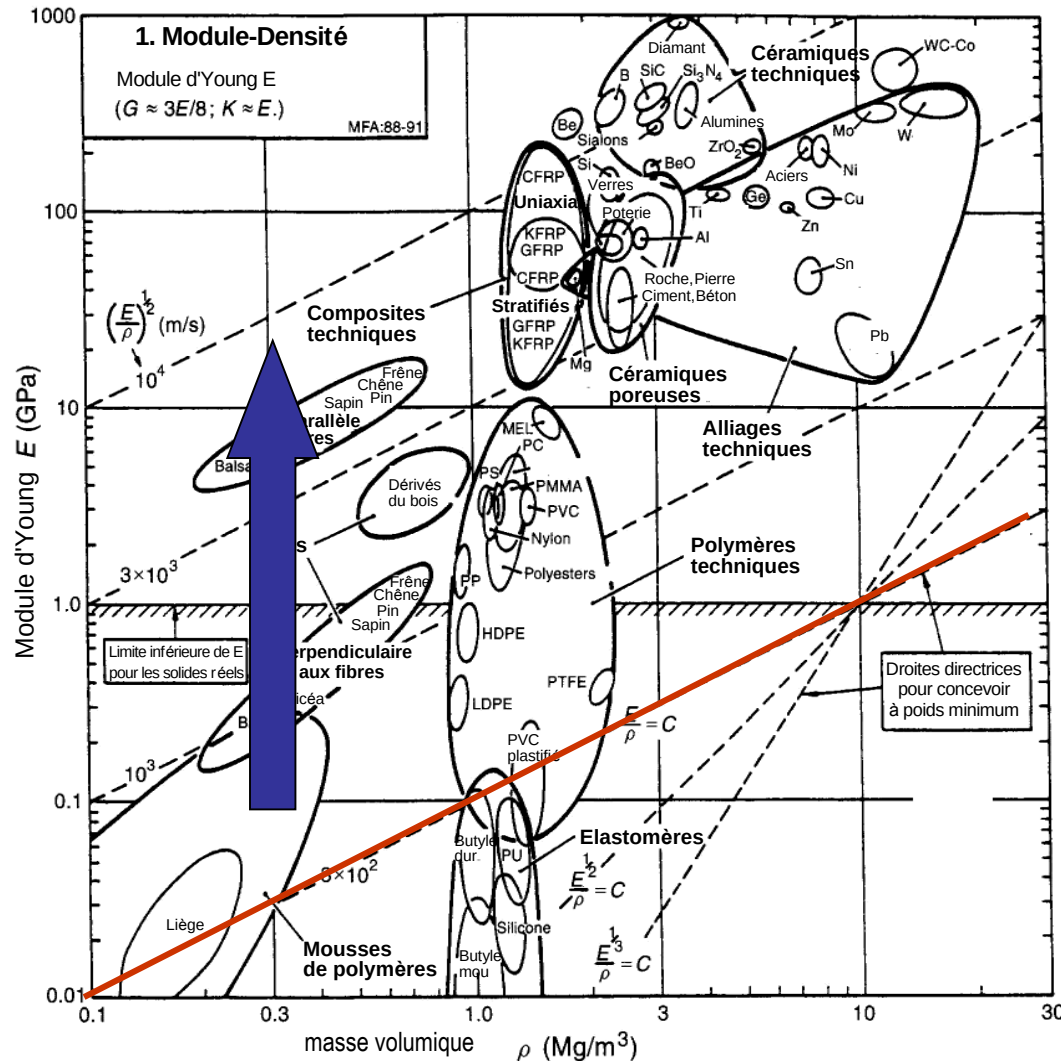
On peut avoir $\frac{E}{\rho}$ grand mais E très petit ou ρ très grand !!

Cartes de propriétés



Diagrammes d'Ashby

7) Procédure : $I = \frac{E}{\rho}$



équation de la droite affine :

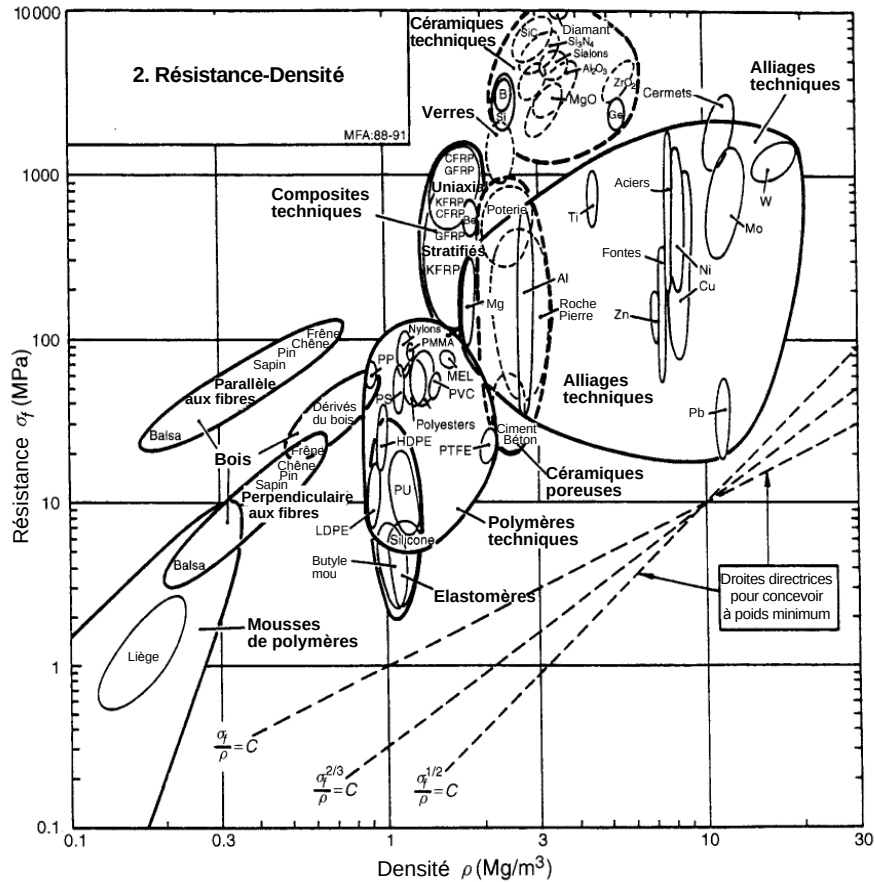
- d'abscisse $X = \log(\rho)$
- d'ordonnée $Y = \log(E)$
- de pente $a = 1$
- d'ordonnée à l'origine $b = \log(I)$

Autres diagrammes



Compromis

masse volumique / résistance

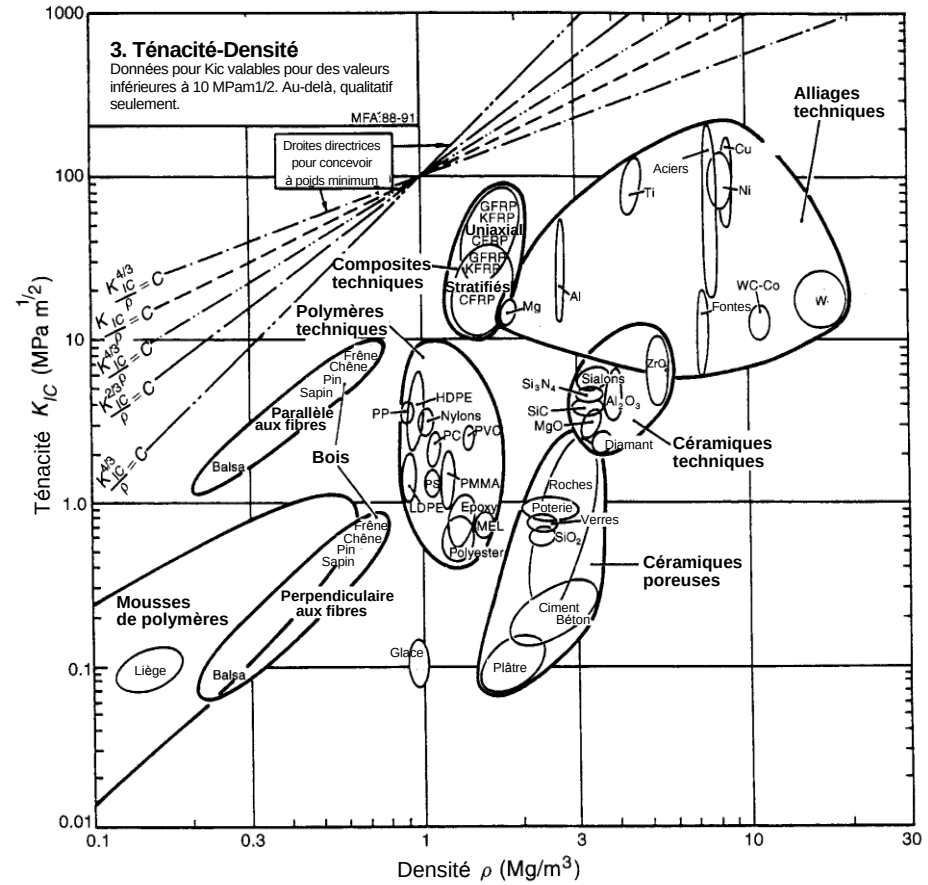


pointillés : résistance en compression



Compromis

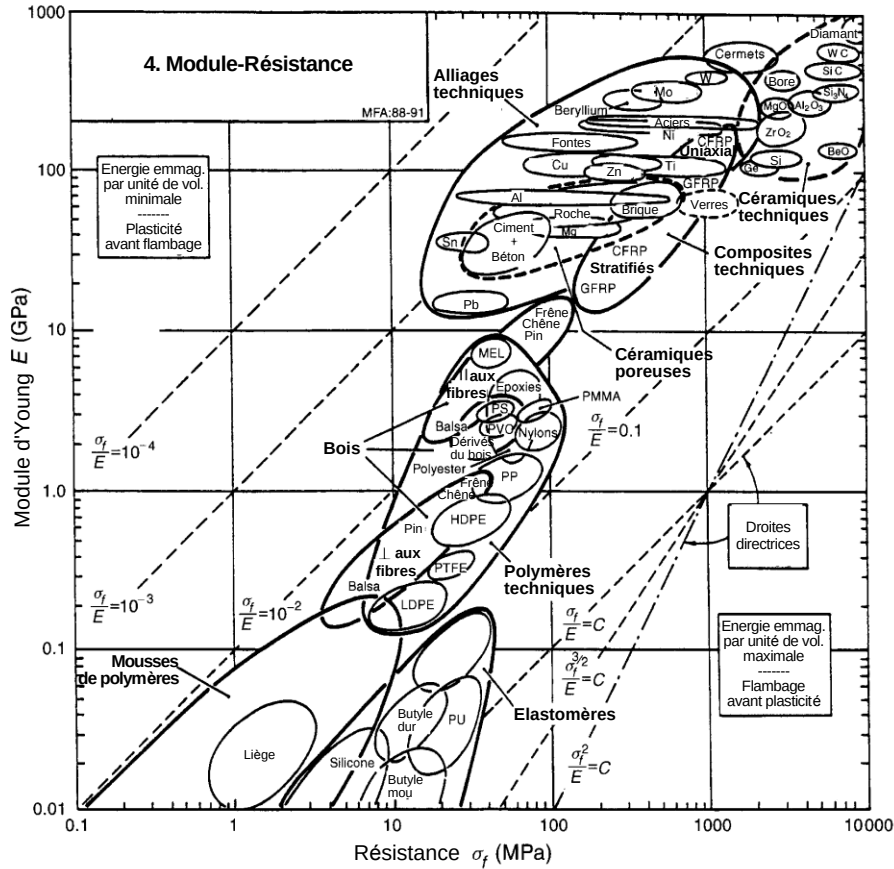
masse volumique / ténacité



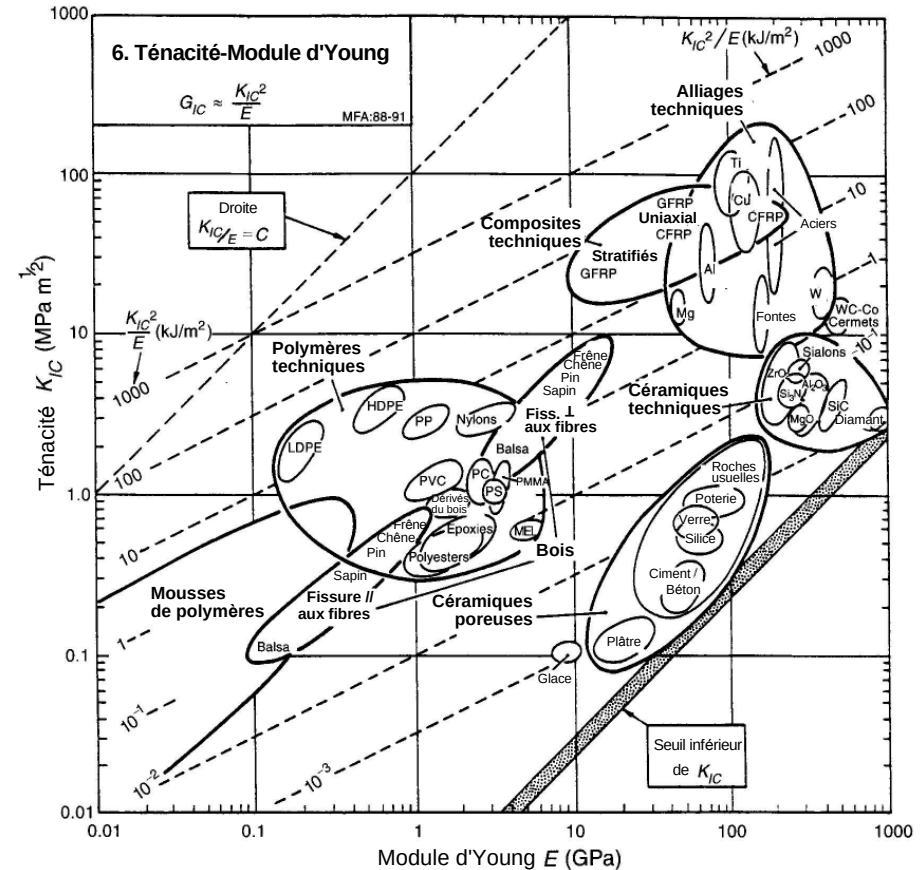
Autres diagrammes



Compromis
rigidité / résistance



Compromis
ténacité / rigidité



7. Ténacité-Résistance

Diamètre de la zone affectée $\approx K_{IC}^2 / \pi \sigma_f$ MFA: 88-91

Plasticité avant rupture

Drôites pour conception sûre

$K_{IC}^2 / \sigma_f = C$

$K_{IC}^2 / \sigma_f = C$

K_{IC}^2 / σ_f (mm)

100

10

1

10⁻¹

10⁻²

10⁻³

10⁻⁴ mm

0.1

0.01

0.1

1

10

100

1000

10000

Résistance σ_f (MPa)

Alliages techniques

Aciers

Ni

Ti

Cu

Al

GFRP

CFRP

Stratifiés

Uniaxial

Composites techniques

Polymères techniques

Bois

Chêne

Pin

aux fibres

HDPE

LDPE

Balsa

PS

PMMA

PVC

PC

Nyons

PP

PE

Derivés du bois

Polystères

MEL

Chêne

Pin

aux fibres

Ciment

Béton

Plâtre

Balsa

Glace

Mousse de polymères

Céramiques techniques

Poterie

Brique etc.

Verres

Céramiques poreuses

Roches usuelles

Silions

ZrO₂

SiC

Al₂O₃

MgO

Si₃N₄

Diamant

Rupture avant plasticité



14. Module-Coût relatif

MFA:89-91

Module d'Young E (GPa)

Coût relatif par unité de volume C_R^ρ (Mg/m³)

Céramiques poreuses

Pierre, Brique, Poterie, Ciment, Béton

Verres

Doux, Aciers, Inox, Fontes, Cu, Al, Zn, Mg, GFRP, Ph

Céramiques techniques

Al_2O_3 , SiC, W, Si_3N_4 , SiAlON, ZrO_2 , Cermets

Alliages techniques

Composites techniques

KFRP, CFRP, Ti

Polymères techniques

Polymides, PTFE, PC, PMMA, Epoxies, Polyesters, Nylons, PP, PE, LDPE, PVC, Balsa, Frêne, Chêne, Pin, Parallèle aux fibres, Perpendiculaire aux fibres, Butyle dur, Butyle mou, Silicoles

Mousses de polymères

Elastomères

Droites pour concevoir à coût minimum

$\frac{E}{C_R^\rho} = C$

$\frac{E^{1/2}}{C_R^\rho} = C$

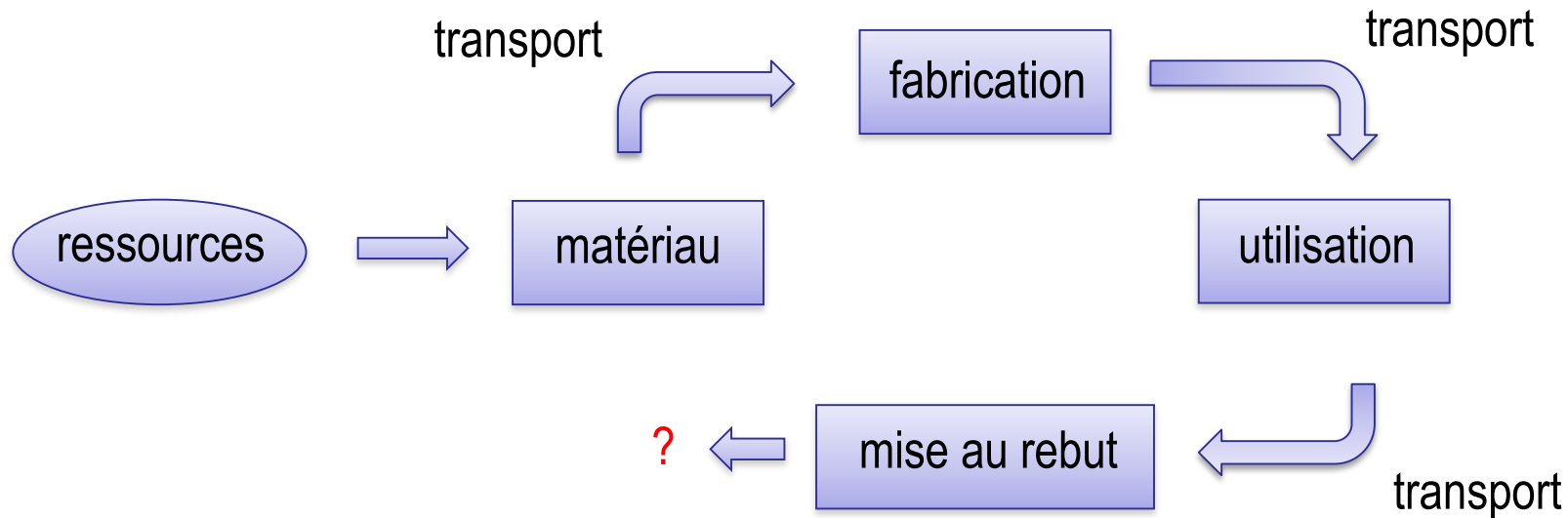
$\frac{E^{1/3}}{C_R^\rho} = C$



(c) Michael F Ashby
(c) Editions Dunod, pour la traduction française

Éco-audit du cycle de vie

- identifier la phase la plus gourmande en énergie

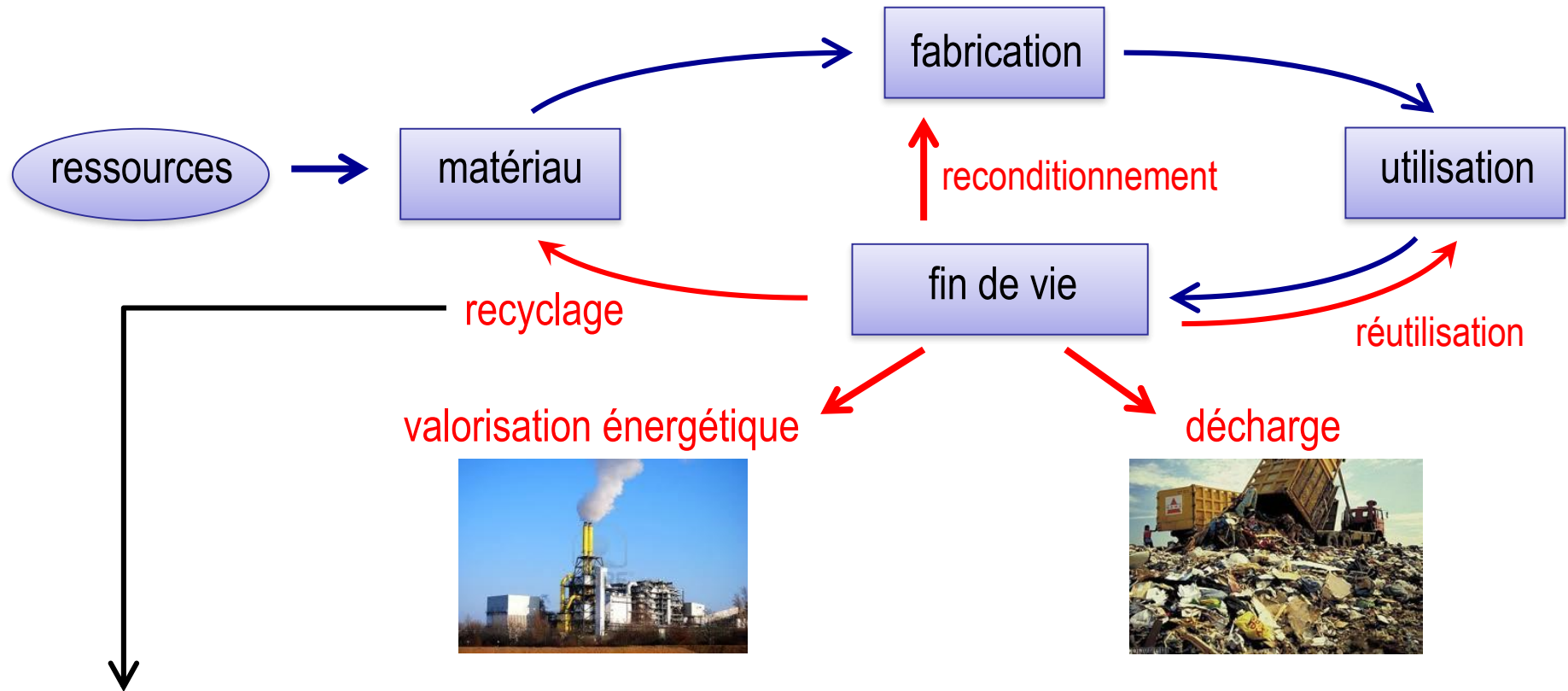


- choix de matériau : optimiser la performance énergétique *de cette phase*

Exercice : avion, automobile, réfrigérateur, parking multi-étages, maison...

Fin de vie : quelles options ?

Comment absorber les déchets générés ?



Collecte, tri, nettoyage ➔ possible / rentable ?

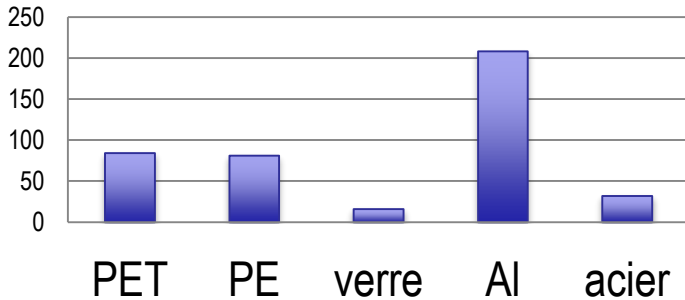
➤ métaux : tri facile, coût recyclage < élaboration ➔ très recyclés

➤ polymères : tri difficile, coût recyclage ~ élaboration ➔ peu recyclés

La meilleure bouteille ?

Phase problématique : *élaboration du matériau*

contenu en énergie (MJ/kg)

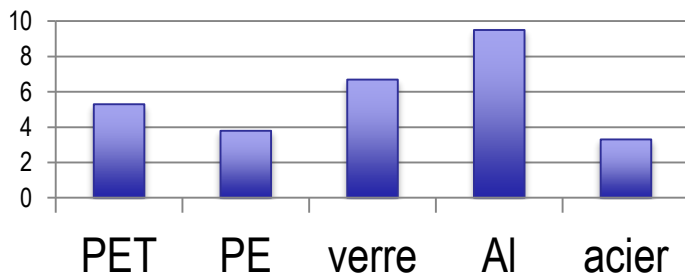


→ verre ?



➤ *énergie par unité de fonction remplie*

énergie par unité de volume
(MJ/L)



→ acier
(puis plastique)



Méthodologie

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1) Fonction de l'objet | issue du cahier des charges fonctionnel |
| 2) Objectif de conception | choix commercial, environnemental... |
| 3) Paramètres | paramètres fixes + ajustable + matériau |
| 4) Equations physiques | une issue de la fonction + une issue de l'objectif |
| 5) Fonction objectif | objectif exprimé sans paramètre ajustable |
| 6) Indice de performance | (inverse des) paramètres matériaux dans la fonction objectif |
| 7) Diagramme d'Ashby | transformer l'indice de performance en équation
d'une droite affine + trouver la droite correspondant
à l'indice de performance maximum |

