

## **TD 29 : Sélection des matériaux par l'ingénieur**

### **Introduction : La démarche de conception (10 minutes au plus !)**

La démarche de conception est centrée ici sur l'innovation : en quoi la connaissance des matériaux va-t-elle permettre d'inventer des solutions innovantes à un problème technologique précis ? Dans cette optique, il convient d'explorer le monde immense des matériaux... d'une manière ordonnée car le coût et les délais sont parmi les contraintes les plus fortes de la conception.

#### ***1. Présentation de la démarche de conception en vue d'une innovation***

Définition du concept : que doit faire l'objet ? Dans quel système est-il intégré ? Comment ce système fonctionne-t-il ? Exemple : un tire-bouchon doit retirer le bouchon d'une bouteille, sans endommager la bouteille ou la vider de son contenu au moment de l'ouverture. Cela paraît simple mais il y a plusieurs manières de faire : tirer (le cep de vigne), levier (comme dans les bars), tirer avec crémaillère (le « Charles de Gaulle »), cisailer l'interface bouchon/bouteille...

Analyse fonctionnelle : quelles sont les fonctions de la pièce à concevoir ? Quelles sont les conditions à satisfaire impérativement ? En quoi une pièce sera-t-elle meilleure qu'une autre ? Cette analyse aboutit à la rédaction d'un cahier des charges, généralement chiffré.

Modélisation : il s'agit de séparer, dans les performances demandées la pièce, ce qui relève du matériau (= ce sur quoi on va le sélectionner), ce qui relève de la géométrie et ce qui relève des autres données connues (une force, une pression, une flèche en flexion, un diamètre...) selon le problème posé. On aboutit à des « indices de performance », sur la base desquels on peut comparer quantitativement les matériaux.

Sélection des matériaux : ici on se fonde sur les indices de performance, sans forcément s'occuper, du moins dans un premier temps, des propriétés et mécanismes physiques ou chimiques qui conditionnent les performances en question. Rien n'interdit, ceci dit, de commenter abondamment en ce sens les graphes fournis.

Analyse critique des solutions retenues : c'est une étape importante. Ici on va vérifier qu'aucune solution existante n'est oubliée (le cahier des charges serait faux ou trop exigeant), aucune solution aberrante n'est donnée (exemple : des joints en diamant). On va également comparer les quelques solutions retenues entre elles et par rapport à l'existant (sur le marché).

#### ***2. Comment se repérer dans le monde des matériaux***

Compromis entre la masse d'information disponible (pas toujours fiable...) et les délais de conception.

Dans un premier temps (préconception) on « ratisse large » pour ne pas oublier une solution innovante (éventuellement pas encore mise en œuvre). A ce stade il ne faut pas être exigeant sur la fiabilité des données : on cherche un ordre de grandeur et une dispersion des valeurs. On peut utiliser des logiciels et des bases de données de grande diffusion, par exemple le *Cambridge Engineering Selector*® (une licence installée sur les PC de l'Ecole en salle LO22).

Dans un deuxième temps (conception), on va préciser les données sur les quelques solutions retenues. Il faut généralement contacter les fournisseurs, se procurer de la matière, fabriquer des éprouvettes ou des échantillons et faire des essais. La simulation numérique est d'un grand secours, pourvu que les données d'entrée (notamment sur les propriétés des matériaux) soient fiables car les résultats y sont généralement très sensibles. Comme la fourniture de données précises coûte cher, on ne l'assure que pour les quelques matériaux sélectionnés à la fin de l'étape précédente.

#### ***3. Illustration : étude de cas*** (l'exercice)

## Exercice : matériaux pour rames d'aviron

### 1. Définition du concept

Il existe évidemment de nombreux moyens de propulser un bateau :

- propulsion par rames (réaction de l'eau)
- propulsion par perches (réaction du sol)
- propulsion par voiles (action du vent)
- propulsion par machine à vapeur : roue à aubes, hélices... (réaction de l'eau + énergie chimique ou nucléaire)

Quelques données historiques :

- L'invention du bateau propulsé par rames est attribuée aux Egyptiens, dès 3300 av. JC et peut-être avant.
- Les courses d'aviron sur la Tamise à Londres datent de 1715 et la première des célèbres courses entre Oxford et Cambridge a eu lieu en 1829.
- L'introduction de l'aviron comme sport olympique en 1900 a donné à ce sport les moyens d'utiliser les meilleurs matériaux disponibles, ce qui a généré des avancées technologiques importantes.

### 2. Analyse fonctionnelle de l'objet

Fonction de la rame : transmettre à l'eau les efforts du rameur, en flexion et en torsion.

Les sollicitations dimensionnantes sont : la masse et le coût. La rigidité est importante, ainsi que la limite à rupture (éviter les matériaux trop fragiles).

La rigidité est fixée car c'est elle qui donne les « sensations » au rameur, qui cherche la reproductibilité pour s'habituer facilement à un nouveau matériel. Pour information : la rigidité est testée en suspendant une masse de 10 kg à 2,05 m du collier (fixation sur le bateau). Une rame rigide se déforme de 30 mm, une rame peu rigide se déforme de 50 mm. La gamme de rigidité d'une rame est donc relativement bien définie.

On cherche donc une masse minimale, à un coût raisonnable. On s'intéressera ici à la partie « tige » qui est essentiellement soumise à des efforts de flexion. Les conditions aux limites sont données sur la Figure 2.

### 3. Rédaction du cahier des charges

Attributs de la rame :

- masse,
- longueur, section, géométrie de la section,
- ténacité, rigidité, résistance à la ruine plastique, à la rupture,
- résistance à la corrosion par l'eau,
- non-toxicité
- coût...

Astreintes :

Il existe des astreintes fortes :

- imperméabilité à l'eau, résistance à la corrosion : doivent être excellentes ;
- énergie à rupture d'au moins  $1 \text{ kJ/m}^2$  ou ténacité d'au moins  $15 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ,
- non-toxicité,
- résistance à la ruine plastique : ne pas plastifier sous le chargement imposé en service ;
- rigidité fixée.

Ne pas satisfaire ces astreintes fortes est rédhibitoire : il est impossible de sélectionner une telle solution.

Il existe aussi des contraintes plus légères, donc négociables en fonction des performances : le coût (par exemple < 100 euros par kg).

Fonction d'objectif :

La propriété objectif n'est pas une contrainte. On ne cherche pas la rame la plus solide possible (on tolère d'en changer de temps en temps), ni la moins chère possible (on vise le marché de la compétition de haut niveau, seul à pouvoir s'offrir les dernières innovations). La fonction objectif est ici la **masse**, qui évite une trop grande surface mouillée donc de trop grands efforts de traînée. On s'apercevra cependant, lors de l'analyse des solutions, qu'il faut éviter les matériaux qui refusent de s'enfoncer dans l'eau (trop légers)...

Géométrie :

La longueur des rames est fixée : 2,98 m pour les rames de couple (2 par rameur) et 3,81 m pour les rames de pointe (1 par rameur).

La section est libre... dans des limites raisonnables : la rame doit être facile à manipuler !

Pour la modélisation, on choisit par exemple un cylindre plein de section circulaire. Noter que ce n'est pas la meilleure structure en termes de rigidité (une section creuse serait meilleure) mais qu'on évite les problèmes de flambement.

4. Modélisation et calcul de l'indice de performance

*Expression de la fonction objectif.*

La masse est le produit du volume par la masse volumique. Le volume est le produit de la section par la longueur. Seule la **section** n'est pas fixée (ainsi évidemment que la masse volumique, nous sommes en train de sélectionner le matériau !)

L'équation est :  $W = \pi \cdot r^2 \cdot L \cdot \rho$ , avec  $W$  la masse,  $r$  le rayon,  $L$  la longueur et  $\rho$  la densité du matériau. C'est le rayon  $r$  qui est inconnu ici, il faut donc utiliser une autre équation pour le déterminer.

*Elimination de l'inconnue*

On utilise l'astreinte en rigidité, qui est considérée comme plus critique que l'astreinte sur la ruine plastique. Il faudra évidemment vérifier, après sélection, que l'astreinte sur la ruine plastique est également satisfaite.

On utilise la formule de résistance des matériaux qui correspond à une situation de flexion avec encastrement ( $C_1 = 1$ ) qui paraît le plus réaliste.

On a alors :  $\delta = \frac{M \cdot L^2}{C_1 \cdot E \cdot I}$ , d'où  $I = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{M \cdot L^2}{C_1 \cdot E \cdot \delta}$  et  $r^2 = \left( \frac{4 M \cdot L^2}{\pi C_1 E \delta} \right)^{1/2}$

On en déduit finalement :  $W = \pi L \rho \left( \frac{4 M \cdot L^2}{\pi C_1 E \delta} \right)^{1/2} = \frac{2}{\pi^{1/2} C_1^{1/2}} \cdot \frac{M^{1/2} L^2}{\delta^{1/2}} \cdot \frac{\rho}{E^{1/2}}$

Dans l'expression précédente, on a séparé les constantes (première fraction), les données connues (moment de flexion, flèche, longueur de flexion) et les paramètres matériau. Les deux propriétés du matériau qui interviennent dans la fonction objectif sont donc le module d'Young et la densité. L'indice de performance à maximiser est donc :

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

### 5. Sélection des matériaux

Le diagramme à utiliser pour classer les solutions est le diagramme liant le module d'Young et la densité. Il ne faut cependant pas oublier les autres contraintes, en particulier la ténacité et le coût.

Pour classer les solutions, on utilise des iso-valeurs de l'indice de performance IP. On les obtient en traçant des droites de pente 2 dans le diagramme liant le module d'Young et la densité.

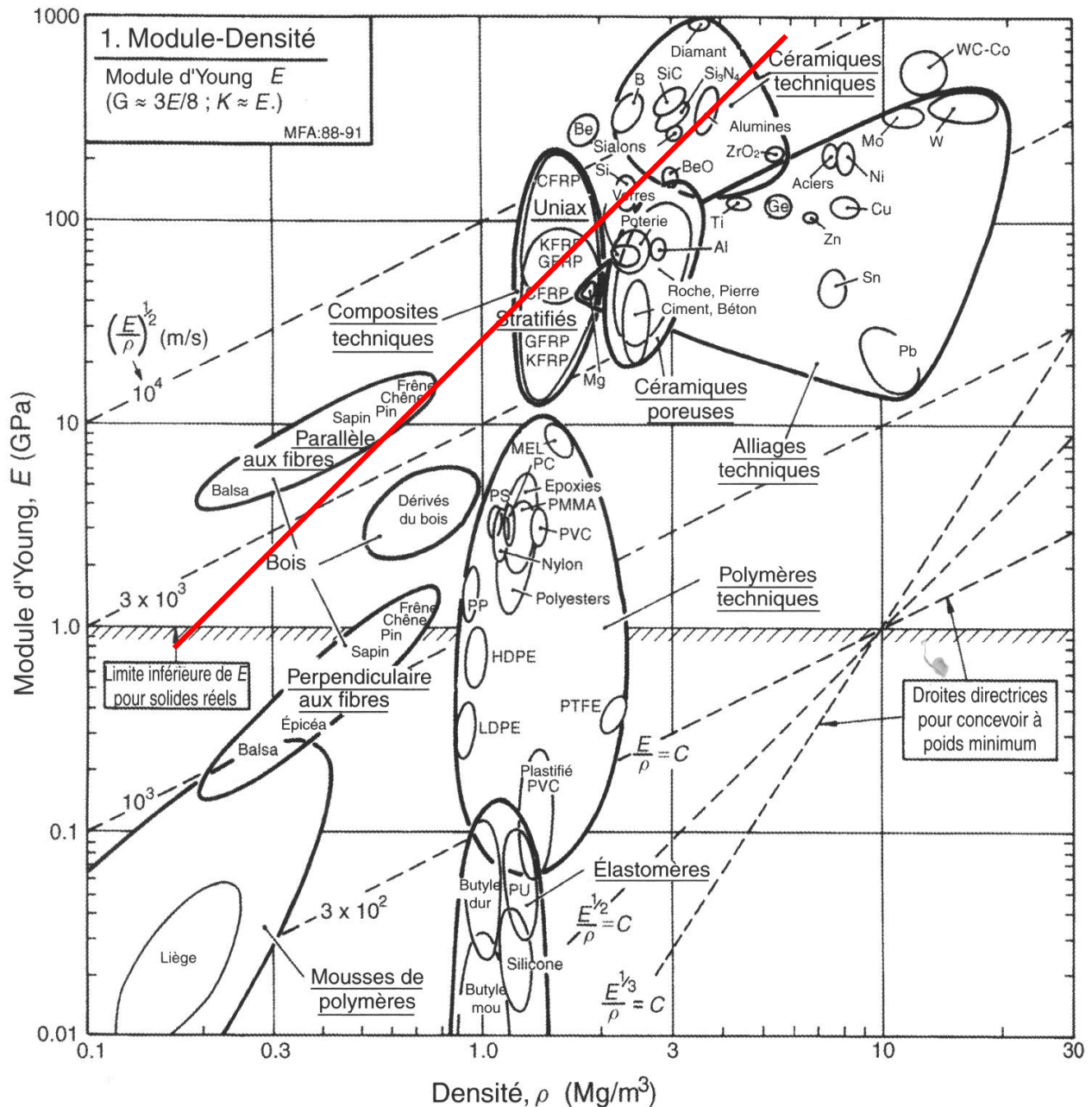


Figure : Sélection des meilleures solutions sur le diagramme module-densité (Ashby, p. 44)

Les solutions qui apparaissent comme les meilleures sont les suivantes :

- béryllium

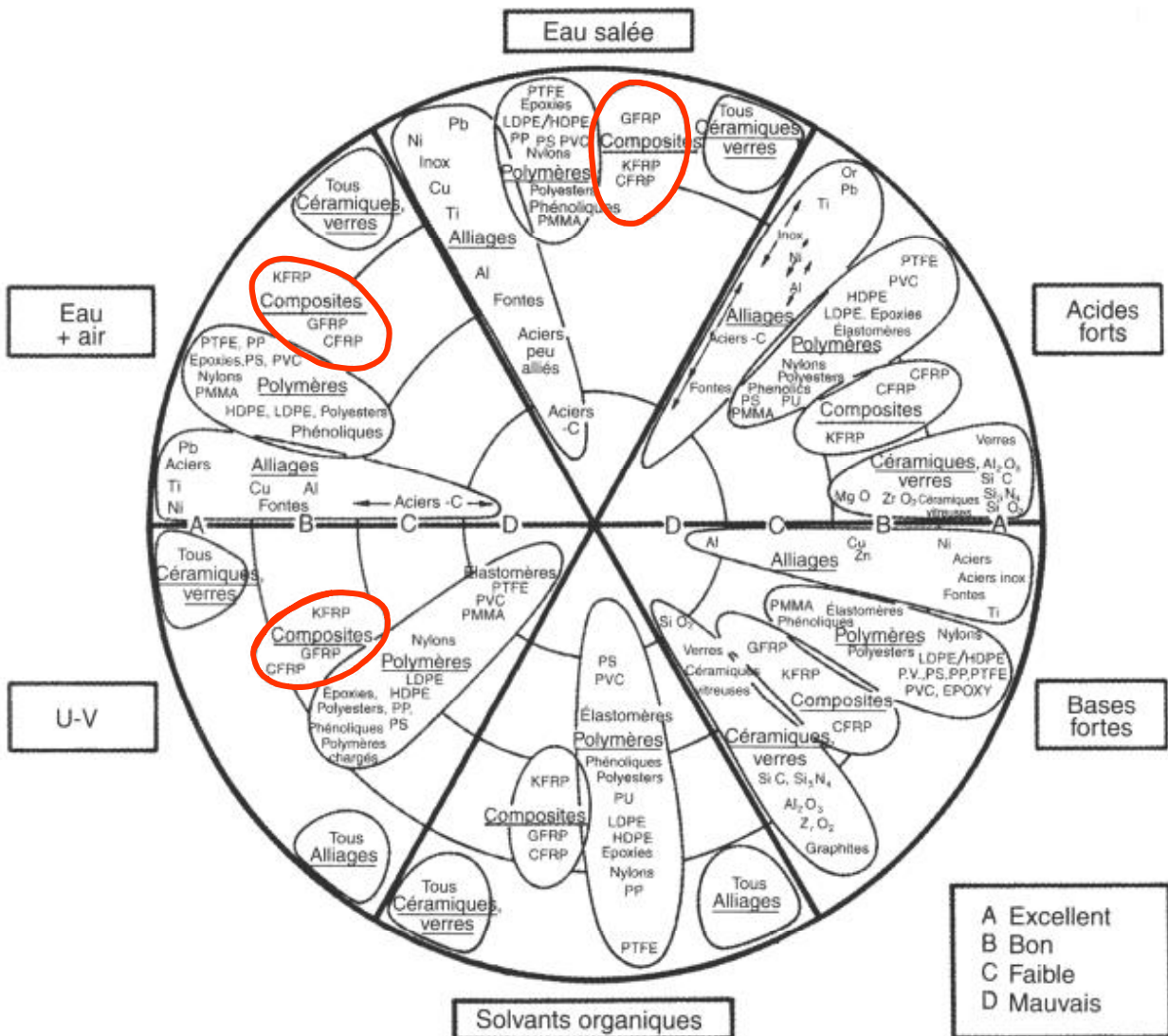
- céramiques techniques
- bois, dont le balsa
- composites à matrice polymère et renforts de fibres de carbone

6. Analyse critique des solutions retenues

Le béryllium est notoirement toxique et doit être éliminé. Les céramiques techniques sont trop fragiles et trop chères. On garde donc a priori le bois et les composites à matrice polymère renforcés par des fibres. Attention aux bois très légers, comme le balsa : la rame doit pouvoir être enfoncée dans l'eau pour jouer son rôle !

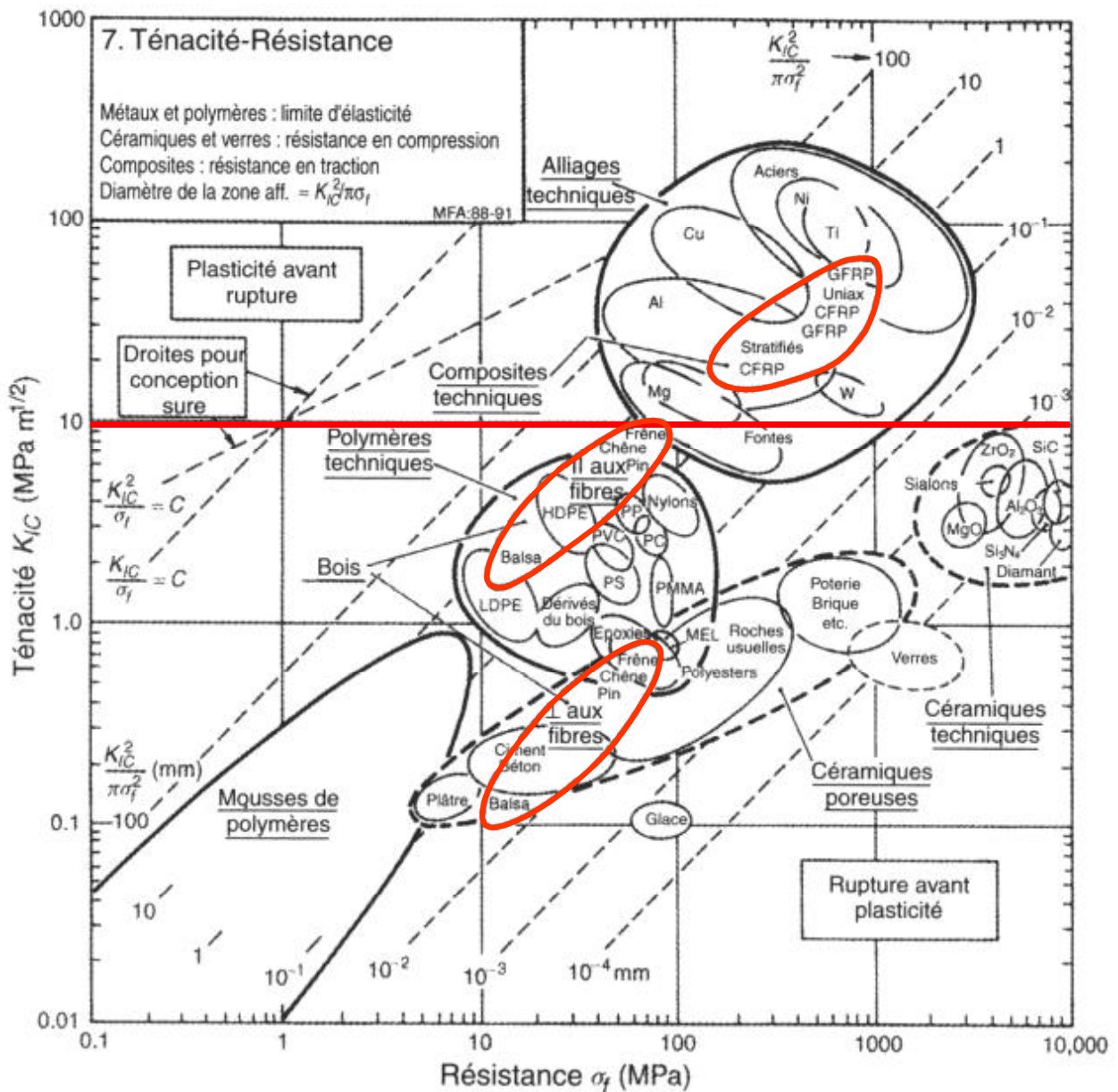
Vérifions à présent que les autres contraintes sont également satisfaites.

Pour l'étanchéité, il faudra sans doute protéger le bois. Ces deux familles de matériaux résistent assez bien aux UV et dans l'eau salée ou aérée.





Résistance à la rupture brutale : on utilise le diagramme ténacité/résistance.



Les composites sont largement assez tenaces. Les bois, dont la structure fibreuse est particulièrement anisotrope, souffrent d'un manque de ténacité perpendiculairement aux fibres mais la rame ne sera pas sollicitée dans cette direction. Il faut donc se fier à la ténacité parallèlement aux fibres, qui reste un point faible de cette famille de matériaux.

Résistance à la ruine plastique : il faut calculer que pour une section standard, la contrainte ne dépasse pas la limite d'élasticité du matériau. On utilise pour cela le calcul du moment à la défaillance.

En supposant une section de 3 cm de rayon (cela sous-estime la section réelle donc le calcul est conservatif) et une force de 400 N appliquée par le rameur d'un côté, donc par l'eau de l'autre, un bras de levier de l'ordre de 3m (cf. rames de pointe, si on retire la palette et la partie de la rame tenue par le rameur), on aboutit au calcul suivant :

Moment appliqué : 1200N.m  
 Moment d'inertie de la section :  $6,36 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$   
 Contrainte : 57 MPa

La limite d'élasticité du matériau, pour un utilisateur « extrême », doit donc être supérieure à 57 MPa. C'est le cas des composites et de nombreux bois, du moins dans le sens qui nous intéresse ici (parallèle aux fibres).

#### Analyse du marché :

- Les rames en bois sont toujours utilisées. Ce sont des bois durs (frêne) qui sont vernis après fabrication. Le frêne est bien le bois qui convient le mieux, d'après les diagrammes ci-dessus. Ces rames sont faites à la main, ce qui induit des coûts élevés : de l'ordre de 250 dollars par rame. La qualité du bois varie non seulement d'une essence à autre mais même d'un arbre à l'autre et ce matériau peut « travailler » s'il est stocké en milieu humide.
- Les rames en composite sont souvent hybrides, avec une partie externe renforcée par des fibres de verre et une partie interne renforcée par des fibres de carbone. Elles sont plus reproductibles, en termes de performances.