



# Critères de sélection des matériaux

## Quels outils pour faire le meilleur choix ?

**Jean Colombani**

04 72 44 85 70

jean.colombani@univ-lyon1.fr

**Laurent Joly**

04 72 43 26 11

laurent.joly@univ-lyon1.fr

**Vittoria Pischedda**

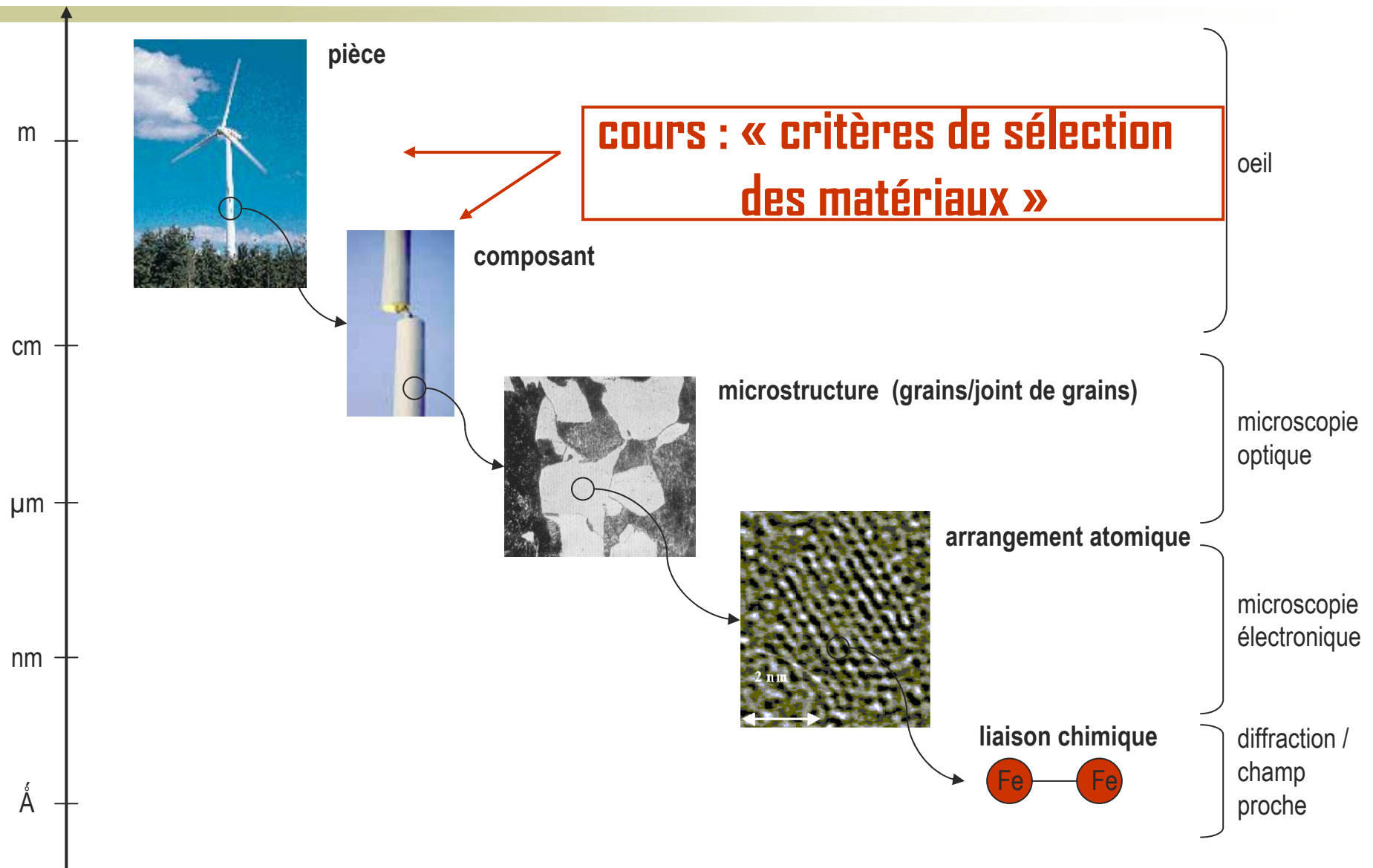
04 72 43 10 18

vittoria.pischedda@lpmcn.univ-lyon1.fr

**Michel Dequatremare**

Michel.Dequatremare@iutb.univ-lyon1.fr

# Structure des matériaux



# Objectifs du cours

## ■ Programme :

« Mettre en œuvre une démarche de sélection des matériaux en prenant en compte les exigences du bureau d'étude et du bureau des méthodes. »

## ■ La démarche de sélection inclut de :

- 1) définir un cahier des charges à partir des conditions d'utilisation de l'objet, y compris coût, dégradation, ...
- 2) définir un ou des critères de choix à partir du cahier des charges : compromis nécessaires
- 3) choisir la matériau dans une base de donnée à partir de ce(s) critère(s)

[

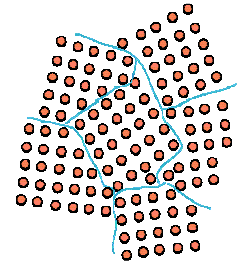
# Classes de matériaux

]

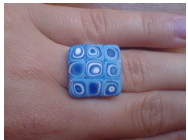
## ■ Métaux :



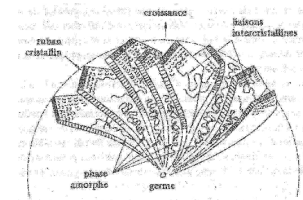
- solides atomiques à liaison métallique
- cristallins
- denses, conducteurs, opaques, résistants, ductiles, ...



## ■ Polymères :



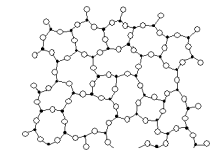
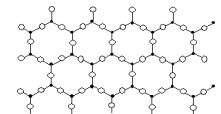
- chaînes d'atomes liées par des liaisons faibles
- amorphes ou semi-cristallins
- légers, isolants, peu résistants, faible Tf, ...



## ■ Céramiques :



- solides moléculaires à liaison covalente et/ou ionique
- amorphes ou cristallins
- plutôt légers, isolants, résistants, réfractaires, fragiles ...



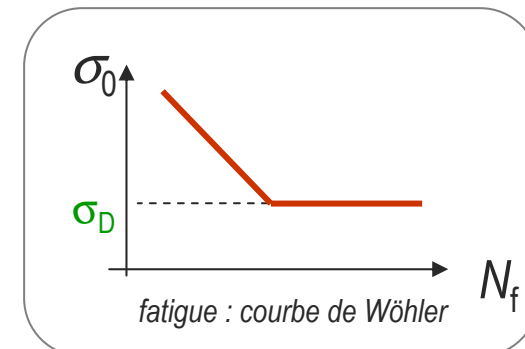
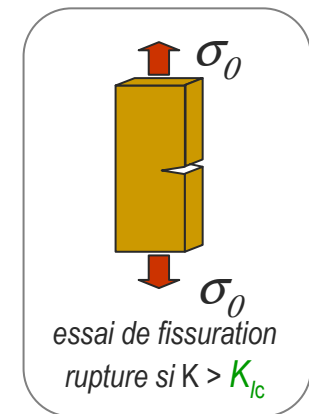
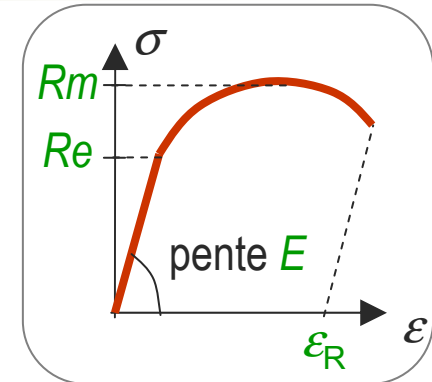
## ■ Composites : association de matériaux

[

# Propriétés des matériaux

## Propriétés mécaniques :

- Modules d'élasticité  
(Young  $E$ , Coulomb  $G$ , compression  $K$ ) [GPa]
- Coefficient de Poisson  $\nu = -\epsilon_t / \epsilon$  [sans dim.]
- Limite élastique  $R_e$  (traction/compression) [MPa]
- Résistance à la traction  $R_m$  [MPa]
- Dureté  $H$  [sans dim.]
- Déformation après rupture  $\epsilon_R$  [sans dim.]
- Ténacité  $K_{Ic}$  [MPa m<sup>1/2</sup>]
- Limite d'endurance  $\sigma_D$  [MPa]



[

# Propriétés des matériaux

]

## Propriétés physiques :

- Propriétés thermiques :
  - conductivité thermique  $\lambda$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]
  - capacité calorifique mass. (=chaleur spécifique)  $C_p$  [J K<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup>]
  - température de fusion  $T_f$  [K]
  - coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  [K<sup>-1</sup>]
- Propriétés électriques :
  - conductivité électrique  $\sigma$  [ $\Omega^{-1}$  m<sup>-1</sup>]
  - permittivité diélectrique  $\epsilon$  [F m<sup>-1</sup>]
- Propriétés optiques :
  - réflectivité  $R$  / transmittivité  $T$  [sans dim.]
  - densité optique [sans dim.]
  - couleur ...
- Propriétés magnétiques :
  - perméabilité magnétique  $\mu$  [H m<sup>-1</sup>]



# Propriétés des matériaux



## Propriétés chimiques = réactivité – corrosion :

- Oxydation : réaction avec l'oxygène de l'air, de l'eau  
seul 2 métaux inoxydables : or et platine  
céramiques et polymères peu oxydables
- Acides
- Bases
- Solvant : céramiques et métaux peu sensibles  
peuvent faire gonfler ou attaquer les polymères



# Propriétés des matériaux



## Autres propriétés intrinsèques :

- Masse volumique  $[\text{kg m}^{-3}]$

## Propriétés extrinsèques :

- Prix
- Impact environnemental
- Disponibilité
- etc.





# Démarche



## 1. Fonction de l'objet : à quoi sert-il ?

Ex. : supporter une charge en compression, être étiré, transmettre le courant, ...

## 2. Objectif : que faut-il optimiser ?

Ex. : minimiser le prix, maximiser la résistance, minimiser le poids, ...

## 3. Contraintes : négociables ou non

Ex. : dimensions imposées, force appliquée, ...

paramètres ajustables

conditions imposées (faible déformation, pas de rupture, bon conducteur, ...)

## 4. Lois physiques régissant le problème :

Ex. : élasticité

propagation de fissure

résistance

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

→  $K \leq K_c$

→  $\sigma < R_m$

## 5. Expression de l'objectif : fonction des paramètres fonctionnels ( $F$ ), géométriques ( $G$ ) et du matériau ( $M$ )

$$(O) = f\{(F)(G)(M)\}$$

[

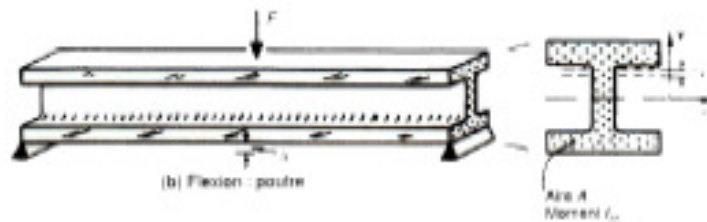
## Fonctions

]

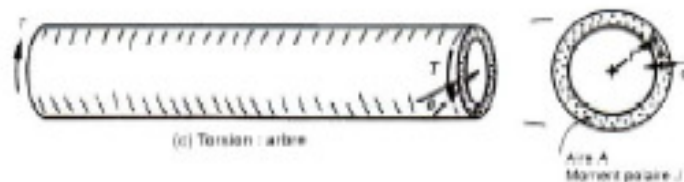
Nom donné à certains composants du fait de leur fonction  
quelle que soit leur géométrie



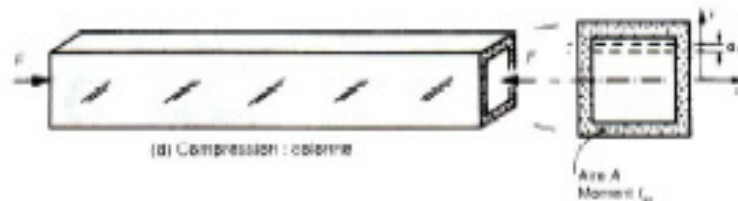
une **barre** supporte une charge en **traction**



une **poutre** supporte un moment de **flexion**



un **arbre** supporte un couple de **torsion**



une **colonne** supporte une charge en **compression**

# Exemple de démarche

## Conception d'un pied de table cylindrique

1) Fonction : soutenir un plateau  $\Rightarrow$  supporter une charge en compression

2) Objectif : minimiser la masse  $m$

3) Contraintes :

- paramètres **fixés** par le cahier des charges

- hauteur du pied  $h$
- force de compression supportable  $F$
- **Condition imposée par la fonction**

Faible déformation élastique  $\longrightarrow$  déformation maximale  $\Delta h$

- paramètre **ajustable**

- rayon du pied  $r$



4) Relations physiques :

- objectif** = masse  $m$

$$m = \rho V = \rho h \pi r^2$$

Diagram showing the derivation of mass  $m$  from density  $\rho$  and volume  $V$ . Arrows point from the labels 'masse volumique (kg m<sup>-3</sup>)' and 'volume' to  $\rho$  and  $V$  respectively in the equation.

- condition imposée**

$$\sigma = E \varepsilon \longrightarrow \frac{F}{\pi r^2} = E \frac{\Delta h}{h}$$

[

## Fonction objectif]

Fonction objectif : expression de l'objectif **m** sans paramètre ajustable **r**

1) isoler le paramètre ajustable  $\sigma = \frac{F}{\pi r^2} = E \frac{\Delta h}{h} \Rightarrow r^2 = \frac{F h}{\pi E \Delta h}$

2) l'intégrer dans l'expression de l'objectif :  $m = \rho h \pi r^2$

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

Fonction objectif :

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

**pas de paramètre ajustable !**

**(F) : Paramètre fonctionnel**

**(G) : Paramètres géométriques**

**(M) : Paramètres propres au matériau**

[

## Indice de performance]

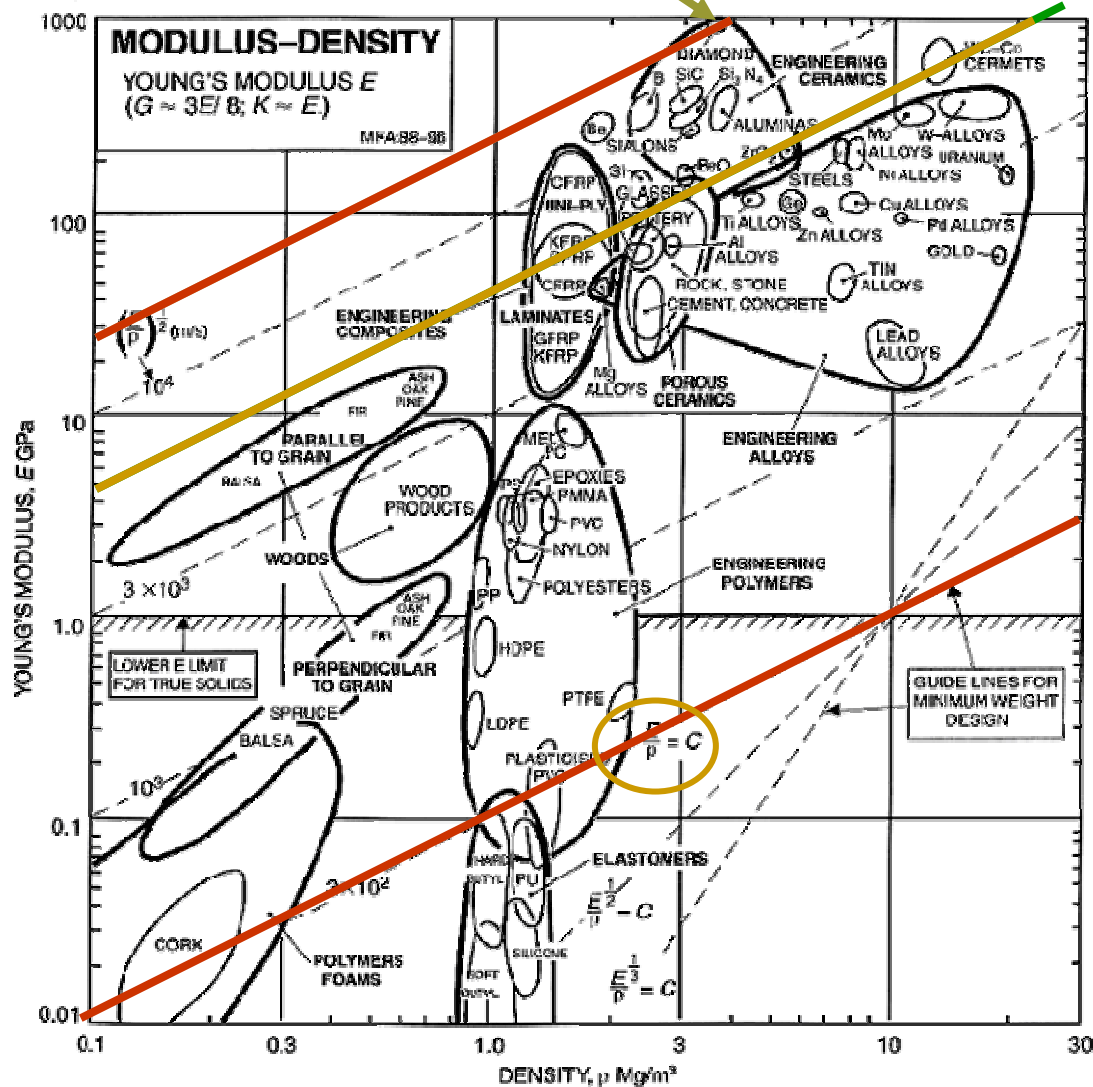
- Rappel :  $m = (F) \left( \frac{h^2}{\Delta h} \right) \left( \frac{\rho}{E} \right) \Leftrightarrow (O) = (F)(G)(M)$
- Objectif : minimiser la masse = minimiser  $(\rho / E)$   
= maximiser  $(E / \rho)$
- L'indice de performance  $I = (E / \rho)$  est le paramètre à maximiser pour obtenir la meilleure performance
- Maximiser l'indice de performance c'est obtenir le meilleur compromis entre deux propriétés pour une fonction donnée

Ex. : maximiser  $(E / \rho)$  = obtenir un matériau à la fois léger et rigide



# Diagrammes d'Ashby

Meilleur matériau : diamant



d'après M. Ashby

$$I = \frac{E}{\rho} \Leftrightarrow E = \rho I$$

$$\log(E) = \log(\rho) + \log(I)$$

Équation de la forme :  $y = ax + b$

Équation de la droite de pente  
 $a = 1$  et d'ordonnée à l'origine  $b = \log(I)$

Maximiser l'indice de performance  
⇒ monter la plus possible la droite  
de pente 1 sur l'abaque

# [ Matériau pour une poutre de section carrée ]

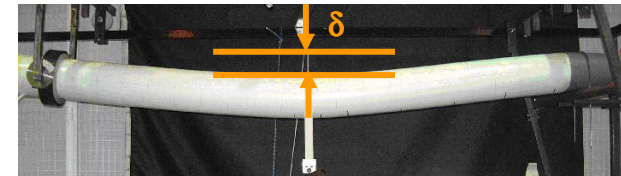
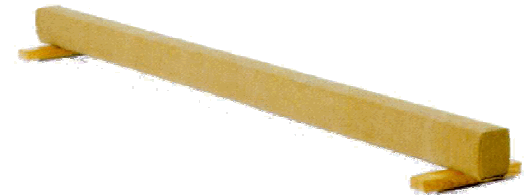
1. Fonction : supporter un plancher  $\Rightarrow$  travail en flexion
2. Objectif : minimiser le prix  $P$
3. Contraintes :

- Paramètres *fixés* par le cahier des charges

- ✓ Longueur de la poutre  $L$
- ✓ Force en flexion appliquée  $F$

Condition imposée

- ✓ Faible déformation élastique  $\rightarrow$  flèche  $\delta$



- Paramètre *ajustable*

- ✓ Côté de la poutre  $a$

## 4. Relations physiques :

- Objectif :  $P = C_m m = C_m \rho V = C_m \rho L a^2$

- Élasticité en flexion :  $\delta = \frac{F L^3}{4 E a^4}$

Masse volumique

Volume

Prix massique (€/kg)



[

# Indice de performance

]

Fonction objectif : Éliminer le paramètre ajustable  $a$  dans l'objectif  $P$

$$\delta = \frac{Fl^3}{4Ea^4} \longrightarrow a^2 = \sqrt{\frac{Fl^3}{4E\delta}} \quad \left. \begin{array}{l} P = C_m \rho l \sqrt{\frac{Fl^3}{4E\delta}} \\ P = C_m \rho l a^2 \end{array} \right\}$$

Fonction objectif  $P = (\sqrt{F}) \left( \sqrt{\frac{l^5}{4\delta}} \right) \left( \frac{C_m \rho}{\sqrt{E}} \right)$  **pas de paramètre ajustable !**

(F) : Paramètre fonctionnel

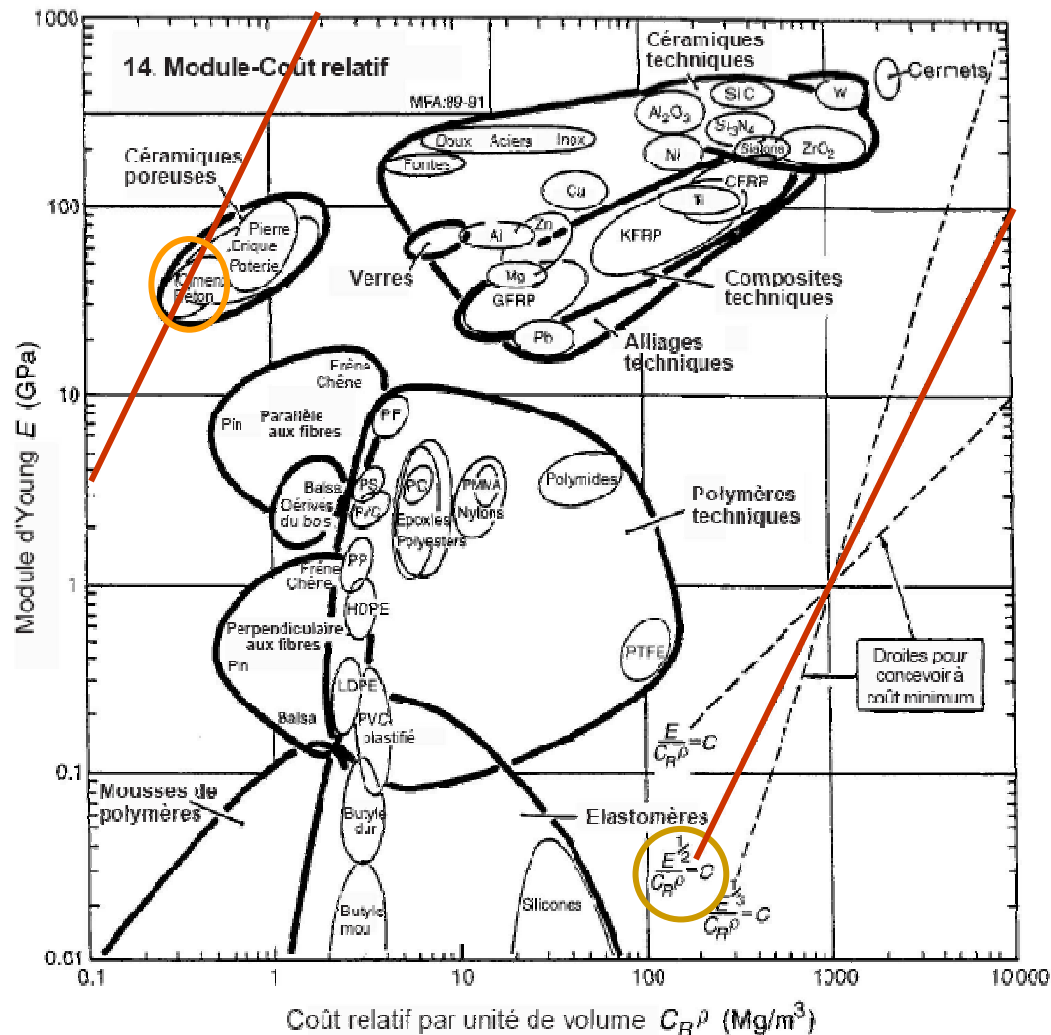
(M) : Paramètres propres au matériau

(G) : Paramètres géométriques

Indice de performance

$$I = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{C_m \rho}$$

# [ Diagramme d'Ashby ]



d'après M. Ashby

Procédure :

$$I = \frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$$

$$\log(E^{1/2}) = \log(C_m \rho) + \log(I)$$

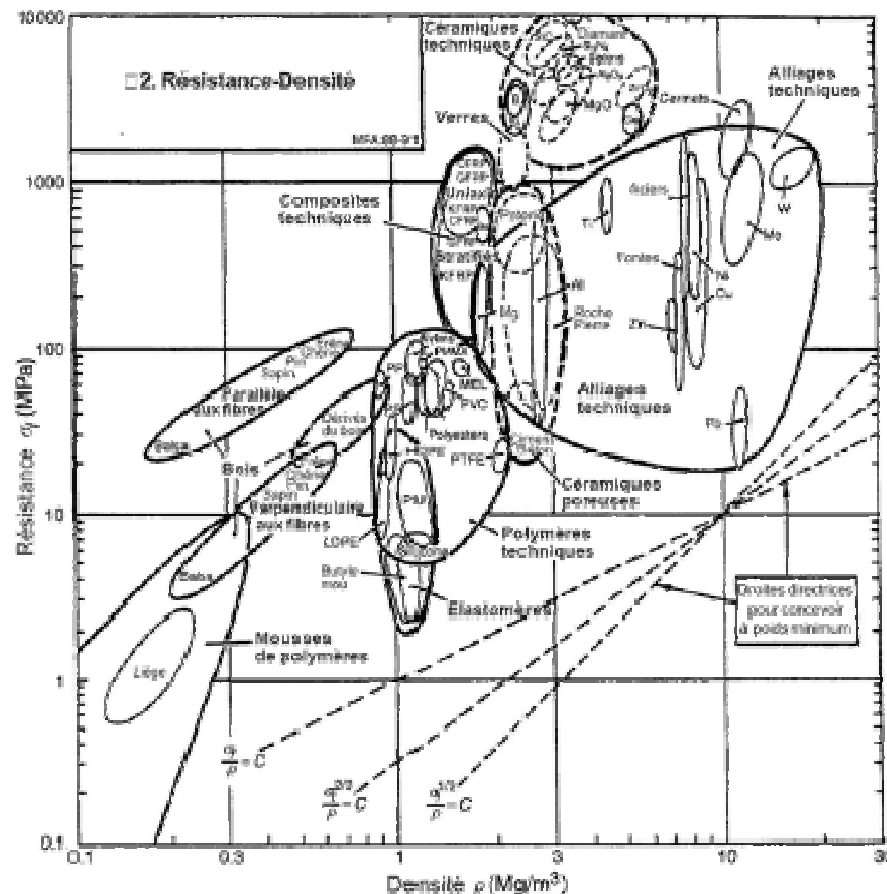
$$\frac{1}{2} \log(E) = \log(C_m \rho) + \log(I)$$

$$y = 2x + 2\log(I)$$

Équation de la droite de pente 2 et d'ordonnée à l'origine  $2\log(I)$

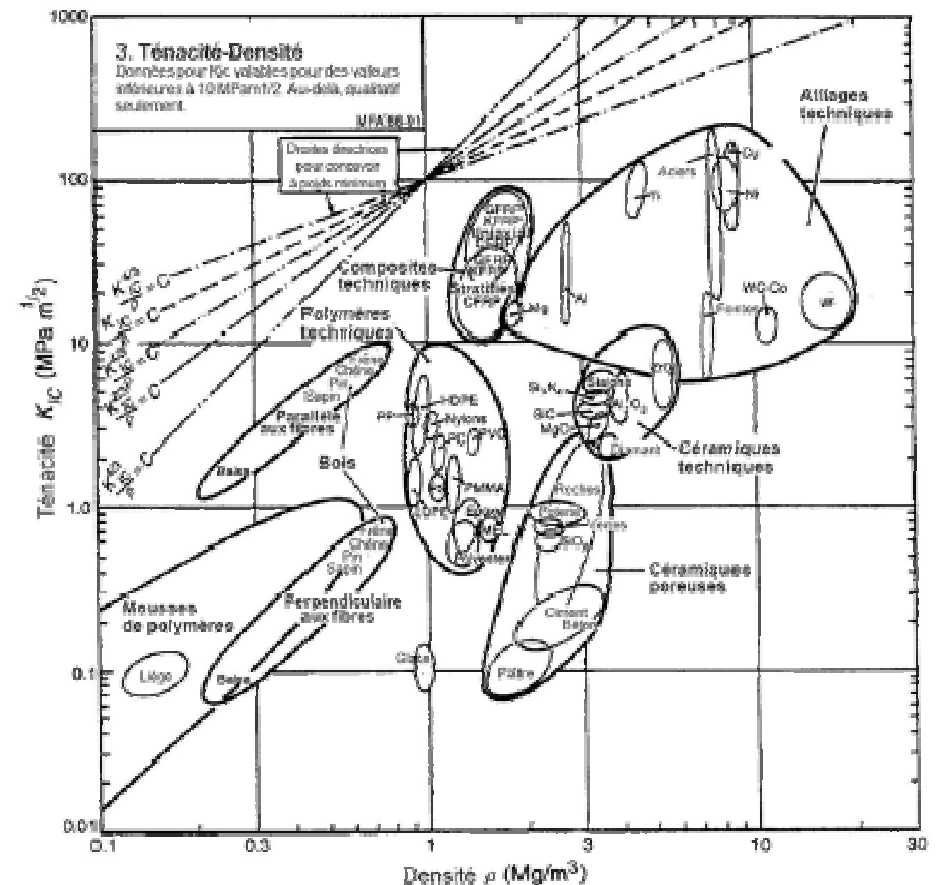
# Autres diagrammes

Compromis :  
Masse volumique / Résistance



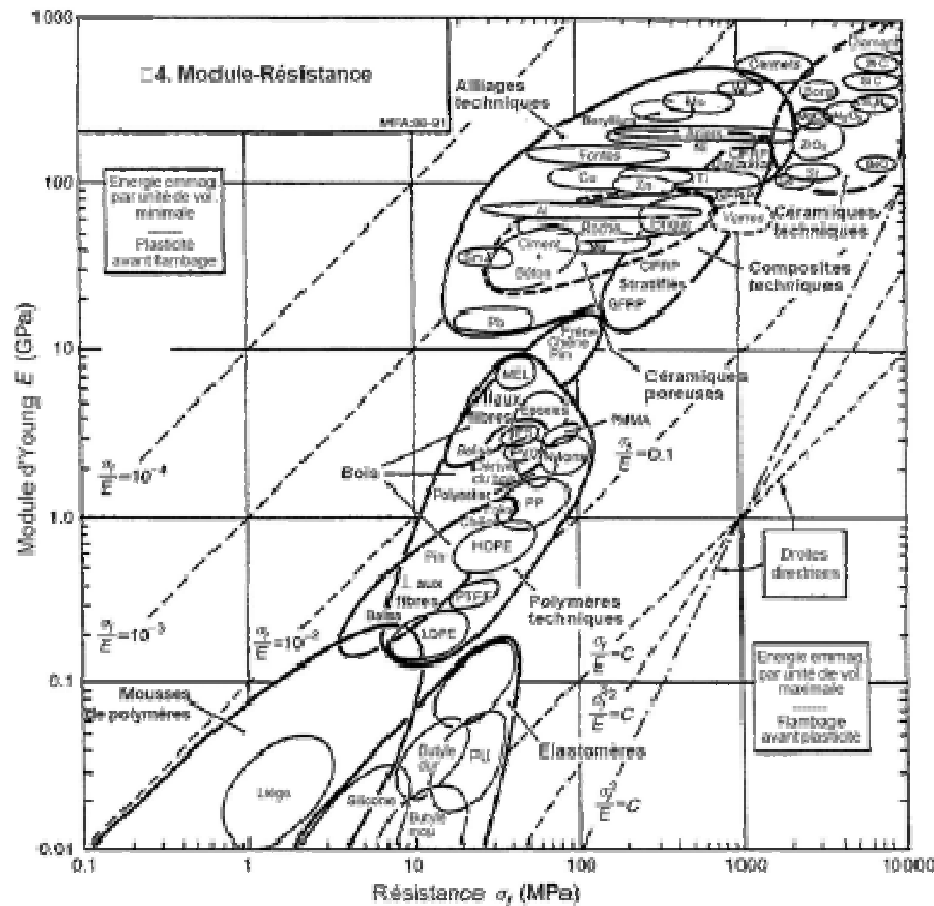
d'après M. Ashby

Compromis :  
Masse volumique / Ténacité



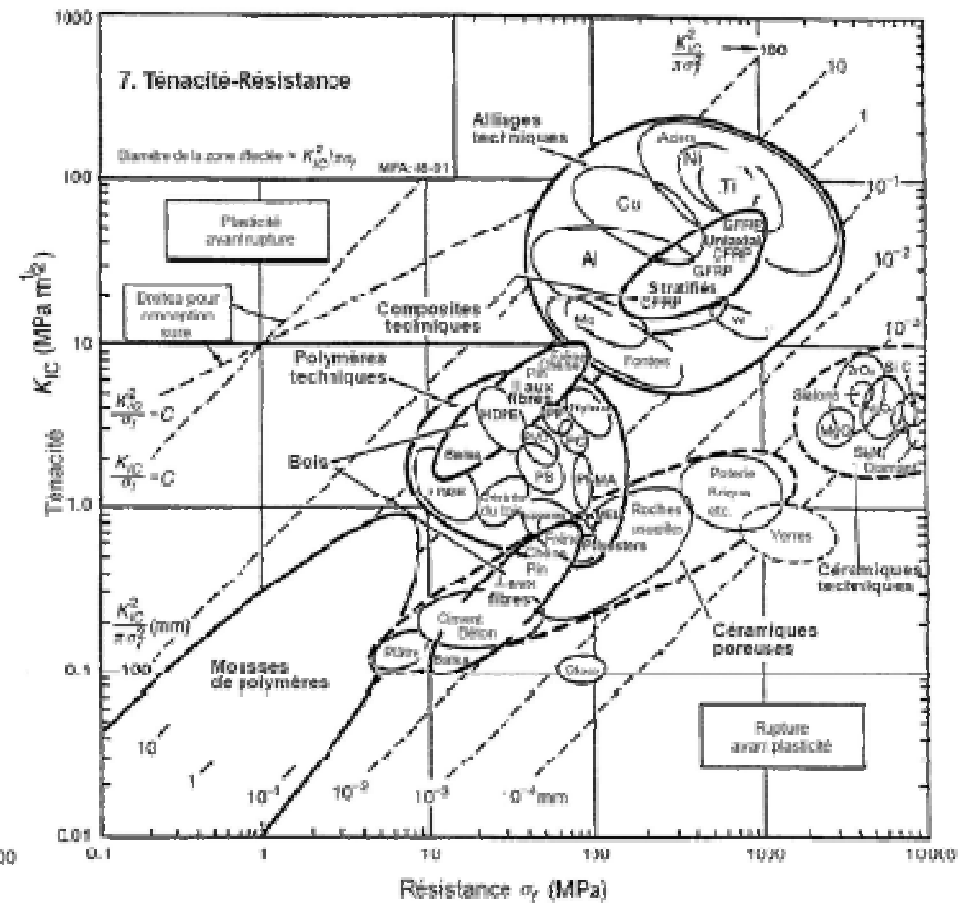
# Autres diagrammes

Compromis :  
Rigidité / Résistance



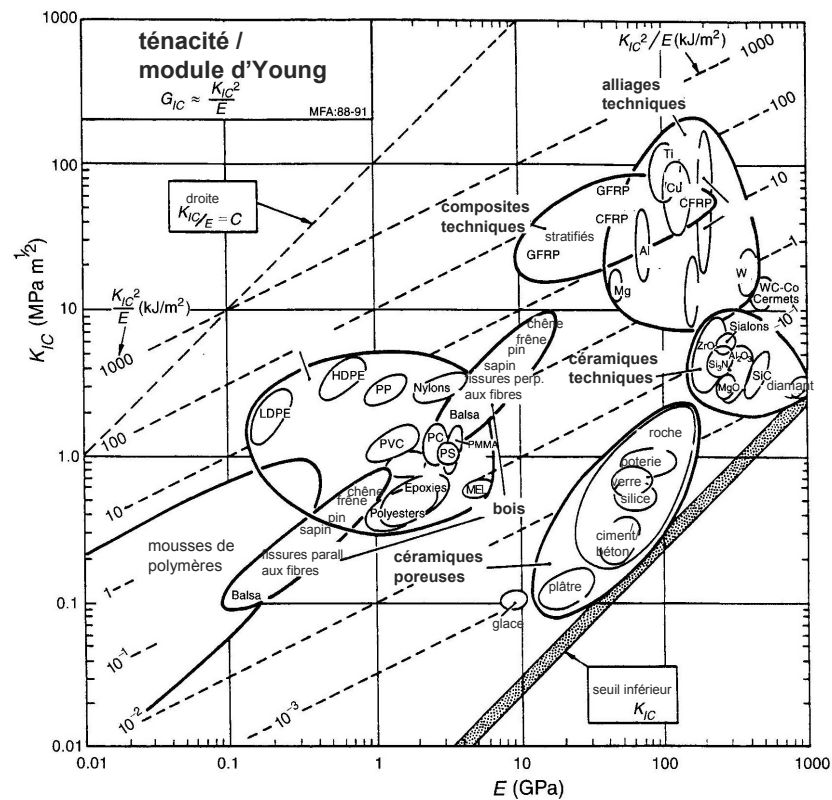
d'après M. Ashby

Compromis :  
Résistance / Ténacité



# Autres diagrammes

Compromis :  
Rigidité / ténacité



d'après M. Ashby

[

## Méthodologie]

Exemple : Une barre de section circulaire

- 1) Définir la fonction de l'objet
- 2) Établir l'objectif  $\longrightarrow$  supporter une charge en traction
- 3) Identifier les contraintes :  $\longrightarrow$  minimiser la masse
  - Conditions imposées  $\longrightarrow$  éviter la rupture
  - Paramètres fixes  $\longrightarrow$  longueur  $l$  ; charge maximale  $F$
  - Paramètres ajustables  $\longrightarrow$  rayon  $r$
  - Paramètres matériaux  $\longrightarrow$  masse volumique  $\rho$  ; résistance à la traction  $Rm$
- 4) Établir les relations physiques  $\longrightarrow M = \rho l \pi r^2$  et  $\sigma = \frac{F}{\pi r^2} = Rm$
- 5) Calculer la fonction objectif  $\longrightarrow m = (F)(l) \left( \frac{\rho}{Rm} \right)$  pas de paramètre ajustable
- 6) En déduire l'indice de performance  $\longrightarrow I = \frac{Rm}{\rho}$
- 7) Tracer la droite correspondante sur l'abaque et trouver le meilleur matériau