

# **METHODES DE SELECTION DES MATERIAUX**

**Cours présenté par  
Dr NORA BOUZEGHAIA**

03/2019

*Université BEN BOULAIID Batna 2  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique*

## ***PREFACE***

Le choix des matériaux est une tâche fondamentale très complexe. En effet, la sélection d'un matériau doit être analysée sous l'angle de l'ingénierie des matériaux, sur celle du design industriel, en tenant compte de toutes les informations qui lui sont associées. Ainsi, dans ce cours, METHODES DE SELECTION DES MATERIAUX, adressé aux étudiants de deuxième année Master en génie des matériaux, nous cherchons à illustrer ces points de vue en adoptant une approche axée sur les propriétés physiques et chimiques des matériaux et sur des méthodes rationnelles d'évaluation de la performance d'un matériau pour une fonction bien précise.

Ce module, basé sur des connaissances acquises préalablement, a pour objectifs ;

- De définir une méthode systématique d'évaluation de la performance d'un matériau en se basant sur les formules mathématiques des exigences fonctionnelles d'un composant (pièce) qui doit répondre à une fonction bien définie avec un objectif bien déterminé.
- De définir la géométrie d'un objet ou d'un produit pour avoir des performances élevées.

Nous retrouvons, à la fin de certains chapitres, des exercices sur l'ensemble des techniques présentées dans le chapitre.

	<b>Pages</b>
<b>Chapitre I</b>	
Généralités sur la conception et le choix de matériaux	
1.1 Introduction	02
1.2 Procédure de conception et choix des matériaux	02
1.2.1 La conception	02
1.2.2 Le produit	02
1.3. Les matériaux en conception	02
1.4 Les différentes étapes du processus de conception	02
1.4.1 Formulation du besoin	04
1.4.2 Décomposition fonctionnelle	04
1.4.3 Les différents types de conception	05
1.4.3.1 Conception originale	05
1.4.3.2 Conception d'adaptation	05
1.4.3.3 Conception de divergence	05
1.5 Le cahier des charges	05
1.6 Les outils de conception et données des matériaux	06
1.7 Étapes de sélection des matériaux	06
1.8 Fonction, matériau, géométrie et procédés	07
1.9 La sélection multicritères dans la conception	08
<b>Chapitre 2</b>	
Classification et propriétés des matériaux	
2.1 Introduction	10
2.2 Les grandes familles de matériaux	10
2.2.1 Les différents types de liaisons chimiques	10
2.2.2 Classification des matériaux	10
2.2.2.1 Les métaux et leurs alliages	11
2.2.2.1 Les céramiques	12
2.2.2.3 Les polymères	13
2.2.2.4 Les matériaux composites	14
2.3 Approche comparative entre les matériaux	15
2.4 Caractéristiques des matériaux	15
2.4.1. Principales propriétés des matériaux	18
2.4.1.1 Propriétés mécaniques	19
2.4.1.1.1 La rigidité	19
2.4.1.1.2 La résistance	19
2.4.1.1.3 La ductilité	20
2.4.1.1.4 Domaine élastique	20
2.4.1.1.5 La limite élastique	22
2.4.1.1.6 Résistance mécanique	23
2.4.1.1.7 La ténacité	25
2.4.1.1.8 La résilience mécanique	25
2.4.1.2 Résistance aux agressions extérieures	26
2.4.1.3 Respecter l'environnement (L'impact environnemental)	26
2.5 Approche hiérarchique des matériaux	26

<b>Chapitre 3</b>	<b>Pages</b>
Principe du choix des matériaux-Notion de l'indice de performance	27
3.1 Introduction	26
3.2 Limites sur les propriétés et les indices de performance	26
3.2.1 Fonction, objectifs et contraintes	26
3.2.1.1 La fonction	26
3.2.1.2 L'objectif	26
3.2.1.3 Les contraintes	26
3.3 Noms fonctionnels	27
3.4 Indice de performance	27
3.5 Etapes pour la sélection de matériaux	28
3.6 Exercice	31
<b>Chapitre 4</b>	<b>32</b>
Diagramme pour le choix des matériaux –Diagramme d'Ashby	
4.1 Introduction	34
4.2 Principe d'utilisation des cartes de sélection	34
<b>Chapitre 5</b>	<b>41</b>
Choix de la géométrie -Facteur de forme-	
5.1 Introduction	41
5.2 Facteur de forme	41
5.3 Indice de performance incluant la géométrie	41
5.4 Méthodologie	43
5.5 Exercice	44
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>49</b>

# **Chapitre 1**

Généralités sur la conception

et le choix des matériaux

## 1.1 Introduction

Dans le monde industriel, la conception de produits consiste à inventer, créer développer et commercialiser, un bien ou un nouveau service.

La conception de produits industriels peut être considérée comme un processus complexe, suite à de nombreuses étapes de travail, de l'idée à la réalisation pratique, à travers les étapes de la création, de la simulation, de l'optimisation, des tests, etc.

## 1.2 Procédure de conception et choix des matériaux

**1.2.1 La conception** La conception est le processus par lequel une nouvelle idée ou un nouveau besoin est traduit en une suite d'informations détaillées à partir desquelles un produit peut être fabriqué.

Les critères de choix pour la conception d'un produit doivent tenir compte de trois facteurs importants;

**1- Conditions d'utilisation:** ce sont les conditions d'utilisation qui déterminent les propriétés que devra posséder le matériau choisi.

Il est rare qu'un seul matériau possède l'ensemble des propriétés requises, il devient parfois nécessaire de faire un compromis entre les exigences pour obtenir l'ensemble des propriétés voulues (ex: résistance et ductilité).

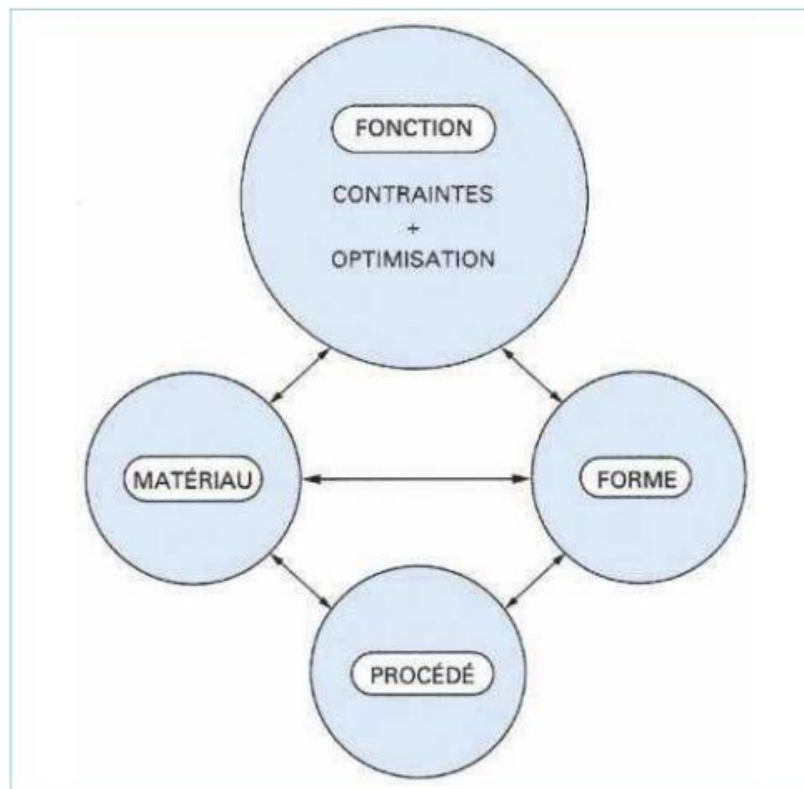
**2- Dégradation des propriétés :** Conséquence de son utilisation dans un milieu particulier, ex: diminution de la résistance mécanique par exposition à la température.

**3- Facteur économique (coût du produit fini),** le cout d'une pièce englobe le coût du matériau et le coût de sa mise en œuvre (procédé de fabrication).

**1.2.2 Le produit :** est un bien ou objet résultant d'une réalisation humaine à partir de matières premières, dans le but de répondre à un besoin matériel, utile ou agréable pour l'homme, un groupe, une société...

## 1.3 Les matériaux en conception

Les composants mécaniques ont une masse, supportent des charges, conduisent la chaleur et l'électricité, ils sont exposés à l'usure et à la corrosion, ils sont constitués d'un ou de plusieurs matériaux, ils possèdent une forme géométrique et sont fabriqués. La Figure 1.1 décrit l'inter action de tous ces éléments:



**Figure 1.1 Interaction fonction/ forme/ matériau/ procédé**

Les étapes de processus de conception nécessitent un choix des matériaux et des procédés de fabrication.

Le nombre de matériaux à notre disposition est très important, entre 40000 et 80000 matériaux, l'apparition constante de nouveaux matériaux ayant de nouvelles propriétés ne cesse d'élargir le champ des possibilités.

- Comment peut-on alors en faire pour choisir le meilleur matériau pour un besoin ??

- Existe-il une procédure systématique qui permet de faire des choix rationnels ?

La réponse à cette question diffère selon le stade de processus de conception.

Au début, la conception est ouverte et le choix des matériaux est large. Au fur et à mesure de l'avancement de la conception, les critères de choix deviennent plus pointus et la liste des matériaux se réduit.

Le choix de matériaux ne peut se faire indépendamment du choix du procédé de mise en œuvre du matériau. Le coût est pris en compte, autant pour le matériau que pour sa mise en œuvre. Une bonne conception ne suffit pas à elle seule pour vendre un produit, la forme, l'esthétique et la sécurité sont aussi des critères importants.

## 1.4 Les différentes étapes du processus de conception

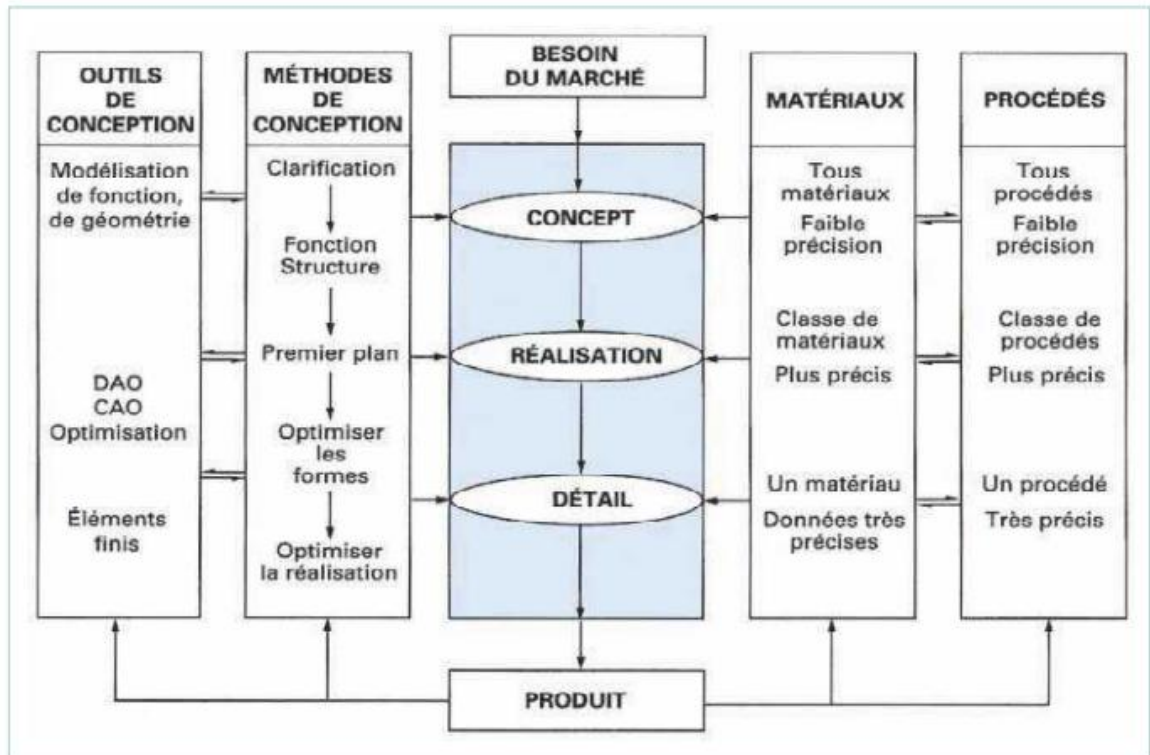


Figure 1.2 Les différentes étapes de conception d'un produit

La conception débute en imaginant des concepts pour remplir une fonction.

- Pré-dimensionnement des composants et choix des matériaux.
- Evaluation des implications en termes de performances et de coûts.

### 1.4.1 Formulation du besoin

La conception est un processus itératif; au début il y a un besoin du marché ou une nouvelle idée, à l'arrivée le cahier de charge complet d'un produit qui répond à ce besoin ou concrétise cette idée. Il est primordial de définir avec précision le besoin en le formulant ainsi:

**< Il faut un dispositif permettant d'accomplir une tâche X >**

Il y a un certain nombre d'étapes entre la formulation du besoin et le cahier de charge, qui sont schématisés à la Figure 1.2, concept, concrétisation et détails du produit.



**1.4.2 Décomposition fonctionnelle:** le produit est un mécanisme technique constitué d'ensembles de sous ensembles et de composants, assemblés de façon à accomplir une tâche requise. L'analyse fonctionnelle permet de clarifier les fonctions que le produit accompli ou le service qu'il devra rendre et auxquelles il est adapté. C'est une approche structurée, formalisée.

### 1.4.3 Les différents types de conception

**1.4.3.1 Conception originale:** elle implique une nouvelle idée ou un nouveau principe de fonctionnement (ex. le stylo à bille, le disque compact). Les nouveaux matériaux peuvent offrir de nouvelles et uniques combinaisons de propriétés qui rendent possible une conception originale, ex. ;

- le silicium à haute pureté a rendu possible le transistor,
- le verre à haute pureté a rendu possible les fibres optiques.

Ainsi, parfois un nouveau matériau mène à un nouveau produit, mais aussi un nouveau produit peut exiger le développement d'un nouveau matériau, comme cela a été le cas avec la technologie nucléaire et le développement de nouveaux alliages (les alliages à base de Zirconium).

**1.4.3.2 Conception d'adaptation:** dans ce cas, nous prenons un produit existant et nous essayons de l'améliorer en affinant son mode fonctionnement. Ce type de conception est très possible par le développement des matériaux ex.; remplacement des matériaux métalliques par des polymères dans les appareils électroménagers, les composites à fibres de carbone ont pris la place du bois dans les articles de sport etc.

**1.4.3.3 Conception de divergence:** elle implique un changement d'échelle, de dimension ou de nouveaux détails sans changement de la fonction ou de la méthode utilisée ex.; grandissement de turbines. Le changement d'échelle ou de conditions d'utilisation peut nécessiter un changement de matériaux. Ainsi les petits bateaux sont fait en composites à fibres de verre, les grands en acier, les avions subsoniques sont fait avec un alliage légers, les avions supersoniques avec d'autres alliages.

### **1.5 Le cahier des charges:**

La définition efficace d'un cahier des charges devant conduire à une sélection de matériau comprend des informations d'ordre technique sur la pièce à réaliser, des informations de caractère économique et des informations d'ordre général sur l'entreprise qui réalise la pièce et sur les clients qui vont l'utiliser.

Ces informations *générales* (taille de l'entreprise, niveau de compétence, concurrents potentiels, existence ou non de prototypes, variabilité admise dans les procédés ou dans les matériaux, dates limites dans la réalisation du projet...) sont autant de contraintes qu'il convient de garder en mémoire lors de la recherche du matériau et du procédé le mieux adapté, non seulement à la pièce à réaliser, mais aussi aux possibilités de l'entreprise.

Les informations de caractère économique mettent en jeu les coûts de matériaux, les coûts de fabrication, les cadences et les séries demandées. Ces informations générales et économiques positionnent le cadre des solutions économiquement réalistes.

Quant aux informations purement techniques, il convient d'identifier avec précision les fonctions de la pièce (modes de chargement, de sollicitation thermique ou physique), les formes recherchées (dimensions et formes imposées, variables libres et variables contraintes, états de surface requis...), les contraintes exigées (rigidité donnée, solidité donnée, résistance à la fatigue, à l'environnement, à l'usure...). Enfin il faut identifier les optimisations recherchées (conception à masse minimale, à coût minimal etc.).

### **1.6 Les outils de conception et données des matériaux**

La mise en œuvre des différentes étapes de la conception se fait en utilisant les outils de conception listés dans la Figure 1.2. Ces outils permettant de modéliser et d'optimiser le choix des matériaux interviennent à chaque étape de la conception.

L'intervention du choix des matériaux ne s'arrête pas une fois le mode de fabrication est établi, mais peut se refaire durant les essais normalisés de chaque composant et après la mise en service définitive (déclaration de pannes après vente, reprise du produit et rectification des défauts). Ce qui constitue une source

d'informations utiles pour l'amélioration du produit, elle renseigne sur l'utilisation du matériau, la conception de la pièce et le fonctionnement du produit conçu ainsi.

### **1.7 Étapes de sélection des matériaux**

- 1 Étudier et comprendre toutes informations relatives au nouveau produit.
- 2 Définir les caractéristiques/exigences de conception du produit.
- 3 Faire le choix des matériaux viables.
- 4 Évaluer les procédés de fabrication possibles et économiques.
- 5 Prioriser et tirer des conclusions.

Dans la plupart des cas, le processus de conception innovante commence par l'identification et la formulation du concept, à partir d'une idée, d'un besoin particulier ou d'un changement dans le contexte d'utilisation. Ensuite, nous cherchons à visualiser le produit, c'est-à-dire à préciser ses caractéristiques à travers l'utilisation de représentations graphiques, de la construction de modèles ou grâce à l'utilisation d'outils issus de la conception assistée par ordinateur. Ceci nous permet alors de préciser la configuration, la taille, la fonctionnalité ou la personnalité du produit. Enfin, la matérialisation à travers un prototype vous confronte aux choix de matériaux et des procédés qui vous permettront de valider ou d'affiner le concept initial.

Un produit est défini par l'interaction de six domaines d'information inter-corrélés, qui doivent être pris en compte tout au long du processus de conception :

- Les produits : c'est l'objet d'étude, l'information le décrivant contient des données factuelles comme les attributs du produit par exemple : le nom, le fabricant, le prix et les performances.
- Les matériaux : la nature de la matière constituant le produit et ses performances.
- Les procédés : la description des étapes de transformation nécessaires de cette matière.
- L'esthétique : les aspects visuels, tactiles, acoustiques ou olfactifs.
- La perception : les attributs sur lesquels le produit va être jugés (culture, goût ou mode).



### **I. 9 La sélection multicritères dans la conception**

Comme nous l'avons déjà annoncé, la procédure de sélection des matériaux est complexe, et d'une complexité qui n'est que partiellement attribuable à la variété des matériaux et des procédés. Un choix de matériaux est, par nature, un choix multicritère : pour concevoir un radiateur, on recherche un matériau à la fois rigide, solide et résistant aux chocs ; on exigera en plus une bonne conductivité thermique, une bonne résistance à la corrosion par l'eau chaude. Certains de ces critères sont contradictoires, il faudra pondérer l'importance relative des diverses contraintes. Dans une procédure de conception, le mot clés est **compromis**.

Si l'on exige qu'il soit à la fois léger et peu coûteux, il faudra aussi établir un ordre de priorité dans les optimisations. Mais on a souvent à faire à des critères non chiffrables (il faut que le matériau soit agréable à la vue, esthétique...), voire à des critères non explicites (dans le futur, il est possible que le matériau soit obligatoirement recyclable, peut-être faudrait-il en tenir compte...).

C'est cette complexité des différents critères, plus encore que la variété des choix possibles, qui rend la procédure de sélection si difficile. À cette difficulté vient s'ajouter le problème de l'estimation des coûts.

Cette estimation peut être en partie rationalisée en distinguant les coûts du matériau et du procédé ainsi que les coûts d'investissement. Mais l'estimation des coûts doit tenir compte des spécificités de l'entreprise.

## **Chapitre 2**

Classification et propriétés des matériaux

## 2.1 Introduction

Un bon produit, est un élément qui répond à une fonction et qui a un bon rapport qualité/prix conçu par les matériaux les mieux adaptés et qui satisfera l'utilisateur. En réalité, ce n'est pas un matériau qu'on recherche mais un profil de propriétés et de caractéristiques.

Une propriété de matériau est une grandeur intensive généralement avec une unité de mesure qui peut être utilisée comme métrique de la valeur pour comparer les avantages d'un matériau plutôt qu'un autre dans un choix de matériaux.

Une propriété du matériau peut être une constante, ou une fonction de plusieurs variables indépendantes, telles que la température et la pression.

## 2.2 Les grandes familles de matériaux

Les différents matériaux existants peuvent être classés selon leur origine; naturel ou synthétique, ou bien selon les propriétés physiques et chimiques qu'ils possèdent. La plupart de ces propriétés dépendent fortement du type d'interaction entre atomes ou molécules qui assurent leur cohésion.

Ces liaisons interatomiques conditionnent en effet, dans une large mesure, la structure de la matière à l'échelle atomique ou moléculaire, structure dont la cristallographie et les défauts ont des conséquences capitales sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du matériau. Il est donc raisonnable de les classer en fonction des différents types de liaisons chimiques.

### 2.2.1 Les différents types de liaisons chimiques

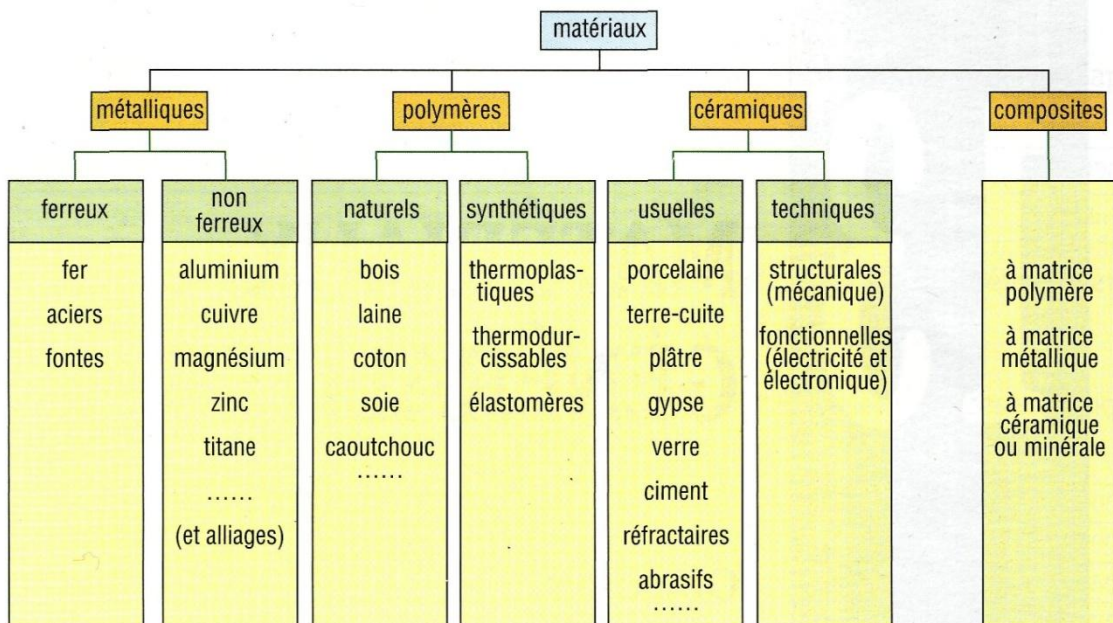
Les liaisons chimiques consistent à partager des électrons périphériques entre des atomes voisins, par création d'orbitales moléculaires communes où se situent les électrons de liaison. On considère quatre types de liaisons, susceptibles de se former selon le remplissage des couches électroniques les plus externes des atomes concernés :

- La liaison covalente où 2 électrons sont mis en commun, ou partagés, par deux atomes dont la couche électronique externe est presque complète. Ces liaisons de très forte énergie sont très rigides et conduisent à des solides de faible densité.
- La liaison ionique où un atome dont la couche externe est presque complète attire un électron externe peu lié d'un atome différent (métal). Très courante dans les molécules de sels métalliques. Elle forme des solides isolants et rigides.
- La liaison métallique assure la cohésion d'ions métalliques très proches les uns des autres (solides de forte densité) par la formation d'une orbitale commune contenant tous les électrons périphériques peu liés aux atomes.

Propriétés de conduction très élevées. Ces solides sont tous cristallisés, le plus souvent dans des systèmes cristallins très simples.

- Les liaisons faibles regroupent plusieurs types d'attraction par effet de dipôle électrique. Elles sont toutes de faible à très faible énergie et conduisent à des solides de faible rigidité. Très importantes dans la cohésion des liquides et des polymères.

**II.2.2 Classification des matériaux**



On classe, habituellement, les matériaux en 4 grandes familles, Figure 2.1.

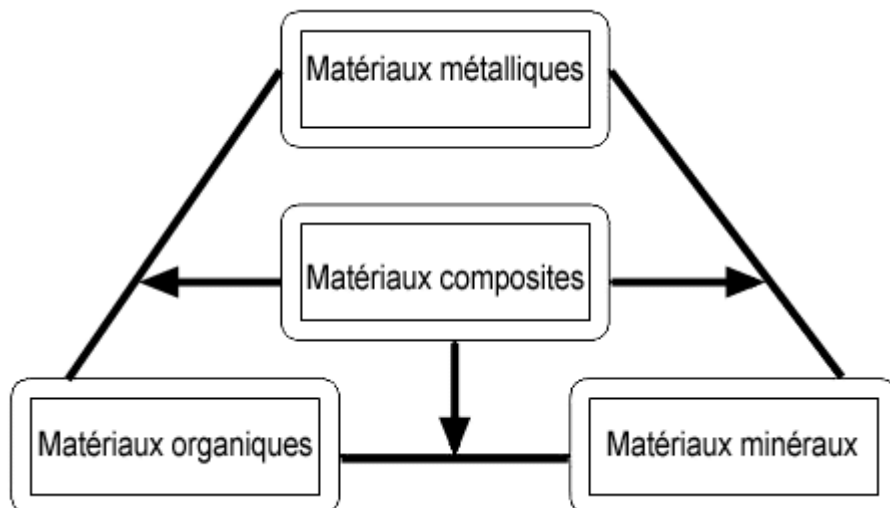


Figure 2.1 Principales familles de matériaux



### 2.2.2.1 Les métaux et leurs alliages

Les métaux constituent les 3/4 des éléments simples. Ce sont des atomes qui possèdent des électrons périphériques peu liés au noyau et facile à capter.

Cela signifie qu'il est aisé d'obtenir des ions, ce qui a deux conséquences :

- Dans la nature, les métaux sont sous forme de sels très stables, le plus souvent des oxydes ou des sulfures. Il faut une grande quantité d'énergie pour réduire ces sels et obtenir l'état de métal.
- Les métaux s'oxydent facilement et sont donc (presque) tous capables de se corroder. C'est malheureusement un cas majeur de « ruine » des matériaux métalliques très fréquent.

A l'état solide, c'est évidemment la liaison métallique qui s'impose. De ce fait, tous les métaux sont cristallisés et très conducteurs de l'électricité et de la chaleur.

L'état cristallin procure aux métaux des propriétés mécaniques particulières et extrêmement importantes. La plupart des métaux manifestent un comportement de déformation plastique appelé ductilité.

Les métaux sont des matériaux de structure les plus performants et leurs applications sont innombrables. On trouve parmi eux la famille géante des aciers qui sont, économiquement les matériaux les plus importants du monde.

Cependant, l'emploi des matériaux métalliques présente aussi de graves inconvénients. Ils sont polluants, parfois toxiques, et leur élaboration également. Pour beaucoup, leur ressource sur terre est limitée, et conduit à une exploitation dévastatrice de l'environnement.

Le tableau suivant rassemble les principales propriétés des métaux et alliages :

<b>Propriétés physiques et mécaniques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● solides atomiques de grande densité</li> <li>● cohésion par liaisons métalliques</li> <li>● températures de fusion moyennes</li> <li>● tous cristallisés dans des systèmes simples</li> <li>● très bons conducteurs électriques et thermiques</li> <li>● rigidité moyenne à élevée</li> <li>● déformables plastiquement et tenaces</li> <li>● opaques à la lumière</li> </ul>
<b>Propriétés chimiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● sensibles à l'oxydation</li> </ul>
<b>Caractéristiques économiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● abondance et prix très variables</li> <li>● nombreux fabricants</li> <li>● recyclage possible</li> <li>● toxicité possible</li> </ul>
<b>Mise en œuvre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● très nombreux procédés bien connus</li> </ul>

### 2.2.2.1 Les céramiques

On peut définir les céramiques comme étant des matériaux inorganiques, non métalliques, nécessitant de hautes températures lors de leur fabrication. Ils sont composés d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures. Les céramiques présentent des liaisons chimiques fortes de nature ionique ou covalente. Elles sont mises en forme à partir d'une poudre de granulométrie adaptée qui est agglomérée. Ce sont les matériaux des records ! Record de dureté, de rigidité, de résistance, de température de fusion. On peut les séparer en deux grandes familles :

- Les céramiques naturelles, comme par exemple le sable, le quartz, le diamant, les roches. Ces matériaux sont connus pour leur dureté, leur caractère réfractaire (ils ne s'oxydent pas à haute température) et leur température de fusion très élevée. Mais ils sont tous fragiles.
- Les céramiques de synthèse reconstituent des oxydes, carbures, et autres nitrures de métaux grâce à des procédés d'élaboration souvent complexes. Certaines de ces céramiques, dites traditionnelles, sont connues depuis longtemps et universellement employées, surtout dans le génie civil. Par exemple le verre, les terres cuites (tuiles et briques), les isolants fibreux (laine de roche), l'alumine ou le corindon. D'autres céramiques de très hautes performances, dites techniques, sont présentes dans les outils d'usinage les

plus performants, du fait de leur dureté exceptionnelle et de leur résistance à l'usure record. Enfin, certaines céramiques sont indispensables pour fabriquer les équipements travaillant à très haute température : fours, turboréacteurs, creusets et pièces pour la fonderie.

Propriétés physiques et mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>● combinaisons métal et élément léger : O, B, C et N.</li> <li>● solides moléculaires de densité moyenne</li> <li>● cohésion par liaisons iono-covalentes</li> <li>● températures de fusion très élevées</li> <li>● amorphes ou cristallisés</li> <li>● grande dureté</li> <li>● rigidité élevée</li> <li>● fragiles</li> <li>● tenue mécanique élevée à chaud</li> </ul>
Propriétés chimiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>● inertes jusqu'aux hautes températures</li> </ul>
Caractéristiques économiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>● céramiques traditionnelles et céramiques techniques</li> <li>● abondance et prix très variables</li> <li>● nombreux fabricants</li> <li>● recyclage difficile</li> </ul>
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>● procédés anciens et simples ou très sophistiqués</li> <li>● assemblage difficile</li> </ul>

### 2.2.2.3 Les polymères

Les polymères (du grec *polus*, plusieurs, et *meros*, partie), d'un point de vue chimique, un polymère est une macromolécule<sup>1</sup> (molécule constituée de la répétition de nombreuses sous-unités). Les atomes sont liés entre eux par des liaisons covalentes très fortes

Il existe : - Des polymères naturels : cellulose, caoutchouc, protéine, laine.

- Des polymères synthétiques : polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET)...

Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent.

<p align="center"><b>Propriétés physiques et mécaniques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● chaînes carbonées contenant des éléments non-métalliques</li> <li>● solides moléculaires de faible densité</li> <li>● cohésion par liaisons faibles et covalentes</li> <li>● températures de fusion faibles</li> <li>● isolants thermiques et électriques</li> <li>● amorphes ou partiellement cristallisés</li> <li>● dilatation thermique importante</li> <li>● faible résistance mécanique</li> <li>● rigidité faible à très faible</li> <li>● tenue mécanique très sensible à la température</li> </ul>
<p align="center"><b>Propriétés chimiques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● réactivité chimique très variable, souvent très faible dans les conditions ambiantes</li> </ul>
<p align="center"><b>Caractéristiques économiques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● abondance liée à la pétrochimie</li> <li>● prix très variables</li> <li>● nombreux fabricants</li> <li>● recyclage peu efficace ou impossible</li> </ul>
<p align="center"><b>Mise en œuvre</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● différente suivant les thermoplastiques ou les thermodurcissables</li> <li>● procédés faciles très nombreux</li> <li>● faible coût</li> </ul>

#### 2.2.2.4 Les matériaux composites

Les matériaux composites ne forment pas une classe de matériaux à part. Ils sont obtenus par mélange de matériaux provenant chacun de l'une des trois classes précédentes. Leurs propriétés se trouvent modifiées de façon continue par la proportion de chaque composant.

### 2.3 Approche comparative entre les matériaux

Dans la conception de composants, avant toute analyse fonctionnelle détaillée et avant tout calcul mécanique, on peut identifier quelques questions simples qui peuvent déjà guider ce choix; veut on une pièce rigide ?

Veut-on une pièce solide ?

Doit-elle être légère ?

Doit-elle être bon marché ?

Est-elle susceptible de subir des chocs ou des agressions chimiques ?

Doit-elle conduire la chaleur et l'électricité, ou doit-elle être isolante?

Chacune de ces questions très simples traduit par une requête sur les propriétés. a ce niveau de précision nous ne pouvons pas encore être quantitatives, mais nous pouvons déjà classer qualitativement les familles des matériaux entre elles, on peut aussi s'interroger sur les facilités de mise en œuvre requises par la pièce à concevoir, Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Comparaison qualitatives entre les différentes familles de matériaux

	<b>Métaux</b>	<b>Céramiques</b>	<b>Polymères</b>	<b>Composites</b>
<b>Densité</b>	Moyenne élevée	Moyenne	Faible/très faible	Moyenne / faible
<b>Prix</b>	Faible/élevé	Elevé (techniques)	Faible/élevé	Elevé
		Faible (grande diffusion)		
<b>Module d'Elasticité</b>	Elevé	Très élevé	Moyen/faible	Elevé
<b>Résistance Mécanique</b>	Elevée	Très élevée (compression)	Moyenne faible	Elevée
<b>Tolérance aux défauts et aux chocs</b>	Très tenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Très tenace
<b>Température d'utilisation</b>	Moyenne hautes	Hautes / très hautes	Moyennes faibles	Moyennes
<b>Tenue aux agressions chimiques</b>	Moyenne mauvaise	Bonne / très bonne	Moyenne	Moyenne
<b>Conduction de la chaleur</b>	Bonne/très bonne	Moyenne / faible	Faible/très faible	Faible
<b>Conduction de l'électricité</b>	Bonne/très bonne	Faible / très faible		
<b>Facilité de mise en forme</b>	Facile	Difficile (technique)	Très facile	Moyenne dépendant de la forme
		Facile (grande diffusion)		
<b>Facilité d'assemblage</b>	Facile	Moyenne	Facile	difficile

Ce tableau donne de façon très simplifiée des atouts et des faiblesses relatives des grandes classes de matériaux comme toute simplification majeure, il est aisé de trouver des exceptions à ces règles simples et il existe par exemple des polymères à des températures aux quelles des matériaux comme les alliages d'aluminium les ont déjà perdues. Par contre, si on doit faire travailler une pièce à très hautes températures (disons 1000°C) il est inutile de rechercher des polymères sans quelques métaux réfractaires et des céramiques pouvant faire l'affaire.

#### **2.4 Caractéristiques des matériaux**

Pour aller au delà de cette comparaison qualitative, il nous faut définir les propriétés qui caractérisent l'aptitude d'un matériau à réaliser une pièce qui réponde aux requêtes d'un cahier de charge. Le tableau 2.2 présente une liste de propriétés qui sont renseignés de manière quantitative dans les bases de données, il faut noter que ces bases de données sont communes aux différentes classes de matériaux ont été définis ce qui explique par ex. que la température de déflexion sous charge (propre aux polymères) n'est pas consignée, elle apparaîtra par contre dans une banque de données spécialisée.

Tableau 2.2 Propriétés renseignés de façon quantitative pour tous les matériaux au niveau des bases de données

<b>Générales</b>	Volume atomique Densité Contenu énergétique Fraction recyclable Prix	
<b>Mécaniques</b>	Module de Young Module de cisaillement Module de compressibilité Module de Poisson Limite d'élasticité Dureté	Résistance en traction Résistance en compression Ductilité Ténacité Limite d'endurance Coeff. d'amortissement
<b>Thermiques</b>	Point de fusion Transition vitreuse T° maximale d'utilisation T° minimale d'utilisation Chaleur latente de fusion	Chaleur spécifique Conductivité thermique Diffusivité thermique Coeff. de dilatation
<b>Electriques</b>	Résistivité Constante diélectrique Potentiel de claquage	

Il se peut que les informations disponibles ne soient pas données par des chiffres, mais par des estimations qualitatives. On dit alors par exemple qu'un matériau résiste très bien, bien, moyennement ou médiocrement à la corrosion en milieu aqueux chloré. Ces informations qualitatives sont souvent aussi importantes dans la sélection que les informations chiffrées. On pourrait bien sûr, en principe, les remplacer par des informations quantitatives comme les taux de corrosion.

## 2.5. Principales propriétés des matériaux

On distingue plusieurs types de propriétés des matériaux selon leurs utilisations. Par exemple, dans le cas du développement des ordinateurs, ce sont essentiellement les propriétés physiques qui sont en cause. Par contre, dans le cas du développement des moteurs d'avions, ce sont les propriétés mécaniques et chimiques qui sont déterminantes. Les principales propriétés des matériaux se regroupent donc en :

### 2.5.1 Propriétés mécaniques

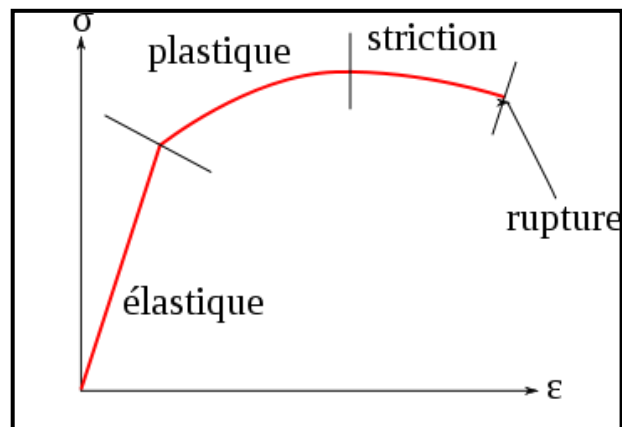
Ce sont des propriétés relatives aux aspects de résistance aux efforts, des déformations résultantes aux efforts, des contacts entre solides (chocs, glissement).

**2.5.1.1 La rigidité** c'est l'aptitude d'un matériau à se déformer de façon élastique, la rigidité est défini par le module de Young.

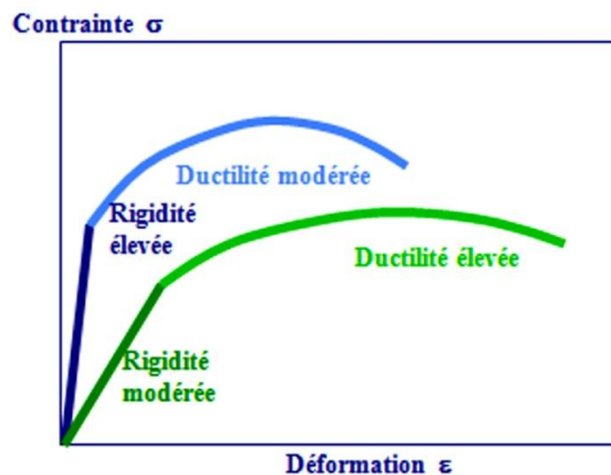


**2.5.1.2 La résistance** caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de se rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons mais également de la forme des pièces ou de ses défauts.

**2.5.1.3 La ductilité** correspond à la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. Plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile. A l'opposé, lorsque la déformation permanente est très réduite ou nulle, on parle d'un matériau fragile. Un matériau fragile peut présenter une résistance très élevée (**Figure 6**).



**Figure 2.2** Courbe de traction idéale d'un matériau ductile



**Figure 2.3** Courbe contrainte-déformation. Deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes

Dans le cas d'un matériau ductile, on a une courbe de traction semblable à la Figure 2.2. On identifie quatre étapes :

1. déformation élastique (réversible) : la loi est linéaire ;
2. domaine plastique (irréversible) ;
3. striction (endommagement) ;
4. rupture (fin de la courbe).

#### 2.5.1.4 Domaine élastique

Dans le domaine élastique, on a donc une loi linéaire, la loi de HOOKE.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

La contrainte normale  $\sigma$  est proportionnelle à l'allongement relatif  $\varepsilon$  qui un facteur constant, c'est la rapport entre les longueurs initiale  $l_0$  et finale  $l$ .

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$$

- $E$  : module de YOUNG ou module d'élasticité longitudinale (GPa).

$E$  élevé donc le matériau est rigide.

$E$  faible donc le matériau est souple.

**Tableau 2.3** Module de Young de quelques matériaux usuels

<b>Module d'Young</b>	
<b>Matériaux</b>	<b>Module (GPa)</b>
Acier de construction	210
Acier à ressorts	220
Acier inoxydable 18-10	203
Bronze (cuivre + 9 à 12 % d'étain)	124
Cuivre laminé U4 (Recuit)	90
<i>Duralumin</i> AU4G	75
Fontes	83 à 170
Béton	20 à 50
Bois (sens de fibre)	10 à 20
Caoutchouc	0,001 à 0,1
Fibre de carbone haut module	640
Fibre de carbone haute résistance	240
Kevlar	34,5
Nylon	2 à 5
Plexiglas	2,38
Polycarbonate	2,3
Polyéthylène	0,2 à 0,7
Polystyrène	3 à 3,4

### 2.5.1.5 La limite élastique

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau pour se déformer d'une façon élastique, elle est notée  $R_e$ .

$R_e$  élevée dans le matériau est dur

$R_e$  faible dans le matériau est mou.

Tableau 2.4 limite élastique de quelques matériaux usuels

Matière	Nuance	R <sub>e</sub> (MPa)
Résineux courants	C18 à C30	18 à 30
Bois lamellé-collé	GL24 à GL32	24 à 32
Alliage d'aluminium	Série 1000 à série 7000	90 à 470
Acier de construction usuel non allié	S235 à S355	235 à 355
Acier au carbone trempé	XC 30 (C30)	350 à 1000
Acier faiblement allié trempé	30 Cr Ni Mo 16 (30 CND 8)	700 à 1 450
Alliage de titane	TA 6V	1 200
Fibre de verre	"E", courant	2 500
Fibre de verre	"R", haute performance	3 200
Fibre de carbone	"HM", haut module de Young	2 500
Fibre de carbone	"HR", haute résistance	3 200
Composites Fibre/matrice	Verre ou carbone	1 000 à 1 800

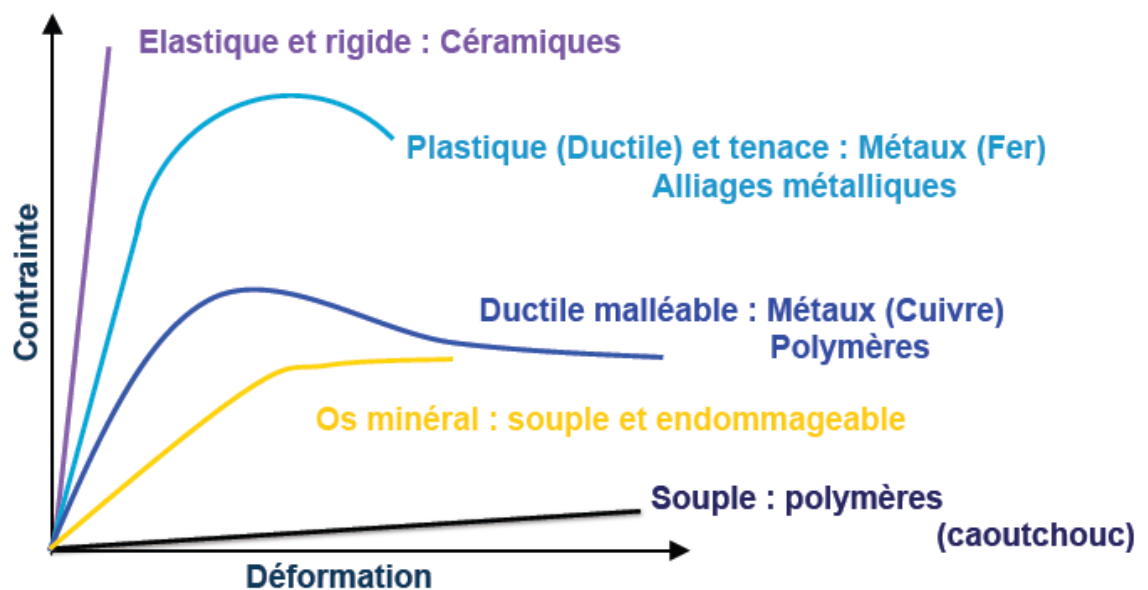
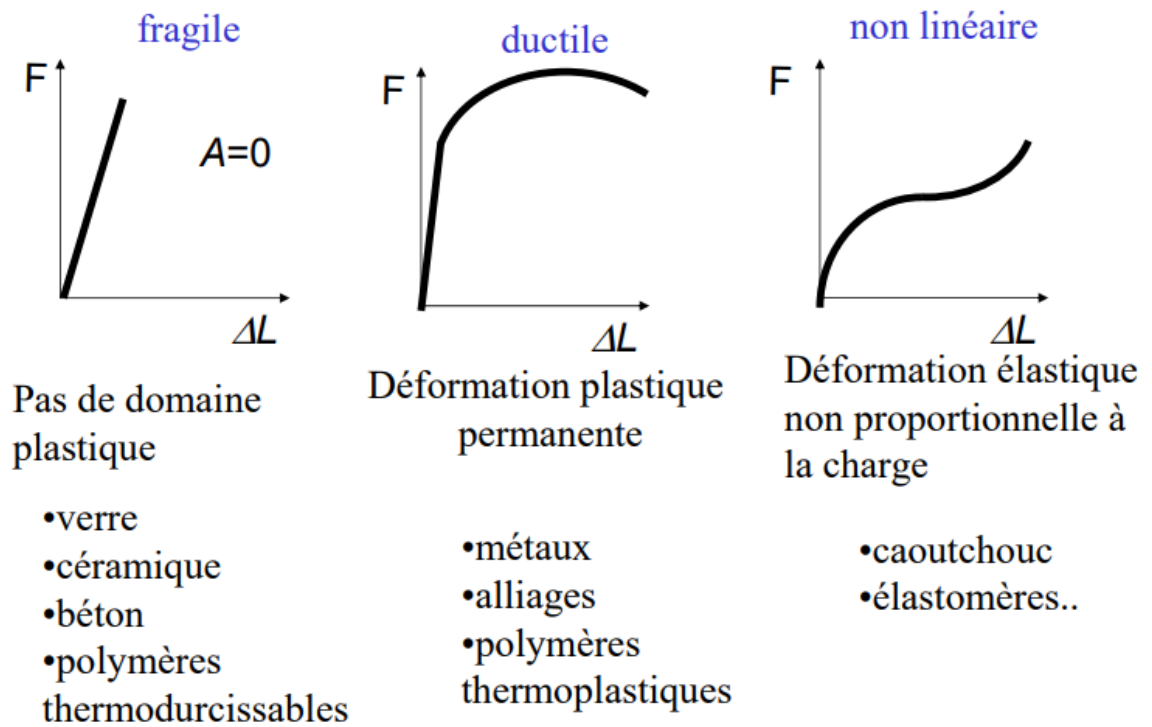


Figure 2.4 Courbes contraintes déformations de quelques matériaux différents

Trois comportements possibles peuvent être enregistrés pour les matériaux, comme le montre la figure 2.5.



**Figure 2.5** Comportement mécanique des matériaux

### 2.5.1.6 Résistance mécanique

C'est la charge mécanique maximale que peut supporter un matériau avant la rupture.

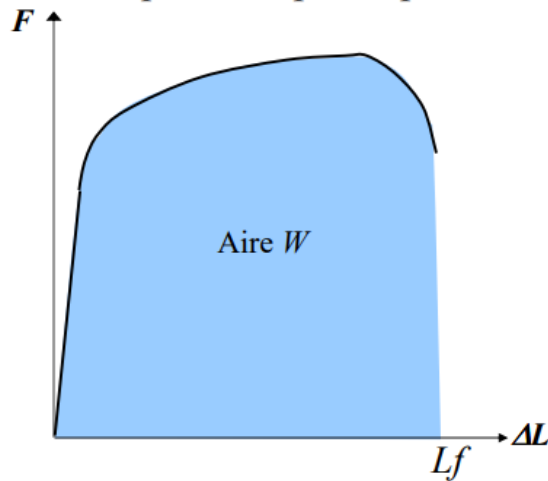
**Tableau 2.5** Résistance mécanique de quelques matériaux usuels

Matière	Nuance	R <sub>e</sub> (MPa)
Bois lamellé-collé	GL24 à GL32	24 à 32
Alliage d'aluminium	AU 4G	450
Acier de construction usuel non allié	S235 à S355	235 à 355
Acier au carbone trempé	XC 30 (C30)	350 à 400
Acier faiblement allié trempé	30 Cr Ni Mo 16 (30 CND 8)	700 à 1 450
Alliage de Titane	TA 6V	1 200
Verre		2 500 à 3200
Composites Fibre/matrice	Verre ou Carbone	1 000 à 1 80

### 2.5.1.7 La ténacité

C'est la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation de fissures. C'est donc une propriété du matériau qui s'exprime en  $MPa \sqrt{m}$ . Elle varie fortement pour un matériau de composition chimique donnée avec les traitements thermiques.

L'aire sous la courbe de traction  $F(\Delta L)$  représente l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette



$$W = \int_0^{L_f} F(\Delta L).dL$$

### 2.5.1.8 La résilience mécanique

C'est l'aptitude à résister aux chocs. Elle est caractérisée par un essai de choc sur une éprouvette et s'exprime en  $\text{Joule}/\text{cm}^2$ .

La résistance aux chocs diminue fortement aux basses températures et est importante à considérer lorsque le service doit être assuré à basse température.

### 2.5.2 Résistance aux agressions extérieures

Il s'agit de dégradation chimiques, c'est-à-dire, réactions avec l'environnement et non pas sollicitations mécaniques. La corrosion concerne essentiellement les métaux mais tous les matériaux sont susceptibles de se dégrader sous l'effet de l'environnement.

On peut quantifier la corrosion par le courant de corrosion ou par le taux de corrosion.

### 2.5.3 Respecter l'environnement (L'impact environnemental)

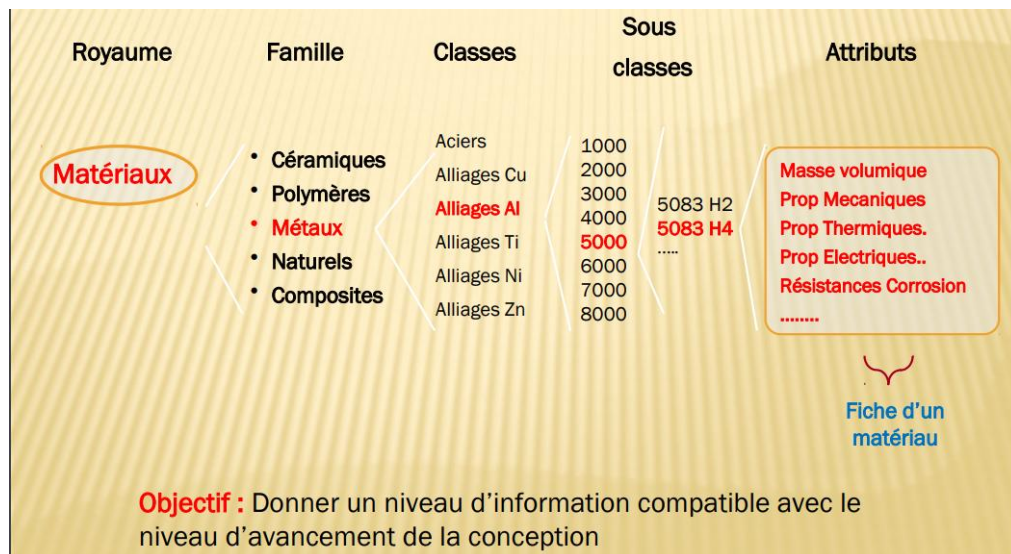
Il faut penser impact environnemental, en général:

- Toxicité des matériaux
- Energie et ressources dépensées pour la fabrication
- Epuisement des ressources disponibles (minerais) ou utilisation de ressources renouvelables (recyclage, énergie)
- Pollution générée par la fabrication
- Transport (importation)

- Possibilité de réparer plutôt que de jeter "recharge" en matière (remettre de la matière là ou il en faut).
- Souder ou coller pour éliminer les fissures
- Possibilité de recycler.

## 2.6 Approche hiérarchique des matériaux

Plus on descend dans les hiérarchies des matériaux, plus les informations sont précises. Toutes structures hiérarchiques reflète un aspect de hiérarchie de sélection, ex : le royaume des matériaux a plusieurs familles, l'une d'entre elle est la famille des métaux, une classe est formée des alliages d'aluminium, dans cette classe on a plusieurs sous classes l'une d'entre elle est la famille des alliages de corroyage référencée sous le vocable 5XXX, et dans cette sous classes un matériau spécifique est l'alliage 5083 qui est utilisé avec le traitement H<sub>2</sub> figure 2.6.



**Figure 2.6** Approche hiérarchique des matériaux

La structure hiérarchique permet un compromis entre une information complète, précise mais qui, pour des raisons de disponibilité des données, ne pourra être fournie pour tous les matériaux et une information homogène cohérente des matériaux à leur niveau de classification mais qui sont nécessairement non précise. Elle a l'avantage du point de vue de l'utilisation de matériaux de lui permettre une approche comparative indispensable dans la procédure de sélection.



## **Chapitre 3**

Principe du choix des matériaux

Notion de l'indice de performance

### 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode rationnelle d'évaluation de la performance d'un matériau pour une fonction bien précise, contrairement à la phase d'élimination qui, en général, est effectuée à partir d'une propriété que le matériau ne possède pas (ex : température maximale d'utilisation > 200°C).

La classification peut se faire selon une propriété ou selon une combinaison de propriétés (sélection multicritères). Prenons un exemple, les meilleurs matériaux pour une barre légère qui travaille en traction à rigidité imposée sont ceux qui présentent une rigidité spécifique  $E/\rho$  la plus élevée possible, où E est le module de Young du matériau et  $\rho$  sa densité. Nous appellerons de telles combinaison de propriétés des indices de performance, qui lorsqu'ils sont élevés traduisent une bonne performance (efficacité) du matériau.

Il existe une méthode pour obtenir de tels indices à partir du cahier des charge d'une pièce en menant une analyse de la fonction, des objectifs et des contraintes (contraintes) de la pièce à concevoir.

### 3.2 Limites sur les propriétés et les indices de performance

Comment traduire le cahier des charges d'une pièce en termes de propriétés et d'indices de performance relatifs au matériau, à partir duquel sera élaborée la pièce.

Pour répondre à cette question, il faut identifier la fonction de la pièce, les contraintes qu'elle doit subir et les objectifs de conception.

#### 3.2.1 Fonction, objectifs et contraintes

**3.2.1.1 La fonction** : toute pièce a une ou plusieurs fonctions, supporter une charge, une pression, transmettre la chaleur, conduire l'électricité etc. Le type de chargement mécanique d'une pièce est souvent décomposé en des efforts de traction, de compression, de flexion ou de torsion..., la plupart du temps, un de ces efforts est dominant, ceci répond à la question ;

« **Quelle est la fonction de la pièce ?** »

**3.2.1.2 L'objectif** : dans la conception, le concepteur a un objectif ; faire la pièce la plus légère possible (ceci est particulièrement important dans le domaine de transport) ou la plus sûre (dans le domaine nucléaire) ou ça peut être le coût de la pièce (objectif important).

Enfin, une pièce peut satisfaire plusieurs objectifs à la fois.

**3.2.1.3 Les contraintes :** La pièce doit respecter certaines conditions imposées par le cahier des charges, exemple ; certaines dimensions de la pièce peuvent être fixées, ou bien la pièce peut nécessiter de travailler dans une certaine plage de température ou encore selon certaines conditions environnementales.

Les contraintes peuvent porter sur la géométrie de la pièce (variables fixées) ou sur des aspects mécaniques ou thermiques. Il sera parfois utile de distinguer les conditions incohérentes (conditions lourdes, non négociables) des conditions négociables (contraintes légères).

Finalement, la fonction, les objectifs et les contraintes sont les conditions aux limites qui permettront de sélectionner un matériau (Tableau 3.1).

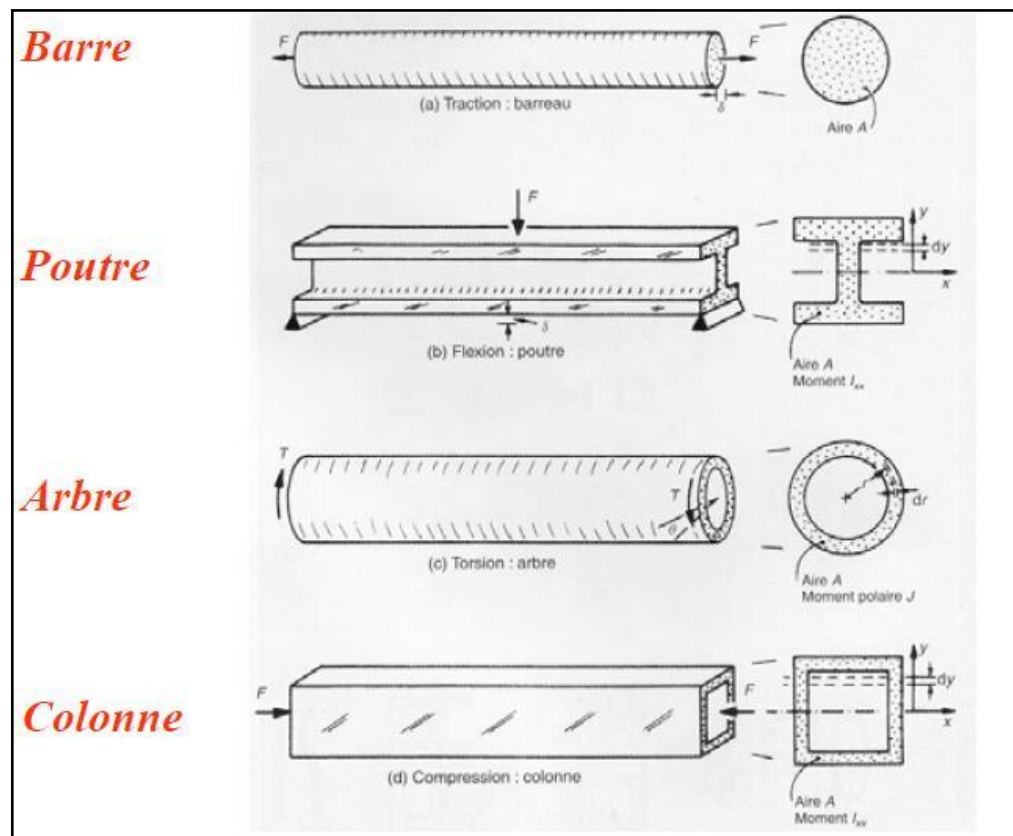
**Tableau 3.1** Exigences de conception

Fonction	Que fait le composant, à quoi sert la l'objet ?
Objectif	Que faut-il maximiser ou minimiser ?
Contraintes	Variables fixées ? Quelles sont les conditions non négociables ? Quelles sont les conditions souhaitables et négociables ? (variables libres)

### 3.3 Noms fonctionnels

Les noms fonctionnels donnés aux composants décrivant la façon dont ce composant est chargé, Figure 3.1

- Une barre supporte une charge en traction.
- Une poutre supporte un moment de flexion.
- Un arbre supporte un couple de torsion.
- Une colonne supporte des charges en compression.



**Figure 3.1** Noms fonctionnels des composants

### 3.4 Indice de performance

Un indice de performance est une combinaison de propriétés qui caractérise la performance d'un matériau pour une application donnée.

La conception d'un composant comporte 3 spécifications:

- 1- Les exigences fonctionnelles (F).
- 2- La géométrie (G).
- 3- Les propriétés du matériau (M).

La performance du matériau, pour une application donnée, peut être décrite par une équation du type:

$$P = f(F, G, M)$$

$$P = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{Spécification} \\ \text{Fonctionnelles} \\ F \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} \text{Paramètres} \\ \text{Géométriques} \\ G \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} \text{Propriétés du} \\ \text{Matériau} \\ M \end{array} \right) \right]$$

**P** désigne la performance du matériau.

La conception optimale est celle qui sélectionnera le matériau et la géométrie qui maximiseront P en respectant les exigences fonctionnelles.

En général, la performance P peut s'écrire de la manière suivante;

$$P = f(F)f(G)f(M)$$

Les variables sont séparés et donc le choix du matériau devient indépendant de la géométrie et des exigences fonctionnelles.

Tout problème simple de la conception pourra s'écrire selon une équation qui permette de séparer les fonctionnalités, la géométrie et les propriétés du matériau.

Chaque triplet (fonction, objectif, contraintes) va donner un indice de performance différent, changer une des contraintes même en maintenant les autres critères et en gardant les mêmes fonctions et les mêmes objectifs conduira à un autre indice de performance

**Exemple1 Indice de performance pour une barre légère et résistante**

Conception d'une barre cylindrique de longueur donnée L, capable de résister à une force de traction F sans casser et qui doit être la plus légère possible.

L'objectif ici, est d'avoir un poids minimal. Maximiser la performance revient à « minimiser le poids de cette barre qui doit supporter F sans rompre ».

La variable libre du problème est la section. La fonction, l'objectif et les contraintes sont explicites dans le Tableau suivant :

Fonction	Que fait le composant, à quoi sert l'objet ? <b>barre cylindrique</b>
Objectif	Que faut-il maximiser ou minimiser ? <b>Poids minimum</b>
Contraintes	Quelles sont les conditions non négociables ? <b>Longueur spécifique</b> « L » ; contrainte géométrique. Supporter une <b>charge sans endommagement</b> ; contrainte mécanique. Variable libre ; <b>Section</b> (condition négociable).

Recherche de la fonction d'objectif; équation représentant la quantité à minimiser (ou maximiser).

L'objectif, dans cet exemple, est bien d'avoir la masse la plus faible possible, équation qui nous permette de traduire notre objectif mathématiquement est celle de la masse :

$$m = \rho V \Rightarrow m = \rho S L$$

$\rho$  Masse volumique du matériau

L La longueur de la barre

S Section cylindrique de la barre

- La longueur est fixée, nous mettrons un indice 0 pour montrer que l est connue  $L_0$ .
- La barre doit supporter une charge F fixée sans rompre, nous lui donnerons un indice 0,  $F_0$ .
- Pour que la barre ne rompe pas, il faut que la contrainte de rupture du matériau soit plus grande que  $F_0$  divisée par la section S de la barre

$$\sigma_f \geq \frac{F_0}{S}$$

Elimination de la variable libre S ;  $S \geq \frac{F_0}{\sigma_f}$

Minimiser m revient à minimiser S.

Donc :  $S = \frac{F_0}{\sigma_f}$ , on remplace la valeur de S dans l'équation de l'objectif

$$m = \rho \cdot \left( \frac{F_0}{\sigma_f} \right) \cdot L_0$$

Organisation en trois fonctions indépendantes

$$m = (F_0) \cdot (L_0) \cdot \left( \frac{\rho}{\sigma_f} \right)$$

Remarquer la forme de ce résultat, le premier paramètre contient la charge spécifiée  $F_0$ , le deuxième la géométrie spécifiée ( $L_0$ ) et le troisième les propriétés du matériau.

La barre la plus légère qui pourra supporter la charge  $F_0$  en toute sécurité sera faite dans le matériau qui possède la valeur la plus faible du rapport  $\frac{\rho}{\sigma_f}$

Pour maximiser les performances il faut maximiser l'indice de performance

$I = \frac{\sigma_f}{\rho}$  ce rapport appelé « Resistance Spécifique ».

**Exemple 2** : Déterminer l'indice de performance d'une barre légère et rigide

### 3.5 Etapes pour la sélection de matériaux

Pour le choix d'un matériau on procède selon une suite d'étapes reportées dans le Tableau 3.2.

**Tableau 3.2** Etapes pour le choix des matériaux

Etape	Opération
1	Définir la spécification de conception a) Fonction : que fait le composant ? b) Objectif : qu'est ce qui doit être maximisé ou minimiser ? c) Contraintes : les exigences essentielles qui doivent être satisfaites ; rigidité, résistance, tenue à la corrosion, paramètres de mise en forme, etc.
2	Ecrire une équation exprimant l'objectif (la fonction de l'objectif).
3	Identifier les variables libres (non spécifiées).
4	Ecrire des équations exprimant les contraintes (pas de déformation, pas de rupture, pas de flambage, etc.)
5	Eliminer les variables libres entre les équations de contraintes et la fonction d'objectif.
6	Regrouper les variables en trois groupes ; les spécifications fonctionnelles F, la géométrie G et les propriétés des matériaux M, $Performance \geq Performance \geq f_1(F)f_2(G)f_3(M)$
7	Isoler la partie correspondante aux propriétés des matériaux.
8	Choisir le matériau suivant le diagramme d'Ashby

### 3.6 Exercice

Une barre est sollicitée en traction simple jusqu'à une charge  $F_c = 4450\text{N}$ ,

- La barre est de section circulaire pleine et de longueur  $L$ ,
- Le diamètre de la barre  $\varnothing < 6.3\text{mm}$ ,
- Déterminer la contrainte maximale que peut supporter cette barre,
- 2- Déterminer le diamètre de la barre permettant de rester dans le domaine élastique.
- 3- En prenant la section comme variable libre, faites un choix de matériau pour une barre rigide et la moins légère possible,
- 4- Quelle solution choisir en intégrant le coût du produit pour une barre légère?

	E [GPa]	Re [MPa]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]
Alliage d'aluminium corroyé, trempable	70	95	2500
Acier faiblement allié	205	400	7800
Alliage de titane	110	750	4400
Verre-époxy	22	110	1800



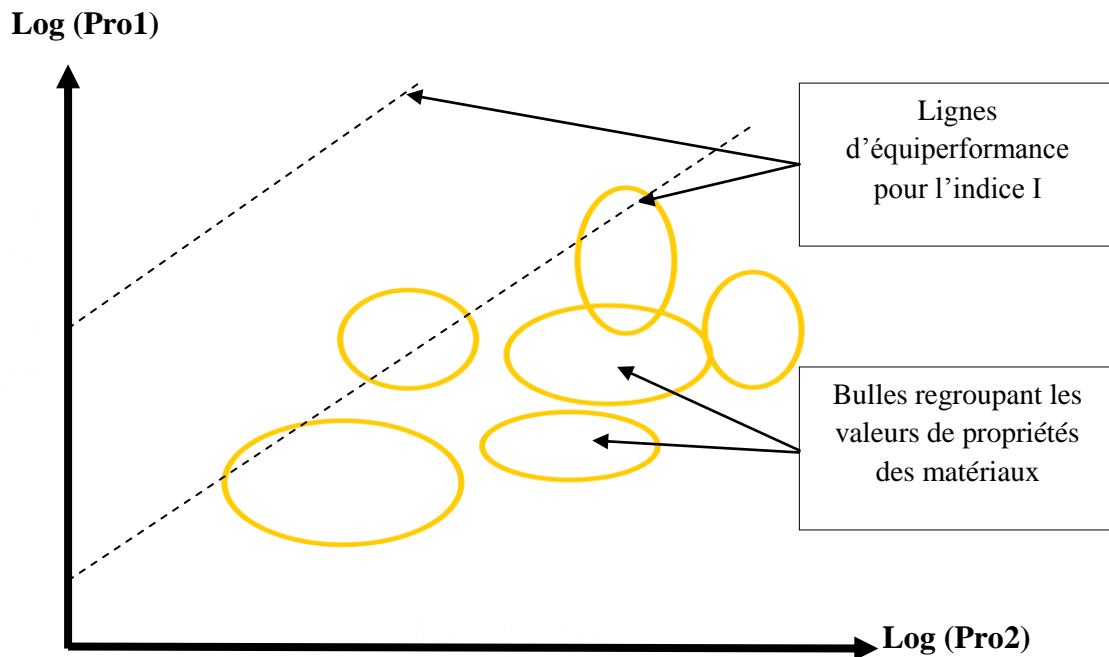
## **Chapitre 4**

Diagramme pour le choix des matériaux

Diagramme d'Ashby

### 4.1 Introduction

Une façon commode de présenter une vision des propriétés quantitatives des matériaux est le tracé des « cartes de sélection », elles sont présentées en diagrammes logarithmique avec une propriété quantitative sur chaque axe. Ces cartes ont l’avantage de présenter, au premier coup d’œil, la valeur et dispersion des propriétés et pour un matériau d’une famille donnée représentée par une bulle, à l’intérieur de chaque bulle des bulles plus petites représentent des matériaux plus précis, Figure (4.1).



**Figure 4.1** Schéma d’une carte de sélection

- Graphe dans un plan (prop 1, prop 2)
- Matériaux représentés par des ellipses

Des outils informatiques permettent de tracer automatiquement toute les cartes de sélection à partir des bases de données plus spécialisée et donc plus précises, comme celles consacré uniquement aux aciers ou aux polymères.

### 4.2 Principe d’utilisation des cartes de sélection

L’étape suivante consiste à trouver, parmi le groupe de matériaux qui sont dans la limite de propriété, ceux qui maximisent les performances du composant.

Nous prendrons comme exemple celui de la conception de composant léger et rigide (barre soumise à une charge  $F$ , qui doit être rigide et légère).

Nous avons montré que l’indice de performance (pour minimiser la masse) était  $E/\rho$ .

Comme les cartes en log log du fait de la grande variété des propriétés regardons ce que cet indice  $I = E/\rho$  dans le système d’échelle logarithmique, nous avons alors ;

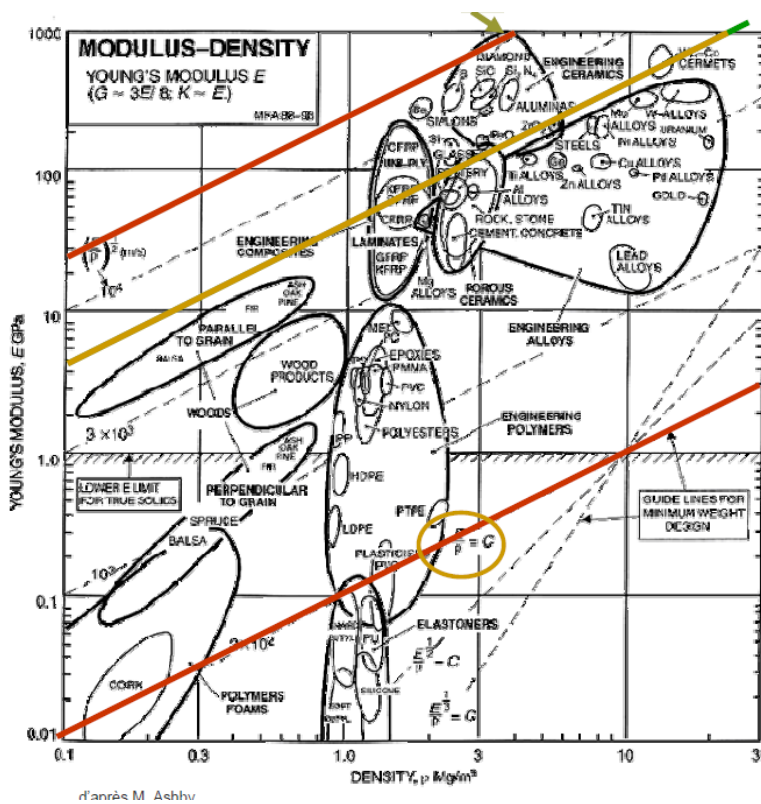
$$\log E = \log \rho + \log I$$

$$\log I = \log E - \log \rho$$

Equation de la forme  $y = ax + b$

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

Maximiser l’indice de performance revient à faire monter la droite de pente 1 sur l’abaque. Donc le matériau à choisir se trouve dans le domaine des céramiques techniques (le matériau à choisir est le diamant).



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

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

Equation de la forme :  $y = ax + b$

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

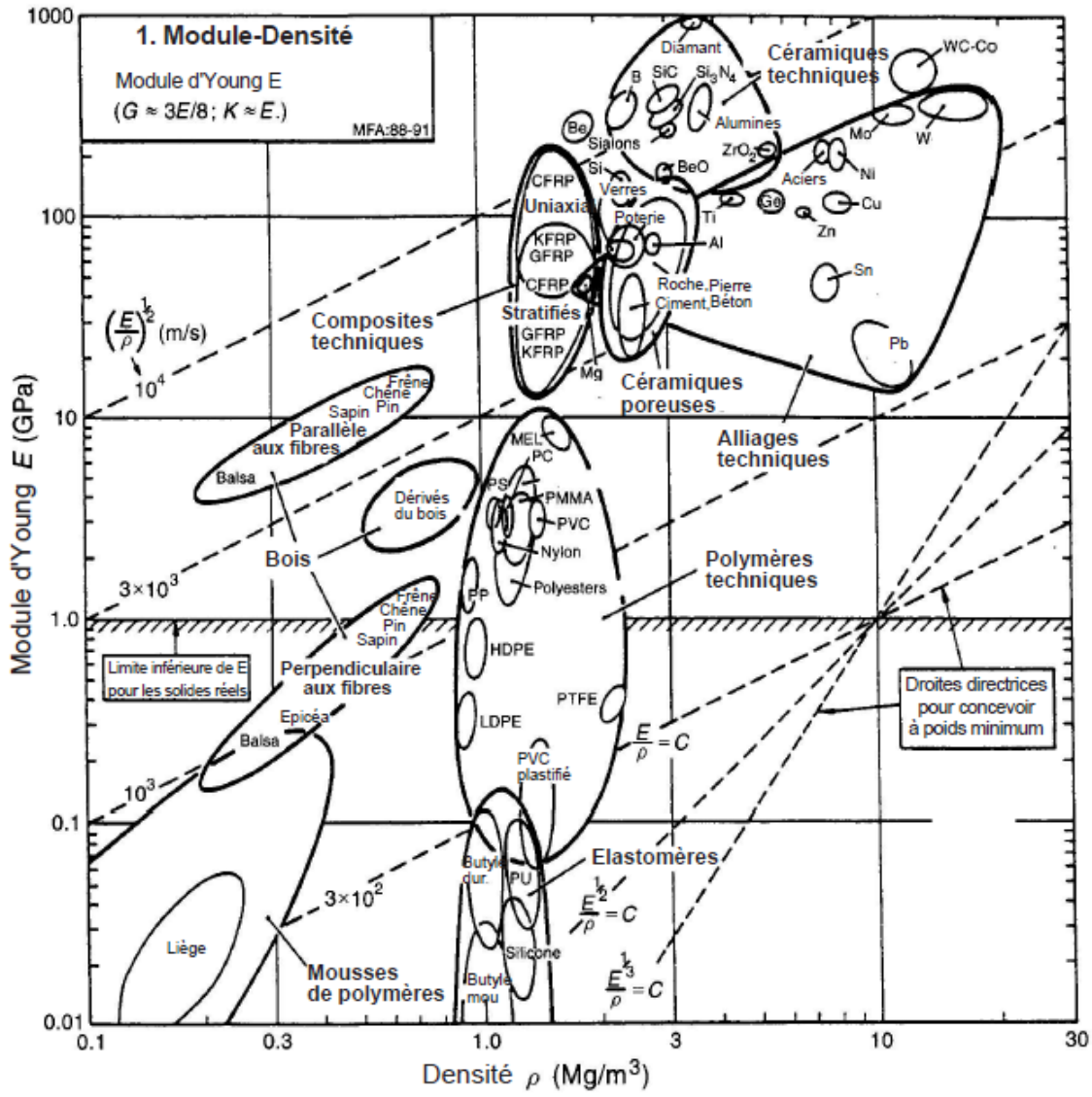
Maximiser l’indice de performance  
 ⇒ monter la plus possible la droite  
 de pente 1 sur l’abaque

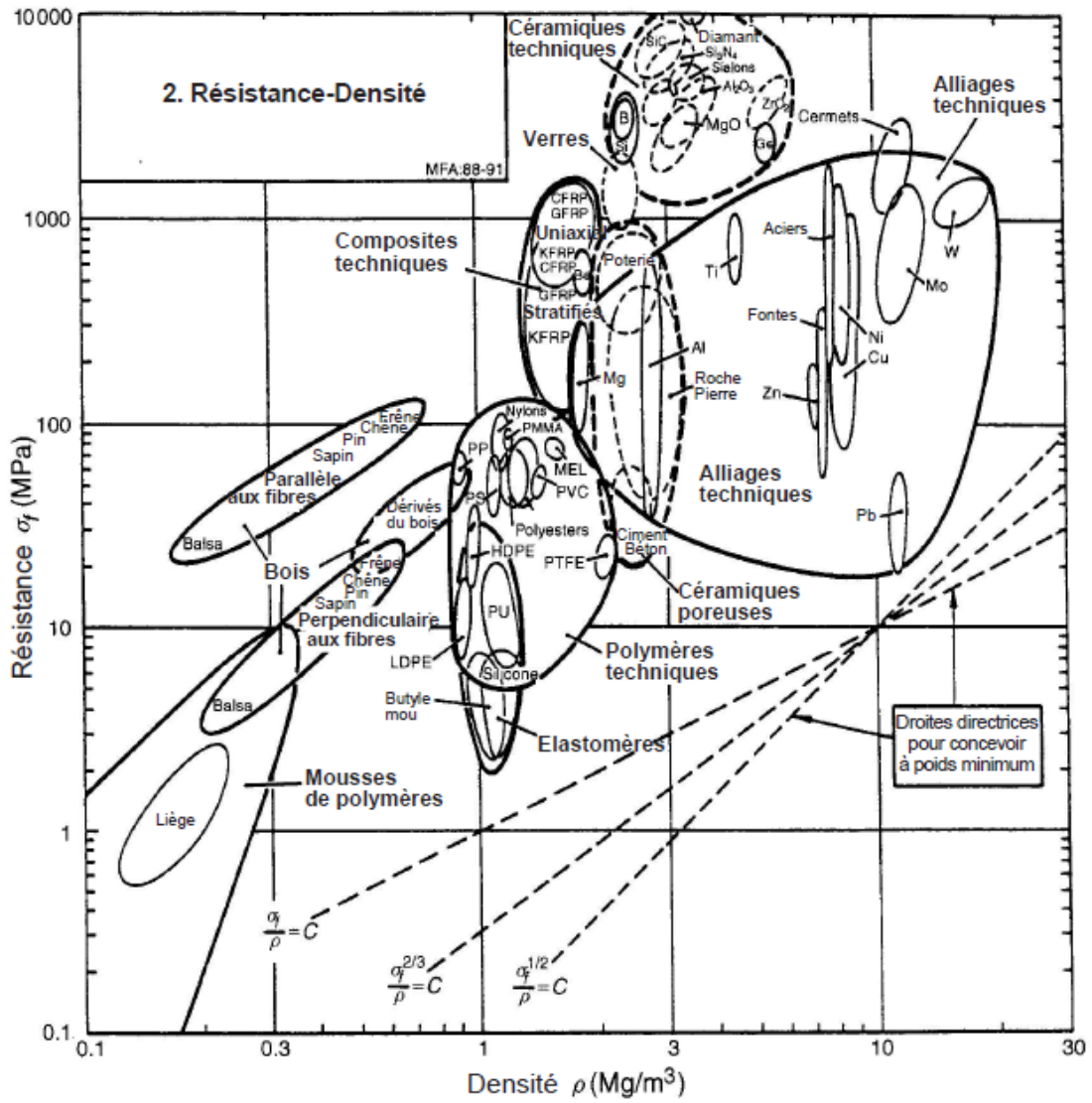
Les matériaux qui se trouvent sur la même droite ont le même indice de performance.

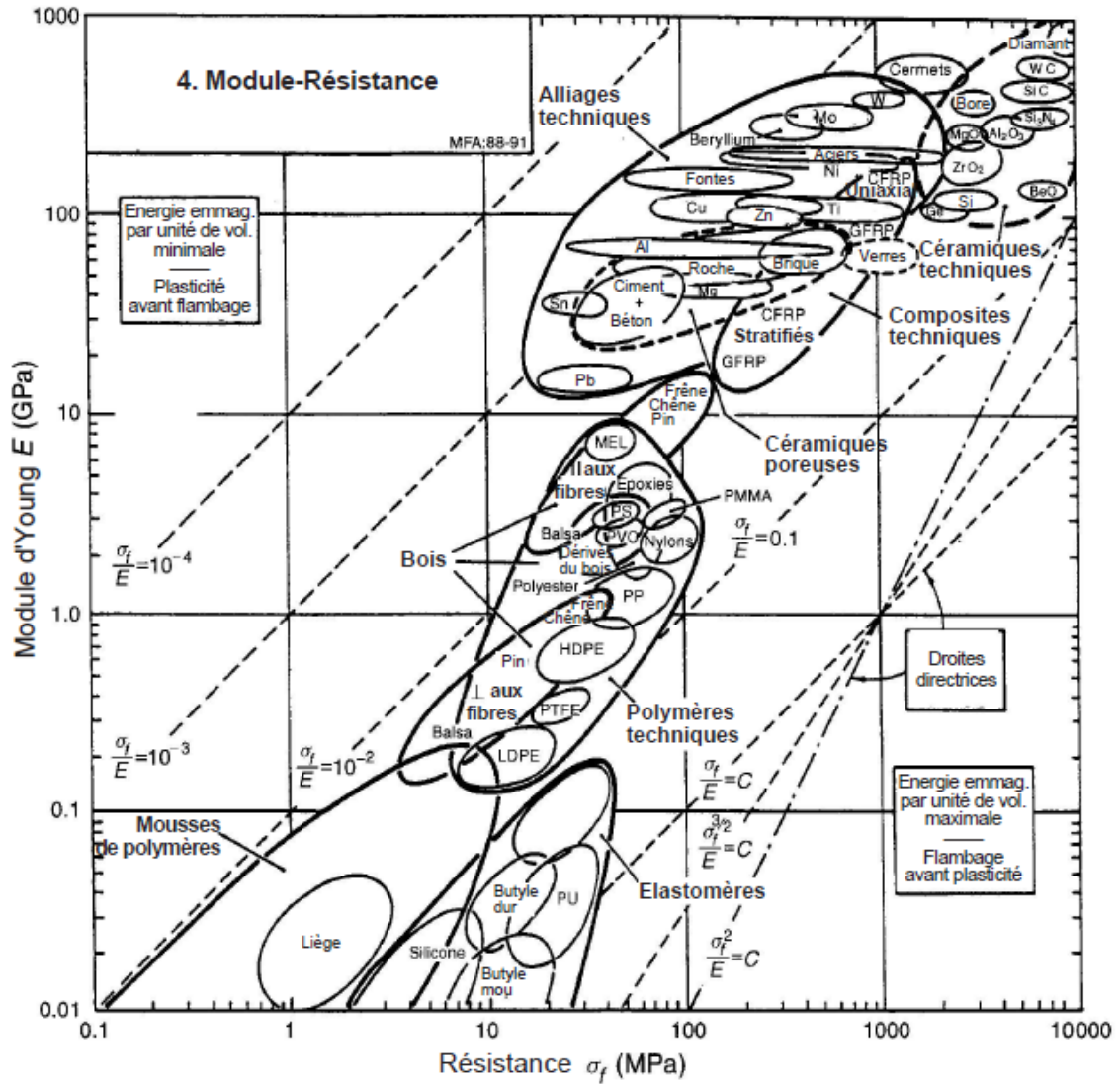
**Exemple :** Matériau à choisir pour une poutre légère et restante

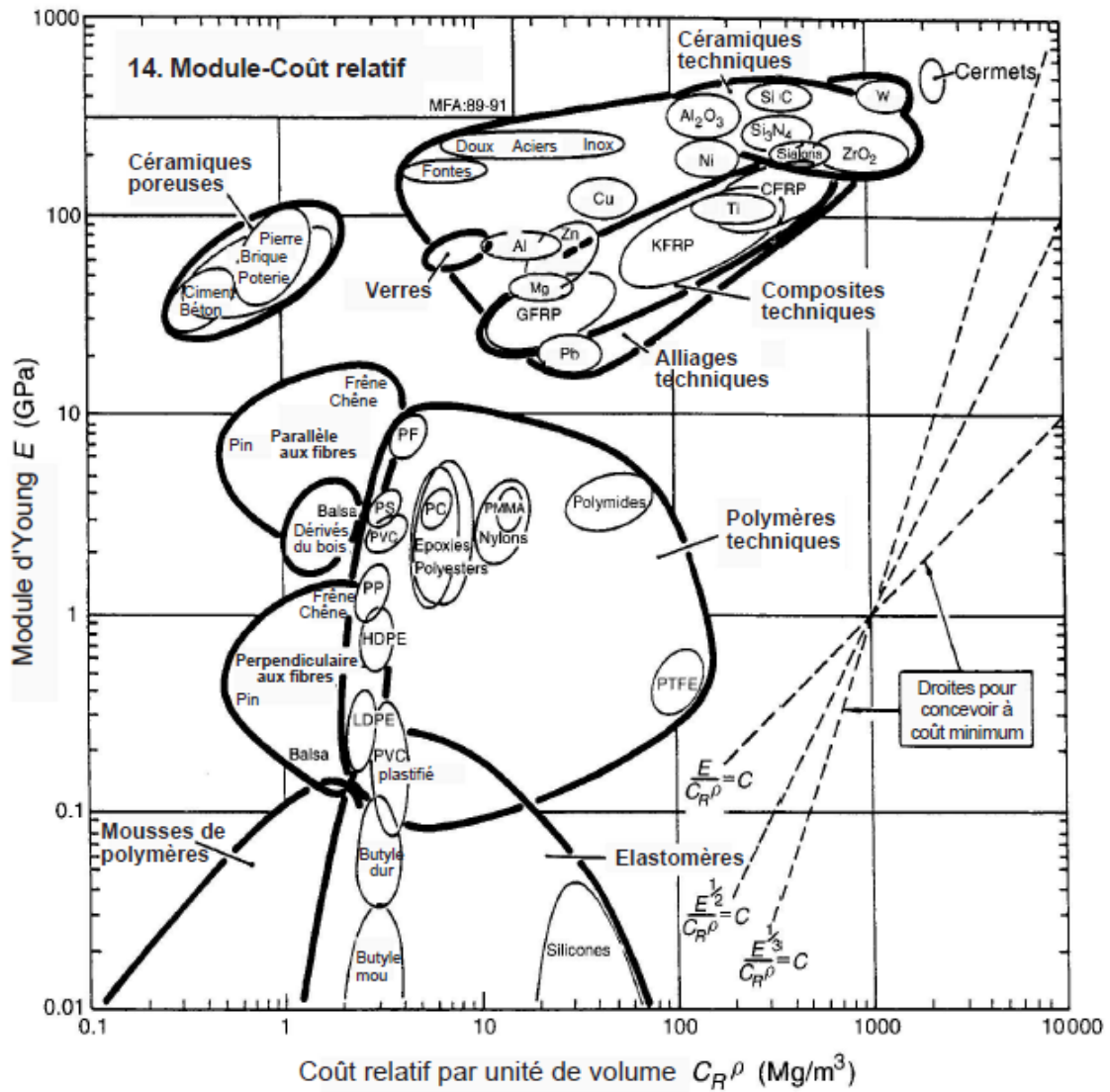
On a l’indice de performance pour ce cas  $I = \frac{\sigma^{2/3}}{\rho}$

Sur le diagramme (résistance, densité) on a la droite  $C = \frac{\sigma^{2/3}}{\rho}$ . Maximiser la performance faire monter la droite le plus haut possible, alors le matériau à choisir se trouve dans le domaine des céramiques techniques (le Diamant et le carbure de Silicium).

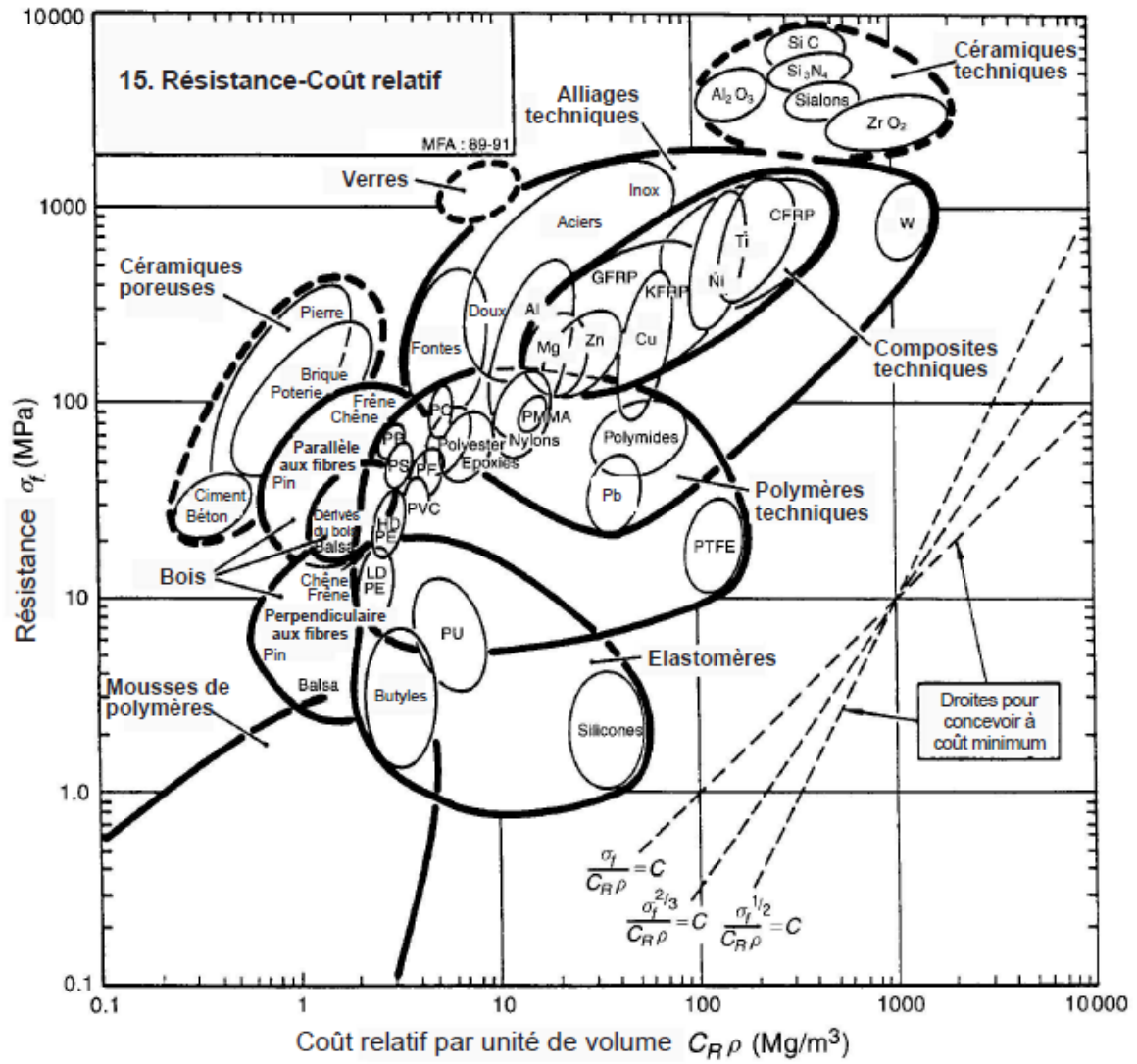














## **Chapitre 5**

Choix de la géométrie -Facteur de forme-

## 5.1 Introduction

L'expérience a montré qu'il ya des sections géométriques plus performantes que d'autres pour supporter certaines charges (spécialement la flexion et la torsion). En traction, la section transversale est importante et non pas sa forme, c'est-à-dire que toutes les sections de même aire pourront supporter la même charge.

Le terme « géométrique » signifie que la section est tubulaire, rectangulaire, en I,...

Le terme « performant » sous entend, pour des conditions de charge données, la section utilise le moins de matériau donc elle est la plus légère possible.

Efficacité = utilise moins de matériau pour une rigidité ou une résistance donnée.

### Remarque :

Un matériau peut être considéré comme possédant des propriétés mais pas une forme,

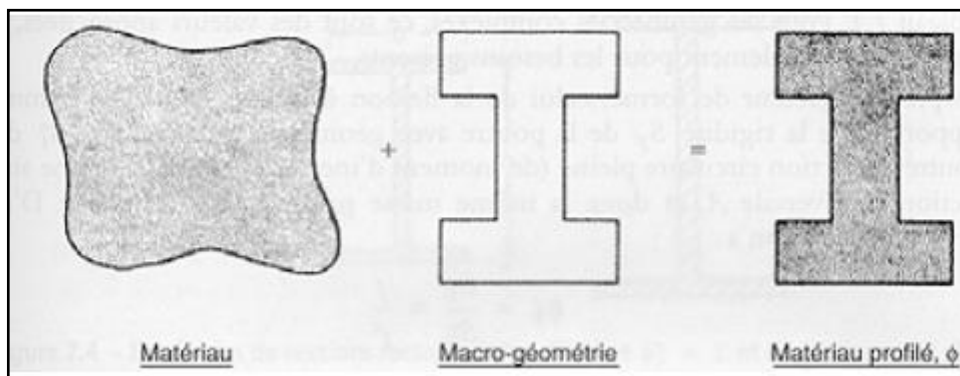


Figure 5.1 Un composant ou une structure est un matériau mais en forme

## 5.2 Facteur de forme

On définit un facteur de forme (Paramètre sans dimension)

Qui représente pour chaque mode de chargement, la performance de la section géométrique, en référence à un barreau plein.

$$\phi_f^e = \frac{\text{Rigidité d'une poutre profilée}}{\text{Rigidité d'une poutre circulaire}} \text{ (pour la même aire } A \text{)}$$

Il y'en quatre :

$$\begin{cases} \phi_F^e & \text{Facteur de forme élastique en flexion} \\ \phi_T^e & \text{Facteur de forme élastique en torsion} \end{cases}$$

Sont respectivement les facteurs de forme dans le domaine élastique en flexion et en torsion

$$\begin{cases} \phi_F^f & \text{Facteur de forme de la résistance en flexion} \\ \phi_T^f & \text{Facteur de forme de la résistance en torsion} \end{cases}$$

Sont respectivement les facteurs de forme dans le domaine à partir duquel commence la plasticité, la rupture ou la fatigue (défaillance du composant).

	<b>Flexion</b>	<b>Torsion</b>
<b>Domaine élastique (Rigidité)</b>	$\phi_F^e = S_F / S_F^0 = I / I^0$ $\phi_F^e = \frac{4\pi I}{A^2}$	$\phi_T^e = S_T / S_T^0 = K / K^0$ $\phi_T^e = \frac{2\pi K}{A^2}$
<b>Domaine de plasticité, rupture, fatigue, (résistance)</b>	$\phi_F^f = M_F / M_F^0 = Z / Z^0$ $\phi_F^f = \frac{4\pi^{1/2} Z}{A^{3/2}}$	$\phi_T^f = T_F / T_F^0 = Q / Q^0$ $\phi_T^f = \frac{4\pi^{1/2} Q}{A^{3/2}}$
<p><i>A = aire e la section;</i>  <i>I, K, Z et Q = moments associés à la section</i>  <i>M<sub>f</sub> = Zσ<sub>f</sub> = moment de rupture; S = rigidité = F/δ (T/θ)</i></p>		

### Remarques

La référence du facteur de forme est une section circulaire pleine ou facteur de forme = 1

Une poutre ou en arbre avec un facteur de forme 100 (par exemple) est 100 plus résistant (performant) que le même élément avec une section circulaire pleine avec la même masse.

Si on souhaite faire des structures rigides et résistantes (performantes) en utilisant le moins de matériau possible il faut chercher à avoir des facteurs de forme les plus élevés possibles.

### 5.3 Indice de performance incluant la géométrie

Le but est de trouver la meilleure combinaison (matériau, géométrie) permettant de maximiser les performances pour un mode de chargement donné. La méthode suit celle développée précédemment (Chapitre 3), en allant plus loin pour inclure la géométrie.

#### Exemple Flexion d'un matériau dans le domaine élastique

Considérons le choix d'un matériau pour une poutre de rigidité  $\sigma_f$  et de longueur « L » spécifiée qui doit avoir une masse « m » minimale, le choix doit prendre en compte le fait que les matériaux ont des géométries de section différentes.

#### Rappel :

	Facteur de forme	Rigidité
Domaine élastique	$\varphi_F^e = 4\pi \frac{I}{A^2}$	$\sigma_F = \frac{F}{\delta}$ $\sigma_F = \frac{C_1 EI}{L^3}$

I moment associé à la flexion

A ; section de la poutre

F ; force appliquée

$\delta$  ; Déformation (flèche)

L ; longueur de la poutre

C1 ; paramètre caractéristique de la traction

### 5.4 Méthodologie

$$\varphi_F^e = 4\pi \frac{I}{A^2} \dots \dots \dots (1) \text{ Equation du facteur de forme}$$

$$\sigma_F = \frac{C_1 EI}{L^3} \dots \dots \dots (2) \text{ Equation de contrainte, Condition de la rigidité en flexion}$$

$$m = AL\rho \dots \dots \dots (3) \text{ Equation d'objectif}$$

De (1) on définit I en fonction de A et de  $\varphi_F^e$ , on remplace I dans (2) et on tire A (la variable libre) en fonction de E et  $\varphi_F^e$ , et on remplace cette expression dans l'équation de l'objectif (3).

$$(1) \Rightarrow I = \varphi_F^e \frac{A^2}{4\pi}$$

$$\text{I dans (2)} \Rightarrow \sigma_F \frac{C_1 E \frac{\varphi_F^e A^2}{4\pi}}{L^3}$$

$$A = \frac{\sigma_F 4\pi L^3}{C_1 E \varphi_F^e} \text{ On remplace A dans (3)}$$

$$m = \left[ \frac{\sigma_F 4\pi L^3}{C_1 E \varphi_F^e} \right]^{1/2} L\rho$$

$$m = \left[ \frac{4\pi \sigma_F}{C_1} \right]^{1/2} \left[ L^{5/2} \right] \left[ \frac{\rho}{(E \varphi_F^e)^{1/2}} \right]$$

Minimiser m revient à maximiser  $\frac{\rho}{(E \varphi_F^e)^{1/2}}$

Ou bien maximiser l'indice de performance  $I$  écrit en fonction du facteur de

$$\text{forme } I = \frac{(E\varphi_F^e)^{1/2}}{\rho}$$

On voit bien l'effet de la forme, plus sera élevé plus l'indice de performance sera lui-même élevé, il est possible de faire le même raisonnement avec les autres facteurs de forme et ceci va modifier certains indices de performances.

Pendant, il faut faire attention car ces facteurs de forme ne sont pas de même pour tous les matériaux par exemple nous pouvons définir des limites empiriques à qui vont pour tous les matériaux de 1 à environ 65 compte tenu des sections existantes sur le marché Tableau 5.1 ;

**Tableau 5.1** Valeurs maximales des différents facteurs de forme de certains matériaux

MATERIAU	FLEXION		TORSION	
	Rigidité $\Phi_F^e$	Résistance $\Phi_F^f$	Rigidité $\Phi_T^e$	Résistance $\Phi_T^f$
Acier de structure	65	13	25	7
Alliages Al	44	10	31	8
Composites GFRP et CFRP	39	9	26	7
Polymères	12	5	8	4
Bois (sections pleines)	5	3	1	1

	$\phi_f^e$	$\phi_t^e$	$\phi_f^r$	$\phi_t^r$
	1	1	1	1
	$\frac{\pi}{3} = 1.05$	0.88	$\frac{4\pi}{9} = 1.40$	0.55
	$\frac{a}{b}$	$\frac{2ab}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{a}{b}$	$\frac{a}{b}$ (a < b)
	$\frac{\pi}{3} \frac{h}{b}$	$\frac{2\pi}{3} \frac{b}{h} (1 - 0.58 \frac{h}{b})$ (h > b)	$\frac{4\pi}{9} \frac{h}{b}$	$\frac{4\pi}{9} \frac{(b/h)}{(1 - 0.6b/h)^2}$ (h > b)
	$\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} = 1.21$	$\frac{2\pi}{5\sqrt{3}} = 0.73$	$\frac{\pi}{3\sqrt{3}} = 0.60$	0.39
	$\frac{r}{t}$	$\frac{r}{t}$	$\frac{2r}{t}$	$\frac{2r}{t}$
	$\frac{\pi}{6} \frac{b}{t}$	$\frac{\pi}{8} \frac{b}{t} (1 - \frac{t}{b})^4$	$\frac{4\pi}{9} \frac{b}{t}$	$\frac{\pi}{4} \frac{b}{t} (1 - \frac{t}{b})^4$
	$\frac{\pi}{6} \frac{h}{t} \frac{(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^2}$	$\frac{\pi b^2 h^2}{t(h+b)^3}$ I $\frac{\pi t}{3b} \frac{(1 + 4h/b)}{(1 + h/b)^2}$ □	$\frac{2\pi}{9} \frac{h}{t} \frac{(1 + 3b/h)^2}{(1 + b/h)^3}$	$\frac{2\pi h^2}{b(1 + h/b)^3}$ I $\frac{2\pi t}{9b} \frac{(1 + 4h/b)^2}{(1 + h/b)^3}$ □

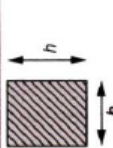
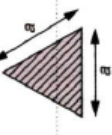

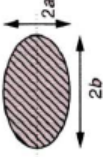
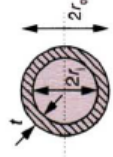
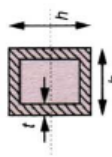
$\phi_f^e$  : flexion et/ou flambement élastiques

$\phi_t^e$  : torsion élastique

$\phi_f^r$  : rupture en flexion et/ou flambement

$\phi_t^r$  : rupture en torsion

Facteurs de forme de certains profilés

Géométrie	Aire A (m <sup>2</sup> )	Moment I (m <sup>4</sup> )	Moment K (m <sup>4</sup> )	Moment Z (m <sup>3</sup> )	Moment Q (m <sup>4</sup> )	Moment Z <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> )
	$bh$	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^3}{3} \left(1 - 0.58 \frac{b}{h}\right)$ ( $h > b$ )	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{b^2h^2}{(3h + 1.8b)}$ ( $h > b$ )	$\frac{bh^2}{4}$
	$\frac{\sqrt{3}}{4} a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{3} a^4}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	$\frac{a^3}{20}$	$\frac{3a^3}{64}$
	$\pi r^2$	$\frac{\pi r^4}{4}$	$\frac{\pi r^4}{2}$	$\frac{\pi r^3}{4}$	$\frac{\pi r^3}{2}$	$\frac{\pi r^3}{3}$
	$\pi ab$	$\frac{\pi a^3 b}{4}$	$\frac{\pi a^3 b^3}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{\pi a^2 b}{4}$	$\frac{\pi a^2 b}{2}$ ( $a < b$ )	$\frac{\pi a^2 b}{3}$
	$\pi(r_o^2 - r_i^2)$ $\approx 2\pi r t$	$\frac{\pi}{4}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^3 t$	$\frac{\pi}{2}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^3 t$	$\frac{\pi}{4r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^2 t$	$\frac{\pi}{2r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^2 t$	$\frac{\pi}{3}(r_o^3 - r_i^3)$ $\approx \pi r^2 t$
	$2t(h + b)$ ( $h, b \gg t$ )	$\frac{1}{6} h^3 t \left(1 + 3 \frac{b}{h}\right)$	$\frac{2tb^2 h^2}{(h + b)} \left(1 - \frac{t}{h}\right)^4$	$\frac{1}{3} h^2 t \left(1 + 3 \frac{b}{h}\right)$	$2tbh \left(1 - \frac{t}{h}\right)^2$	$bht \left(1 + \frac{h}{2b}\right)$

Moments associés de certains profilés



### 5.5 Exercice

Les solives sont des poutres, les plus légères possibles, pontées entre deux murs, distants de  $L$ , et supportant des planchers. On voudrait une solive rigide et légère pour pouvoir supporter une charge en flexion sans trop de déformation.

1. Déterminer la fonction d'indice de performance avec le facteur de forme de cette poutre.

Avec : Le facteur de forme en mode élastique;  $\Phi_f^e = \frac{4\pi L}{A^2}$

La charge que doit supporter la poutre;  $F = \frac{C_1 EI \delta}{L^3}$

$A$  : Section de la poutre,

$E$  : module de Young du matériau,

$\delta$  : Flèche,

$I$  : Moment quadratique de la section.

2. Traditionnellement elles sont fabriquées en bois et de section circulaire. Par quels matériaux peut-on remplacer le bois ?

## Références bibliographiques

- 1- Traité des matériaux, numéro 20 : Sélection des matériaux et des procédés de mise en oeuvre juin 2001, Michael Ashby (Auteur), Yves Bréchet (Auteur), Luc Salvo
- 2- M.F. Ashby. "Matériaux. 2. Microstructure et mise en oeuvre", Dunod
- 3- Métallurgie générale des matériaux. J. Benard J. P. Baillon
- 4- W.D. Callister, "Science et génie des matériaux".