

Chapitre -I-

Conception & matériaux architecturés

Table des Matières

I.1	Introduction	2
I.1.1	Généralités	2
I.1.2	Les matériaux en conception	3
I.1.3	L'évolution des matériaux industriels	4
I.1.4	Récapitulatif	5
I.2	Le processus de conception	6
I.2.1	Formulation du besoin	6
I.2.2	Décomposition fonctionnelle	6
I.2.3	Étapes de la conception	7
I.3	Les différents types de conception	8
I.3.1	Conception originale	8
I.3.2	Adaptation	8
I.3.3	Conception dérivée	9
I.4	Les outils de conception et les données sur les matériaux	9
I.5	Fonction, matériau, géométrie et procédé	11
I.6	Etude de cas : le tire-bouchon	12
I.6.1	Formulation du besoin	12
I.6.2	Concepts	12
I.6.3	Principes de fonctionnement	13
I.6.4	Concrétisation	13
I.6.5	Choix des matériaux	15
I.7	Matériaux architecturés	15
I.8	Récapitulation	16

Ce polycopié de cours en "Choix des matériaux" est fortement inspiré de l'ouvrage de référence "**Choix des matériaux en Conception Mécanique**" écrit par Micheal F. Ashby qui Professeur au département Engineering de l'université de Cambridge. Il est également cofondateur et président de Granta Design Ltd, société leader en systèmes d'information pour le choix des matériaux et des procédés.

Il est vivement conseillé de se référer à son ouvrage qui est disponible à la bibliothèque et qui selon moi doit faire partie de la bibliothèque de tout ingénieur spécialisé en génie mécanique, en conception ou en science des matériaux.

I.1 Introduction

I.1.1 Généralités

Le mot "conception" fait partie de ces mots qui expriment différentes choses. Tout objet manufacturé, du plus soigné des chapeaux de femme à la plus graisseuse des boîtes de vitesses incarne, d'une façon ou d'une autre, la conception. Mais cela peut même aller plus loin : la nature, pour certains, est une conception divine ; pour d'autres, c'est une conception de la sélection naturelle, l'algorithme génétique ultime. Le lecteur conviendra donc qu'il est nécessaire de restreindre un peu le champ.

Ce cours traite de la conception mécanique et du rôle qu'y jouent les matériaux. Les composants mécaniques ont une masse, supportent des charges, conduisent la chaleur et l'électricité, sont exposés à l'usure et à la corrosion, sont faits d'un ou de plusieurs matériaux, ont une certaine géométrie et, enfin, doivent être fabriqués (Figure I.1). C'est le but de ce cours de décrire comment tous ces éléments interagissent.

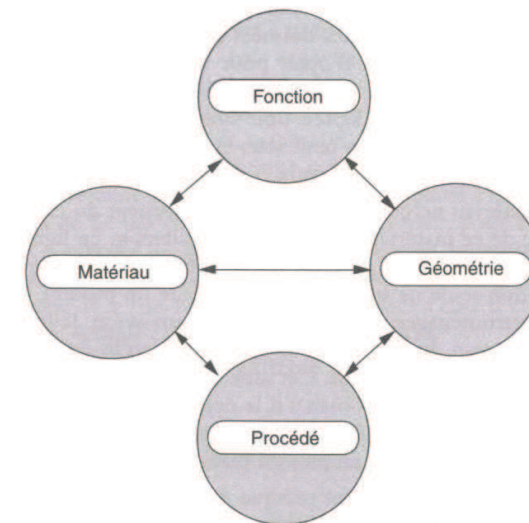


Figure I.1 – Interactions fonction-matériau-procédé-géométrie

Les matériaux ont toujours fixé les limites de la conception, et ce depuis que l'homme fabrique des habits, construit des maisons ou fait la guerre. Mais les matériaux et leurs procédés de mise en œuvre connaissent aujourd'hui un développement plus rapide que jamais ; les défis qu'ils posent et les possibilités qu'ils offrent sont eux aussi plus grands.

1.1.2 Les matériaux en 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 pourra être fabriqué. Chacune des étapes de ce processus nécessite de choisir les matériaux et les procédés avec lesquels ce produit sera fait. Normalement, le choix d'un matériau est imposé par la conception, mais parfois c'est l'inverse : un nouveau produit, ou les améliorations sur un produit existant, sont suscitées ou rendues possibles par un nouveau matériau. Le nombre de matériaux à la disposition de l'ingénieur est important, entre 40 000 et 80 000, et même si la normalisation tend à en réduire le nombre, l'apparition constante de nouveaux matériaux possédant de nouvelles propriétés ne cesse d'élargir le champ des possibilités.

Comment, alors, l'ingénieur peut-il faire pour choisir, parmi ce large éventail, le meilleur matériau pour son besoin ? Existe-t-il une procédure systématique qui permette de faire des choix rationnels ? Il faut répondre à cette question différemment selon le stade du processus de conception auquel on se trouve. Au départ, la conception est ouverte et le choix est large ; tous les matériaux doivent être considérés. Au fur et à mesure de l'avancement de la conception, les critères de choix deviennent plus pointus et la liste des prétendants se raccourcit. Ensuite, il devient nécessaire de posséder des données plus précises (mais pour un nombre plus restreint de matériaux) et d'opter pour un autre mode d'analyse. Au stade final, des données exactes sont nécessaires, mais sur encore moins de matériaux - voire un seul. La méthode adoptée doit donc prendre en compte la richesse initiale du choix, la réduire à un petit sous-ensemble, et fournir la précision et le détail qui permettront les calculs finaux.

Le choix du matériau ne peut se faire indépendamment du choix du procédé de mise en œuvre de ce matériau. Le coût entre également en ligne de compte, tant celui du matériau que de sa mise en œuvre. De plus, il faut le reconnaître, une bonne conception seule ne suffit pas à faire vendre un produit. Que ce soit pour un appareil électroménager, une automobile ou un avion, la forme, la texture, la couleur, la décoration du produit, et la satisfaction qu'ils procurent à l'utilisateur sont autant d'éléments importants. Cet aspect esthétique est omis dans la plupart des cours d'écoles d'ingénieurs mais s'il la néglige, un fabricant de produits peut perdre son marché. Une bonne conception assure un bon fonctionnement ; une excellente conception apporte en plus du plaisir.

Les problèmes de conception sont presque toujours des problèmes ouverts, pour lesquels il n'existe pas une unique solution "exacte", même si certaines solutions se révèlent nettement meilleures que d'autres. En cela, ils diffèrent des problèmes auxquels sont confrontés les étudiants d'habitude. C'est pourquoi la première chose dont un ingénieur en conception a besoin, c'est d'un esprit ouvert : la volonté de considérer toutes les éventualités. Attention cependant à ne pas se laisser submerger : il est impératif d'appliquer une procédure afin de séparer l'excellent du bon.

Ce cours traite des aspects matériaux d'un problème de conception et propose une

méthodologie qui, appliquée à bon escient, fournit un guide à travers la forêt de choix que le concepteur doit traverser. Les caractéristiques des matériaux et de leurs procédés de mise en œuvre sont exposés puis représentés sur des diagrammes qui montrent les étendues respectives de chaque matériau et simplifient le choix initial des prétendants. Les interactions entre les matériaux et la géométrie peuvent également être représentées, ainsi que les aspects plus complexes d'optimisation du rapport performance/ coût. Tout cela ne peut se faire sans connaître les propriétés des matériaux et des procédés de mise en œuvre : les moyens pour trouver ces informations sont expliqués. Le rôle de l'esthétique dans la conception ne fera pas l'objet d'un chapitre de ce cours mais, vous trouverez un chapitre fort enrichissant dans l'ouvrage de Michael Ashby.

1.1.3 L'évolution des matériaux industriels

À travers les âges, les matériaux ont fixé les limites de la conception. Les différents âges marquant l'évolution de l'humanité portent le nom des matériaux utilisés : âge de pierre, de bronze, de fer. Quand un homme mourait autrefois, les matériaux qu'il affectionnait étaient enterrés avec lui : Toutankhamon avec des tessons de verre coloré dans son sarcophage de pierre, Agamemnon avec son épée en bronze et son masque en or, qui représentaient pour chacun la technologie de pointe de l'époque.

S'ils avaient vécu et étaient morts à notre époque, qu'auraient-ils emporté ? Leur montre en titane, peut-être ; leur raquette de tennis en composites à fibres de carbone ; leur VTT en composite à matrice métallique ; leur casque en polyéther-éthylcétone. Nous ne sommes en effet pas à l'âge d'un seul matériau, mais à celui d'un éventail immense de matériaux. Aucune époque n'a jamais connu une évolution aussi rapide et une gamme aussi étendue de matériaux. L'éventail s'est agrandi si rapidement que les ingénieurs qui ont quitté l'école il y a vingt ans sont tout excusés de ne pas en connaître la moitié. Mais, pour un concepteur, ne pas savoir c'est s'exposer au pire, car une conception innovante passe souvent par l'exploitation imaginative des propriétés offertes par les nouveaux matériaux. Et pour l'homme de la rue, ne pas savoir, c'est passer à côté d'une des grandes évolutions de notre époque : l'âge des matériaux avancés.

Cette évolution et sa rapidité extrême sont illustrées à la figure I.2. L'importance relative est basée :

- pour la préhistoire, sur les affirmations des archéologues ;
- pour 1960, sur les heures d'enseignement accordées dans les universités britanniques et américaines ;
- pour 2020, sur les prévisions d'emploi des matériaux dans les automobiles (l'échelle des temps n'est pas linéaire).

Les matériaux préhistoriques (> 10 000 av. J.-C., l'âge de pierre) comprenaient les céramiques et les verres, les polymères et les composites naturels. Les armes, toujours à la pointe de la technologie, étaient faites en bois et en silex ; les constructions et les ponts en bois et en pierre. Il arrivait que l'on trouve ici ou là de l'or et de l'argent, mais ceux-ci ne jouèrent qu'un rôle mineur dans la technologie. La découverte du bronze et du cuivre, puis du fer, fut le déclencheur d'avancées gigantesques, en remplaçant les vieilles armes en bois et pierre et les outils. La technologie de la fonte affirma la dominance des métaux, et l'évolution des aciers, des alliages légers et spéciaux consolidèrent cette position. Dans les années 1960, "matériaux techniques" signifiait

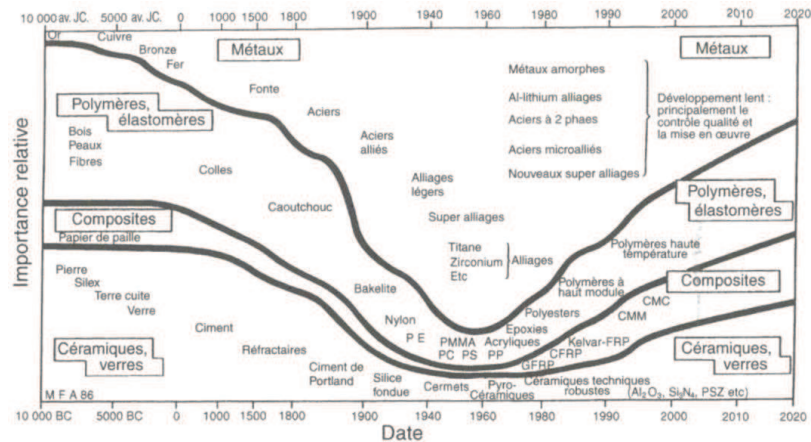


Figure I.2 – Evolution des matériaux avec le temps.

“métaux”. On enseignait la métallurgie, les autres matériaux n’étant que rarement mentionnés.

Il y avait eu, bien sûr, des avancées dans les autres familles de matériaux : le ciment de Portland, les réfractaires, les céramiques, le caoutchouc, la bakélite ou le polyéthylène, mais leurs parts de marché restaient faibles. Depuis 1960, les choses ont changé. Le développement des nouveaux alliages métalliques est lent et la demande en acier et en fonte a même baissé dans certains pays. L’industrie des plastiques et des composites, par contre, croît fortement et les projections de croissance de production des nouvelles céramiques à hautes performances laissent présager une expansion rapide également. Ces évolutions rapides offrent de nouvelles possibilités que le concepteur ne peut plus ignorer.

I.1.4 Récapitulatif

Le nombre de matériaux techniques est élevé, estimé entre 40 000 et 80 000. Le concepteur doit choisir dans ce vaste éventail le matériau le mieux adapté à son problème. Faite sans méthode, cette tâche peut se révéler ardue et fatigante et la tentation est alors forte de choisir le matériau traditionnellement employé pour l’application donnée : du verre pour des bouteilles, de l’acier pour les cannettes. Ce choix conservateur n’est sans doute pas risqué, mais il évacue toute idée d’innovation. Les matériaux techniques évoluent de plus en plus vite, et le choix est de plus en plus large. Les exemples de produits qui ont conquis de nouveaux marchés grâce à l’usage de matériaux différents sont aussi courants que les bouteilles en plastique ou les cannettes en aluminium. C’est pourquoi il est important, dès les premiers stades de la conception, de passer en revue tous les matériaux sans rejeter de possibilités simplement parce qu’elles sont inhabituelles. C’est tout le propos de ce cours.

Dans la suite du chapitre, nous nous intéressons principalement à la conception

mécanique, qui concerne les principes physiques, le bon fonctionnement et la fabrication de systèmes mécaniques. Nous n’en oublions pas pour autant l’aspect “esthétique industrielle”, le design, qui concerne la forme, la couleur, la texture et avant tout, l’attrait du consommateur, mais cela vient après. Le point de départ est une bonne conception mécanique et un bon choix de matériaux. Notre but est de décrire une méthodologie de choix des matériaux et des procédés guidée par la conception, c’est-à-dire que le processus de choix utilise comme données de départ les spécifications fonctionnelles de la conception. Pour cela, il nous faut en premier lieu nous intéresser brièvement à la conception elle-même. Comme la plupart des domaines techniques, elle possède son jargon propre, que l’on ne peut totalement ignorer. Ce chapitre expose un certain nombre de mots et d’expressions de la conception (le vocabulaire), présente les différentes étapes de sa mise en œuvre et la façon dont le choix des matériaux s’y intègre.

I.2 Le processus de conception

I.2.1 Formulation du besoin

La conception est un processus itératif : au départ, il y a un besoin du marché ou une nouvelle idée ; à l’arrivée, le cahier des charges 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 est souvent précisé que la formulation doit être la plus objective possible quant à la solution à adopter afin d’éviter que la réflexion ne soit bridée par des présupposés. Il y a un certain nombre d’étapes entre la formulation du besoin et le cahier des charges du produit, qui sont schématisées à la figure I.3 : le concept, la concrétisation, le détail du produit.

I.2.2 Décomposition fonctionnelle

Le produit lui-même est un système technique constitué d’ensembles, de sous-ensembles et de composants, assemblés de façon à accomplir la tâche demandée. Ainsi, on peut décrire un chat (le système) comme fait d’une tête, d’un corps, d’une queue, de quatre pattes, etc. (les ensembles), chacun constitué de composants (fémurs, quadriceps, griffes, poils, etc.). Cette décomposition est pratique pour décrire un système existant, mais s’avère peu utile pour en concevoir de nouveaux.

Pour cela, il vaut mieux se servir des outils de l’analyse des systèmes, qui pense en termes d’entrées, de flux et de sorties d’information, d’énergie et de matière (Figure I.4) ; la conception permet de convertir les entrées en sorties. Ainsi, un moteur électrique convertit de l’électricité en énergie mécanique, une alarme recueille des informations et les transforme en bruit. Dans cette approche, le système est décomposé en sous-systèmes reliés entre eux et qui remplissent des sous-fonctions spécifiques ; il en résulte un arrangement que l’on appelle structure fonctionnelle ou décomposition fonctionnelle du système. Cela revient à décrire un chat comme la liaison de systèmes respiratoire, cardio-vasculaire, nerveux, digestif, etc. D’autres choix de conception lieraient les fonctions unitaires d’autres façons, les combinant ou les séparant. La

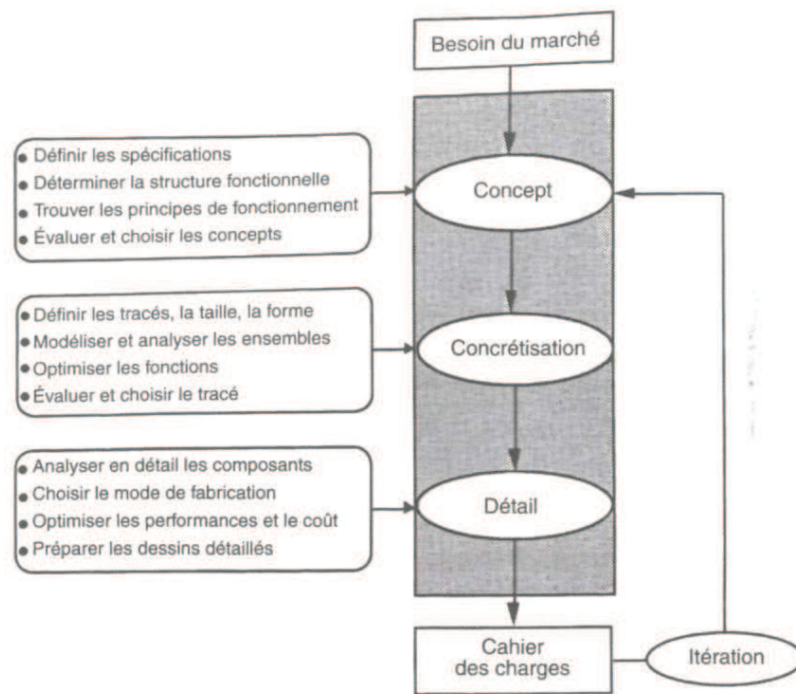


Figure I.3 – Déroulement de la conception : la phase conceptuelle permet d'identifier et de clarifier le besoin, puis la concrétisation et l'analyse détaillée conduisent au cahier des charges du produit.

structure fonctionnelle permet d'évaluer de façon systématique les différentes options de conception.

I.2.3 Étapes de la conception

La conception se déroule en imaginant des concepts pour remplir chaque sous-fonction, chacun reposant sur un principe de disfonctionnement. A ce stade, toutes les options sont ouvertes : le concepteur prend en compte toutes les alternatives pour les sous-fonctions et la façon de les combiner ou de les séparer.

A l'étape suivante de concrétisation, il s'intéresse aux concepts les plus prometteurs et évalue leur fonctionnement, prédimensionne les composants et choisit des matériaux pouvant opérer dans les intervalles de contraintes, de température et les environnements mis en évidence par l'analyse du besoin, puis il évalue les implications en termes de performances et de coût. A la fin de cette étape, il aboutit à une configuration valable qui va alors être détaillée.

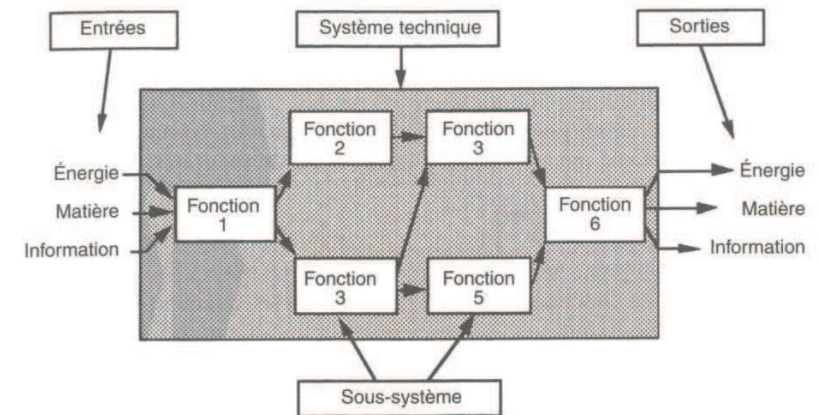


Figure I.4 – Analyse d'un système technique, considéré comme la transformation d'énergie, de matière et d'information (signaux).

Dans cette dernière étape, les spécifications sont établies pour chaque composant ; pour les composants critiques, des analyses thermiques ou mécaniques précises peuvent être envisagées. On applique ensuite les méthodes d'optimisation à chaque composant et groupe de composants afin de maximiser les performances. Le choix de la géométrie finale est arrêté, le processus de fabrication est détaillé et la conception est chiffrée. A la fin de cette étape, le cahier des charges complet du produit est prêt. Toutes ces notions, décrites de façon plus ou moins abstraites, ne sont pas simples à bien comprendre : un exemple d'application est donné à la section I.6.

I.3 Les différents types de conception

I.3.1 Conception originale

Elle implique une nouvelle idée ou un nouveau principe de fonctionnement, comme par exemple le stylo à bille ou le disque compact. Les nouveaux matériaux peuvent offrir de nouvelles et uniques combinaisons de propriétés qui rendent possible une conception originale : le silicium haute pureté a rendu possible le transistor, le verre haute pureté les fibres optiques. Ainsi parfois, un nouveau matériau entraîne un nouveau produit, mais un nouveau produit peut aussi exiger le développement d'un nouveau matériau, comme cela a été le cas avec la technologie nucléaire et les alliages à base de zirconium.

I.3.2 Adaptation

Dans ce cas, on prend un concept existant et on cherche à l'améliorer en affirmant son principe de fonctionnement. Ici aussi, le développement des matériaux est souvent moteur : remplacement des matériaux métalliques par des polymères dans les appareils

électroménagers, du bois par les composites à fibres de carbone dans les articles de sport. Ces secteurs industriels sont tous deux importants et compétitifs, et la façon dont les nouveaux matériaux ont été utilisés a souvent permis aux fabricants de gagner des marchés.

I.3.3 Conception dérivée

Elle implique un changement d'échelle, de dimension ou de niveau de détail sans changement de la fonction ou de la méthode utilisée (par exemple : agrandissement des turbines). Le changement d'échelle ou de conditions d'utilisation peut nécessiter un changement de matériau. Ainsi, les petits bateaux sont faits en composites à fibres de verre, les grands en acier, les avions subsoniques sont faits avec un certain alliage, les avions supersoniques avec un autre.

I.4 Les outils de conception et les données sur les matériaux

La mise en œuvre des différentes étapes de la figure I.3 se fait en utilisant des outils de conception, listés dans la figure I.5. Ces outils permettent de modéliser et d'optimiser la conception, en automatisant certains aspects. Les logiciels de CAO permettent la visualisation et créent des fichiers qui peuvent être téléchargés pour contrôler les procédés de mise en forme ; les logiciels d'optimisation et d'estimation de coûts permettent d'affiner les détails.

Le choix des matériaux intervient à chaque étape de la conception. La nature des données dont on a besoin au début est très différente, en précision et en exhaustivité, de celle dont on se servira plus tard. Au stade du concept, le concepteur a besoin de valeurs approchées pour les propriétés, mais concernant le plus grand nombre possible de matériaux. Toutes les options sont possibles : un polymère peut s'avérer le meilleur choix pour un concept et un métal pour un autre, même si la fonction à remplir est la même. À ce stade, le problème n'est pas la précision, mais l'exhaustivité des données et l'accès à celles-ci : comment présenter le vaste éventail de données afin d'offrir au concepteur la plus grande liberté de considérer toutes les alternatives ? Des procédures de choix existent qui le permettent.

Pour la phase de concrétisation, il est nécessaire d'avoir des données sur un groupe de matériaux seulement, mais avec une meilleure précision. On trouve ces données dans des *handbooks* et des logiciels spécialisés traitant d'une seule classe de matériaux, qui permettent un niveau de détail supérieur au précédent.

Un degré de précision et de détail encore supérieur est nécessaire pour la phase finale, mais portant sur quelques matériaux seulement. Pour obtenir de telles informations, le mieux est de se reporter aux fiches descriptives des producteurs de matériaux. En effet, un même matériau peut avoir des intervalles de propriétés différents selon l'origine du fabricant. Il est donc important à ce stade de choisir un producteur et d'utiliser les propriétés de son produit pour faire les calculs de détail. Cela peut même parfois se révéler insuffisant et s'il s'agit d'un composant critique (dont la rupture peut, d'une façon ou d'une autre, être désastreuse), il sera prudent d'effectuer des essais internes pour mesurer les propriétés critiques du matériau.

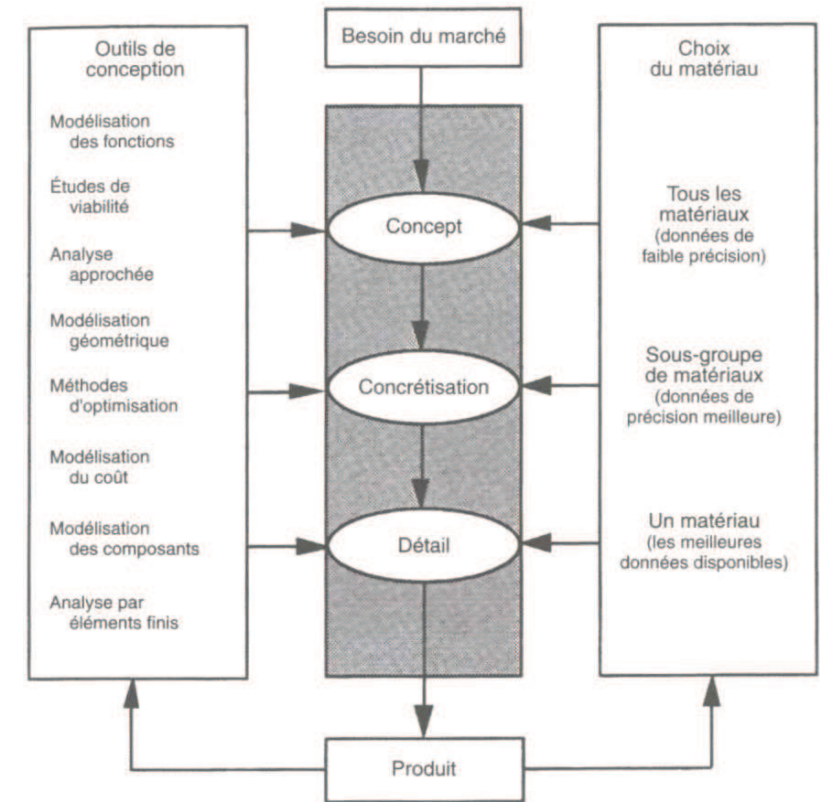


Figure I.5 – Diagramme du déroulement de la conception, montrant comment les outils et les matériaux s'y intègrent.

L'intervention des matériaux dans la conception ne s'arrête pas une fois le mode de fabrication établi, car les produits tombent en panne et ces pannes constituent des sources d'informations utiles. Souvent, elles révèlent qu'un matériau a été mal employé, et il faut reconsidérer la conception et le choix du matériau.

I.5 Fonction, matériau, géométrie et procédé

Le choix d'un matériau et d'un procédé est inséparable du choix de la géométrie. Ce terme recouvre à la fois la géométrie externe et interne. Pour arriver à cette géométrie, le matériau subit des procédés de fabrication : mise en forme primaire (comme le coulage ou le forgeage), enlèvement de matière (usinage, perçage), finition (polissage) et assemblage (soudage, par exemple). La fonction, le matériau, la géométrie et le procédé interagissent (Figure I.6) :

- la fonction dicte le choix du matériau et du procédé;
- le procédé dépend du matériau;
- le procédé interagit avec la géométrie (il détermine la forme, la taille, la précision, etc. et bien sûr le coût).

Ces interactions vont dans les deux sens : spécifier une forme réduit le choix du matériau et du procédé, spécifier le procédé limite le nombre de matériaux et la forme qu'ils peuvent prendre. Plus la conception est sophistiquée, plus le cahier des charges sera précis et plus grandes seront les interactions. C'est comme pour faire du vin : presque tous les cépages et tous les procédés peuvent être utilisés pour faire du vin de table, mais pour faire du champagne, le raisin et le procédé doivent être bien spécifiés.

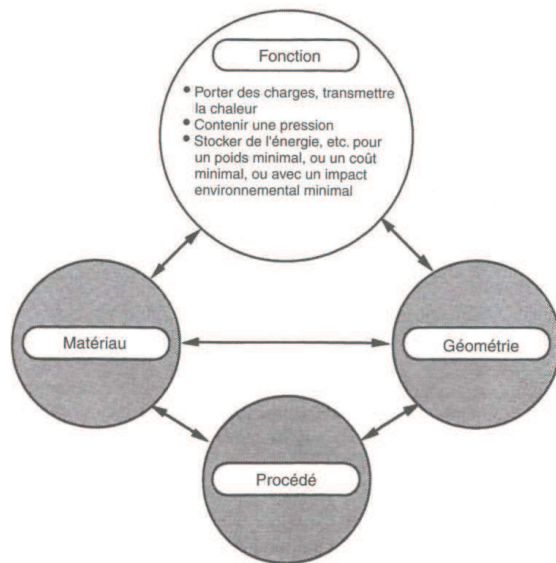


Figure I.6 – Interactions fonction-matériau-procédé-géométrie.

I.6 Etude de cas : le tire-bouchon

I.6.1 Formulation du besoin

La fermeture d'une bouteille par un bouchon crée un besoin : celui d'avoir accès au vin à l'intérieur de la bouteille. Il est possible de formuler ce besoin ainsi : « Il faut un appareil pour retirer les bouchons des bouteilles de vin. » Mais attention ! Ce besoin doit être exprimé de façon neutre et la formulation précédente ne l'est pas. Le but est d'avoir accès au vin, or notre formulation implique que cela sera réalisé en enlevant le bouchon, mais d'autres manières sont envisageables. Il serait donc plus juste de dire : « Il faut un appareil permettant l'accès au vin », et on pourrait même ajouter « de façon pratique, à un coût modéré et sans contaminer le vin ».

I.6.2 Concepts

La figure I.7 montre cinq concepts qui permettent de remplir ce besoin :

- retirer le bouchon par traction axiale,
- le retirer par cisaillement,
- le retirer en poussant dessus par le bas,
- le détruire,
- le contourner purement et simplement, par exemple en cassant le goulot.

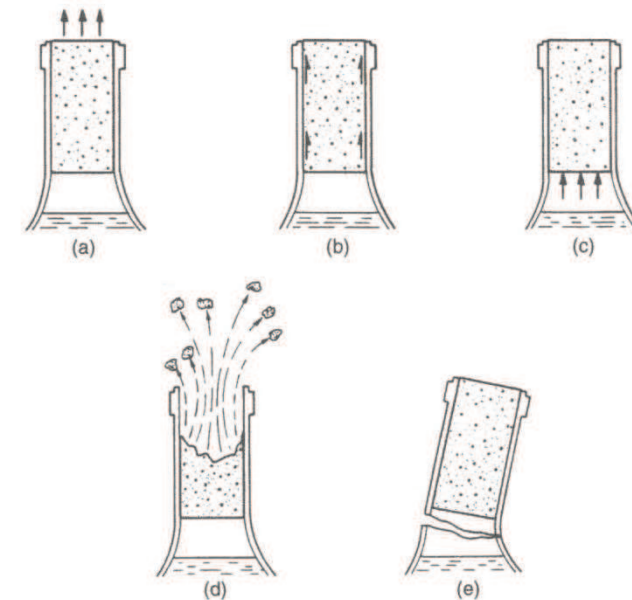


Figure I.7 – Cinq concepts possibles pour avoir accès au vin.

I.6.3 Principes de fonctionnement

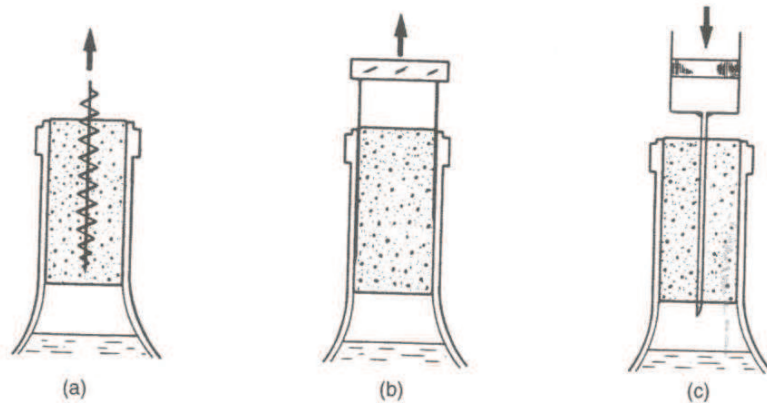


Figure I.8 – Principes de fonctionnement pour mettre en œuvre les concepts des figures I.7 (a), (b) et (c).

Il existe de nombreux appareils exploitant l'un des trois premiers concepts précédents. Les autres sont également utilisés, quoique généralement en désespoir de cause et nous ne les retiendrons pas parce qu'ils peuvent contaminer le vin. La figure I.8 montre le principe de fonctionnement de chacun des trois premiers concepts :

pour le premier : une vis est enfoncée dans le bouchon auquel est appliqué une traction axiale;

pour le second : de fines lames élastiques insérées le long du bouchon appliquent un effort de cisaillement quand on les tire;

pour le troisième : du gaz est envoyé à travers une aiguille creuse enfoncée dans le bouchon pour le faire sortir.

La figure I.9 montre des exemples de tire-bouchon qui utilisent ces principes de fonctionnement. Ces ustensiles sont décrits par la structure fonctionnelle de la figure I.10 et diffèrent par la façon dont les fonctions (générer un effort, le transmettre et l'appliquer au bouchon) sont réalisées. Les façons dont ces tire-bouchons combinent les principes de fonctionnement sont représentées par des flèches de liaison. Des combinaisons différentes donneraient d'autres ustensiles.

I.6.4 Concrétisation

La figure I.11 montre des schémas de réalisation pour des appareils mettant en jeu un seul concept, celui de la traction axiale. Dans le premier cas, on a une traction directe ; pour les trois autres, la traction est assistée mécaniquement, à l'aide d'un levier, d'une crémaillère ou d'un ressort (les photos de la figure I.9 en montrent des exemples). Les réalisations de la figure I.8 mettent en évidence les spécifications fonctionnelles de chaque composant de l'appareil, que l'on peut exprimer ainsi :

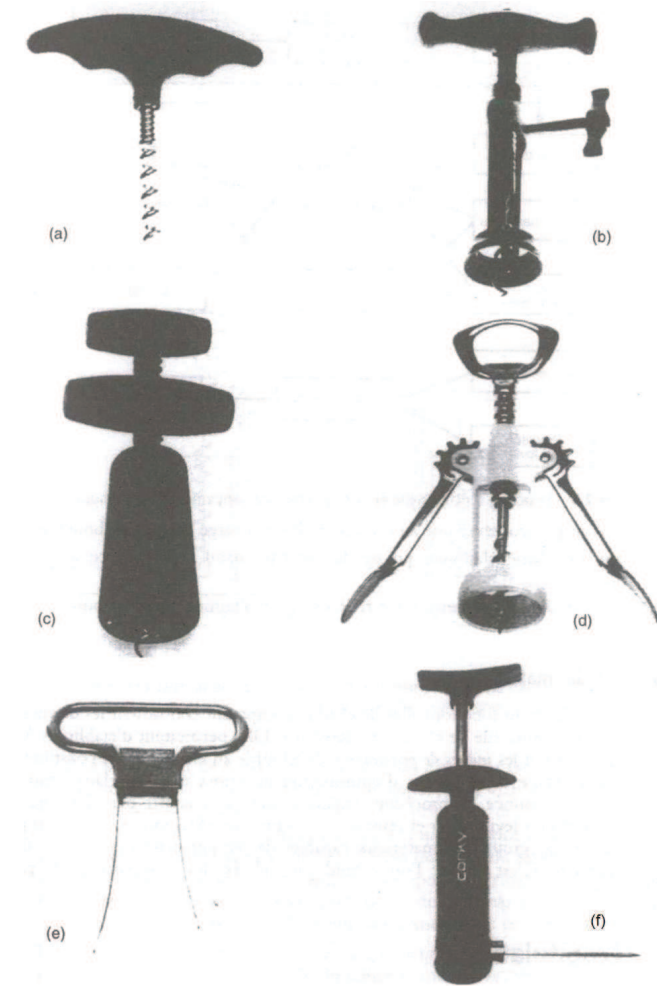


Figure I.9 – Tire-bouchon utilisant les principes de fonctionnement de la figure précédente.

- un levier (poutre) léger pouvant supporter un moment fléchissant donné,
- une vis peu coûteuse pouvant transmettre une charge donnée au bouchon,
- une fine lame élastique qui ne flambe pas quand on l'enfonce le long du bouchon,
- une aiguille fine et creuse assez résistante pour s'enfoncer dans le bouchon,
- etc.

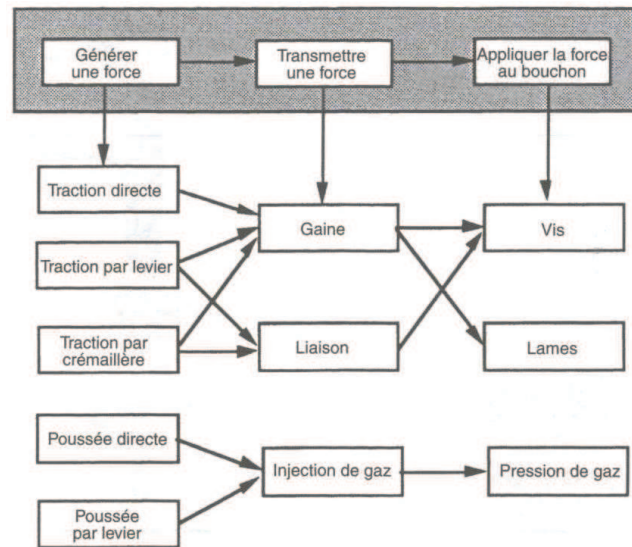


Figure I.10 – Structure fonctionnelle et principes de fonctionnement des tire-bouchons.

I.6.5 Choix des matériaux

Les spécifications fonctionnelles de chaque composant constituent les données de base pour le procédé de choix des matériaux. Elles permettent d'établir les limites des propriétés et les indices de performance, développés dans la suite du cours, et constituent la première étape du processus d'optimisation du choix des matériaux pour une application donnée. La procédure explicitée dans ce chapitre part des spécifications comme "levier léger et résistant" ou "fine lame élastique" sert à identifier un groupe de matériaux capables de remplir cette fonction de façon satisfaisante. C'est ce que l'on entend par "choix des matériaux guidé par la conception".

I.7 Matériaux architecturés

Remplacer des systèmes complexes par un matériau unique possédant des propriétés à la fois structurelles et fonctionnelles est un défi majeur de ce début du XXI^{ème} siècle. Les matériaux de l'avenir devront donc, à court terme, être multifonctionnels. La multifonctionnalité couvre aussi bien le comportement mécanique, que les propriétés électriques, optiques, thermiques ou magnétiques.

L'une des approches possible pour répondre à ce défi consiste à envisager des multi-matériaux pouvant associer différentes classes de matériaux (métal, polymère, céramique) et dont les composants auront une architecture bien définie à toutes les échelles allant de la structure à la microstructure.

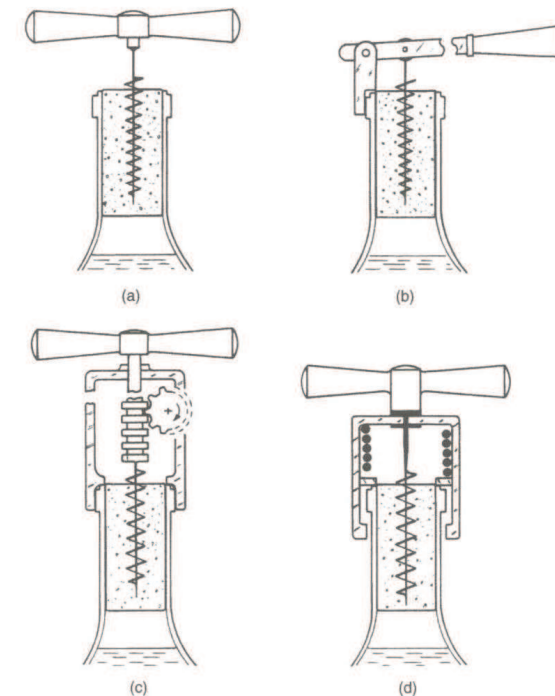


Figure I.11 – Schémas de réalisation pour les différents concepts, utilisant la traction : (a) direct ; (b) avec levier ; (c) avec crémaillère ; (d) avec ressort.

Les performances de ces matériaux architecturés vont résulter des interactions entre les différentes échelles et l'optimisation de leurs propriétés nécessitera la maîtrise de l'architecture, dès l'étape de mise en œuvre.

Pour avoir de plus d'informations sur les matériaux architecturés, vous êtes invités à consulter regarder les vidéos du cours donné par Yves Bréchet au Collège de France et du séminaire d'Olivier Bouaziz que vous trouverez à l'adresse suivante : <http://www.college-de-france.fr/site/yves-brechet/>

I.8 Récapitulation

La conception est un processus itératif. Au départ, il y a un besoin du marché qu'il faut exprimer par une formulation du besoin. On définit ensuite un concept de produit permettant de remplir ce besoin. Si les premières estimations et l'analyse de solutions alternatives montrent que ce concept est viable, on passe à l'étape suivante de concrétisation. On choisit des principes de fonctionnement, on décide des dimensions

et du tracé puis on estime les performances et le coût. Si les résultats sont satisfaisants, on passe à l'étape du détail du produit : optimisation des performances, analyse complète des composants critiques (en utilisant au besoin des méthodes numériques), préparation des schémas détaillés, spécification des tolérances, de la précision, des méthodes d'assemblage et de finition, etc.

Le choix des matériaux intervient à chaque étape, mais avec une exhaustivité et une précision différentes. Au stade du concept, tous les matériaux et les procédés sont envisageables, et il faut une méthode permettant l'accès rapide aux données concernant un grand nombre de matériaux, mais pas avec une grande précision.

Au stade de la concrétisation, les procédures de calcul et d'optimisation demandent un plus grand niveau de précision et de détail. On ne retient alors plus qu'un petit nombre de matériaux et de procédés pour la dernière étape du détail du produit. Pour ces matériaux, il est indispensable de posséder des données les plus précises possibles.

Des données sont disponibles pour chaque étape, et il faut pour chacune mettre en place un système propre de gestion des données, décrit dans les chapitres suivants. Cette gestion est complexe : elle doit être guidée par la conception, mais aussi prendre en compte la richesse du choix et englober les interactions complexes entre le matériau, sa forme, le procédé par lequel il est mis en forme et la fonction qu'il doit remplir,

Dans certains cas, les exigences sont telles qu'il n'existe pas de matériaux en mesure de répondre au besoin. Le concept de matériau architecturé a été introduit pour répondre à ces défis technologiques en associant différents matériaux au sein d'une structure. Cette approche nouvelle vise à associer les compétences de l'ingénieur structure à celles de l'ingénieur matériaux, en optimisant à la fois les géométries des pièces et les microstructures des matériaux.

Étant donnée la complexité de cette tâche, pourquoi ne pas opter pour la solution la plus sûre : continuer à faire ce que vous (ou les autres) avez toujours fait ? Beaucoup ont choisi cette option. Peu sont encore en activité.

Pour en savoir plus

Les ouvrages de références

Pour en savoir plus sur l'élaboration des métaux, vous pouvez consulter les ouvrages de référence :

- M. F. Ashby (2004) *Choix des Matériaux en Conception Mécanique*. Dunod (620.11 ASH)
- Y. Bréchet, M. F. Ashby & L. Salvo (2001) *Sélection des matériaux et des procédés de mise en IJuvre (Traité des Matériaux Volume 20)*. Presses polytechniques et universitaires romandes (620.11 TRA)

Vidéos

Vous trouverez un ensemble d'enregistrements de cours et de séminaires, très intéressants dispensés au Collège de France, traitant du rôle des matériaux dans l'industrie ainsi que des nombreux défis actuels en sciences de matériaux :

- <http://www.college-de-france.fr/site/yves-brechet/>

Vocabulaire anglais

Pour le vocabulaire anglais technique, il est conseillé de consulter le site du Grand Dictionnaire Terminologique (<http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>)

Exercices

Exercice 1 : Répondre aux questions

A partir des informations recueillies lors de la conférence d'Olivier Bouaziz, répondre aux questions suivantes :

Question 1 *Qu'est-ce qu'un indice de performance ? A quoi sert-il ?*

Question 2 *Qu'elle est la démarche suivie par un ingénieur structure pour optimiser la rigidité en torsion d'un arbre ?*

Question 3 *Qu'elle est la démarche suivie par un ingénieur matériaux pour optimiser la rigidité en torsion d'un arbre ?*

Question 4 *Donnez des exemples de macrocomposites, de mésocomposites et de microcomposites ? Précisez leurs fonctions ?*

Question 5 *Qu'est-ce qu'un matériau architecturé ?*

Chapitre -II-

Propriétés des matériaux

Table des Matières

II.1	Introduction	20
II.2	Les familles de matériaux	20
II.2.1	Les métaux	20
II.2.2	Les céramiques et les verres	20
II.2.3	Les polymères et les élastomères	21
II.2.4	Composites	21
II.2.5	Conclusion	21
II.3	Définitions des propriétés des matériaux	22
II.3.1	Propriétés physiques et mécaniques	23
II.3.2	Propriétés thermiques	29
II.3.3	Usure, oxydation et corrosion	31
II.4	Récapitulation	33

II.1 Introduction

Un bon produit (c'est-à-dire qui fonctionne bien, à un bon rapport qualité/prix et donne satisfaction à l'utilisateur) utilise les matériaux les mieux adaptés et en exploite pleinement le potentiel et les caractéristiques. Les familles de matériaux (métaux, polymères, céramiques, etc.) sont présentés dans la section II.2. Mais en vérité, ce n'est pas un matériau que nous recherchons : c'est un profil de propriétés. Les propriétés importantes en conception thermomécanique sont définies dans la section II.3. Le lecteur déjà familier avec les notions de modules, de résistances, de capacité d'amortissement, de conductivité thermique, etc. pourra utiliser cette partie comme une référence pour retrouver la signification exacte ou les unités des grandeurs utilisées dans les diagrammes des chapitres suivants.

II.2 Les familles de matériaux

On classe habituellement les matériaux en six grandes familles : métaux, polymères, élastomères, céramiques, verres et composites. Les membres d'une même famille ont des traits communs propriétés, méthodes de mise en œuvre et, souvent, applications.

II.2.1 Les métaux

Les métaux ont des modules relativement élevés. On peut les renforcer par des éléments d'alliage, par traitement mécanique et thermique, mais ils restent ductiles, ce qui permet de les mettre en forme par déformation. Certains alliages à haute résistance (comme les aciers à ressorts) ont une ductilité aussi faible que 2 %, mais cela suffit pour que le matériau se déforme avant de se rompre et pour que cette rupture soit de type ductile. En partie à cause de leur ductilité, les métaux sont sujets à la fatigue et parmi toutes les familles de matériaux, ils sont les moins résistants à la corrosion.

II.2.2 Les céramiques et les verres

Ils possèdent également des modules élevés mais, à l'inverse des métaux, ils sont fragiles. Leur "résistance" en traction signifie la résistance à la rupture fragile ; en compression, elle est environ 15 fois supérieure. De par leur absence de ductilité, ils possèdent une faible tolérance aux concentrations de contraintes (comme les trous ou les fissures) ou aux contraintes de contact élevées (aux points de serrage, par exemple). En effet, les matériaux ductiles supportent les concentrations de contraintes en se déformant pour redistribuer la charge de façon plus égale ; grâce à cela, ils peuvent être utilisés sous des charges statiques proches de leur limite d'élasticité, ce qui n'est pas possible avec les céramiques. Les matériaux fragiles présentent toujours une grande dispersion de résistance, résistance qui dépend elle-même du volume de matériau soumis à la charge et du temps pendant lequel elle est appliquée.

Les céramiques ne sont donc pas aussi faciles à utiliser en conception que les métaux, toutefois, elles possèdent des caractéristiques intéressantes. Elles sont rigides, dures, résistent à l'abrasion (ce qui explique leur usage dans les paliers et les outils de coupe),

elles conservent leur résistance aux hautes températures et résistent bien à la corrosion. Elles constituent donc pour cela une famille de matériaux importante.

II.2.3 Les polymères et les élastomères

Ces matériaux se situent à l'autre bout du spectre. Ils possèdent des modules faibles, environ 50 fois inférieurs à ceux des métaux, mais ils peuvent être résistants. Une conséquence de cela est qu'ils peuvent se déformer de façon importante. Ils sont sujets au fluage, même à température ambiante, et par conséquent un matériau polymère soumis à une charge acquerra avec le temps une déformation permanente. Leurs propriétés dépendent de la température, ce qui fait qu'un même polymère pourra être résistant et déformable à 20°C (température ambiante), fragile à 4°C (température d'un réfrigérateur) et sujet au fluage à 100 °C (température d'une bouilloire). Aucun, quoiqu'il en soit, ne présente de résistance intéressante au-dessus de 200 °C.

Il est important de bien prendre en compte ces aspects pour pouvoir exploiter les nombreux avantages des polymères en conception :

- Quand des conjuguaisons de propriétés sont demandées, comme par exemple la résistance par unité de masse, les polymères se hissent à la hauteur des métaux.
- Ils sont faciles à mettre en forme : des pièces compliquées possédant plusieurs fonctions peuvent être moulées en une seule opération.
- La grande capacité de déformation élastique permet de concevoir des composants qui s'encliquettent, ce qui rend l'assemblage rapide et économique.
- En dimensionnant avec précision le moule et en colorant le matériau, on supprime les opérations de finition.
- Les polymères résistent à la corrosion et ont des coefficients de frottement faibles.

II.2.4 Composites

Ces matériaux combinent les propriétés intéressantes des autres familles sans en avoir les inconvénients. Ils sont légers, rigides et résistants, et peuvent être tenaces. La majorité des composites disponibles aujourd'hui sont à matrice polymère (en général époxyde ou polyester), renforcée de fibres de verre, carbone ou Kevlar. Ils ne peuvent être utilisés au-dessus de 250 °C à cause du ramollissement de la matrice polymère, mais leurs performances à température ambiante sont exceptionnelles. Les pièces en composites coûtent cher et sont difficiles à mettre en forme et à assembler. C'est pourquoi, malgré leurs propriétés intéressantes, le concepteur ne les utilisera que si le surcroît de performance justifie le surcoût.

II.2.5 Conclusion

Cette classification a le mérite de regrouper ensemble des matériaux qui possèdent des points communs au niveau des propriétés, des procédés et des domaines d'utilisation. Toutefois, elle présente des risques et particulièrement ceux de la spécialisation (le métallurgiste qui ignore tout des polymères) et des réflexes conservateurs ("nous utiliserons l'acier car nous l'avons toujours utilisé"). Dans les chapitres suivants, nous étudierons les propriétés techniques des matériaux d'un autre

point de vue, en comparant ces propriétés de façon transversale. Cette démarche est le premier pas pour développer la liberté de pensée utile au concepteur.

II.3 Définitions des propriétés des matériaux

On peut considérer les matériaux comme possédant chacun un jeu de caractéristiques : leurs propriétés. Le concepteur ne recherche pas un matériau en tant que tel, mais une combinaison de caractéristiques, un profil de propriétés. Le nom du matériau n'est qu'une façon d'identifier un profil de propriétés particulier.

Les propriétés standard : densité, modules, résistance, ténacité, conductivité thermique, etc. (Tableau II.1), sont définies dans cette partie.

Table II.1 – Propriétés des matériaux intervenant en conception et leurs unités SI.

Type	Propriété	Symbole	Unité
Général	Coût	C_m	\$/kg
	Densité	ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Mécanique	Modules d'élasticité (Young, cisaillement, compressibilité)	E, G, K	GPa
	Résistance mécanique	σ_f	MPa
	Énergie de rupture	G_c	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$
	Ténacité	K_c	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
	Capacité d'amortissement	η	-
	Limite d'endurance	σ_e	MPa
	Thermique	Conductivité thermique	λ
Diffusivité thermique		a	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique		C_p	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Température de fusion		T_f ou T_m	K
Température de transition vitreuse		T_g	K
Coefficient de dilatation thermique		α	K^{-1}
Résistance au choc thermique		ΔT	K
Résistance au fluage		-	-
Usure, corrosion		Coefficient d'usure d'Archard	k_A
	Vitesse de corrosion	K	mm/an
	Constante de vitesse parabolique d'oxydation	k_p	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

II.3.1 Propriétés physiques et mécaniques

II.3.1.1 Densité

La densité ρ (en kg.m^{-3}) est égale au rapport de la masse par le volume. Elle est mesurée par la méthode qu'utilisait déjà Archimède, en pesant dans l'air et dans un fluide de densité connue.

II.3.1.2 Modules d'élasticité

Ils sont définis (en GPa ou GN.m^{-2}) comme la pente de la partie élastique linéaire de la courbe contrainte-déformation (Figure II.1) :

- le module d'Young E décrit le comportement en traction et en compression,
- le module de cisaillement C celui en cisaillement,
- le module de compressibilité K décrit l'effet de la pression hydrostatique,
- le coefficient de Poisson ν (sans dimension) est égal à l'opposé du rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale, dans un essai de traction uniaxial.

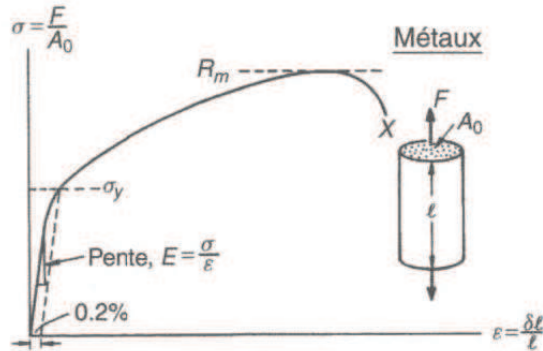


Figure II.1 – Courbe contrainte/déformation d'un métal.

En réalité, les valeurs calculées à partir des courbes de contrainte-déformation sont imprécises (inférieures d'un facteur deux ou plus), à cause des contributions à la déformation venant de l'anélasticité, du fluage ou autres facteurs. La mesure précise des modules se fait de façon dynamique, en excitant les vibrations naturelles d'une poutre ou d'un fil ou en mesurant la vitesse des ondes acoustiques dans le matériau.

Dans un matériau isotrope, les modules sont liés entre eux par les équations suivantes :

$$E = \frac{9G}{3 + GK}; \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}; \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (\text{II.1})$$

En général, on a

$$\nu \approx \frac{1}{3}; \quad G \approx \frac{E}{8}, \quad K \approx E \quad (\text{II.2})$$

et pour les élastomères

$$\nu \approx \frac{1}{2}; \quad G \approx \frac{E}{3}, \quad K \gg E \quad (\text{II.3})$$

Les encyclopédies et les bases de données donnent des listes de valeurs pour les quatre modules. Dans cet ouvrage, on s'intéressera au module d'Young E ; des valeurs approchées pour les autres modules peuvent être calculées à partir des équations (II.2 et II.3).

II.3.1.3 Résistance mécanique

La définition de cette grandeur σ_f (en MPa ou N.mm^{-2}) nécessite de faire la distinction entre les familles de matériaux.

a) Métaux

Pour les métaux, on l'assimile à la limite d'élasticité conventionnelle $R_{0.2}$ (Figure II.1), c'est-à-dire la contrainte correspondant à un allongement permanent de 0.2%. C'est la contrainte à laquelle les dislocations commencent à parcourir des grandes distances, et elle est identique en traction et en compression.

b) Polymères

Pour les polymères, on l'assimile à la limite d'élasticité apparente, contrainte à laquelle la courbe contrainte-déformation devient clairement non linéaire (typiquement 1 % de déformation, voir figure II.2). Ce phénomène peut être dû au glissement irréversible de chaînes moléculaires ou à la micro-fissuration, c'est-à-dire l'apparition de zones de faible densité semblables à des craquelures, qui diffusent la lumière, faisant paraître le polymère blanc. Les polymères sont un peu plus résistants (de 20 % environ) en compression qu'en traction.

c) Céramiques et verres

La résistance, pour les céramiques et les verres, dépend fortement du mode de chargement (Figure II.3). La résistance en traction R_m , est bien moins importante que celle en compression R_{mc} , et on a typiquement :

$$R_{mc} = (10 \text{ à } 15) \times R_m \quad (\text{II.4})$$

Pour les matériaux difficiles à maintenir par serrage (comme les céramiques), la mesure de la résistance peut être faite en flexion. Le module de rupture (en MPa ou N.mm^{-2}) est la contrainte de surface maximale dans une poutre en flexion au moment de la rupture (Figure II.4). On pourrait s'attendre à ce que cette valeur soit exactement la même que la résistance mesurée en traction, mais pour les céramiques, elle est supérieure (d'un facteur 1.3 environ). En effet, le volume subissant la contrainte est petit et la probabilité de présence d'un défaut de grande taille est faible, alors qu'en traction, tous les défauts sont soumis à cette contrainte maximale.

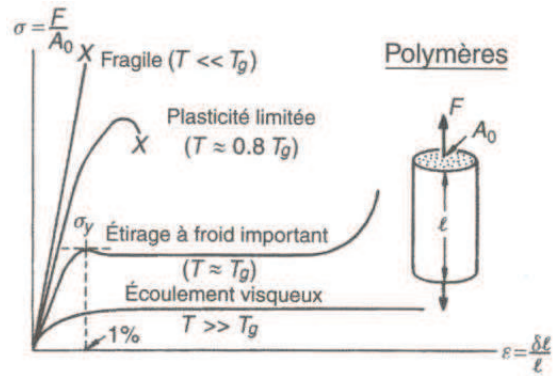


Figure II.2 – Courbes contrainte-déformation d'un polymère, en dessous de sa température de transition vitreuse T_g , à cette température et au-dessus.

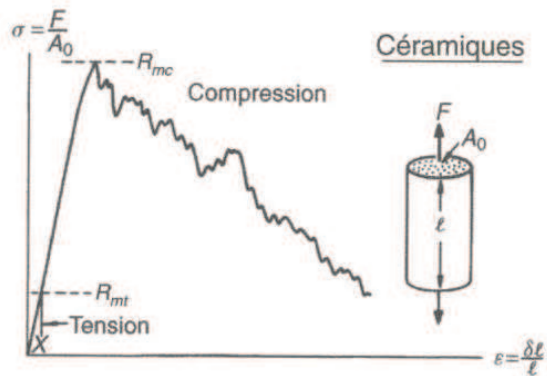


Figure II.3 – Courbes contrainte-déformation d'une céramique, en traction et en compression.

d) Composites

Pour définir la résistance d'un matériau composite, le mieux est de prendre la contrainte correspondant à une certaine déformation permanente. On choisit parfois 0.5 %. Les composites contenant des fibres (y compris les composites naturels comme le bois) sont un peu moins résistants en compression qu'en traction parce que les fibres ont tendance à flamber. Dans la suite de l'ouvrage, on prendra comme résistance pour les composites celle en traction.

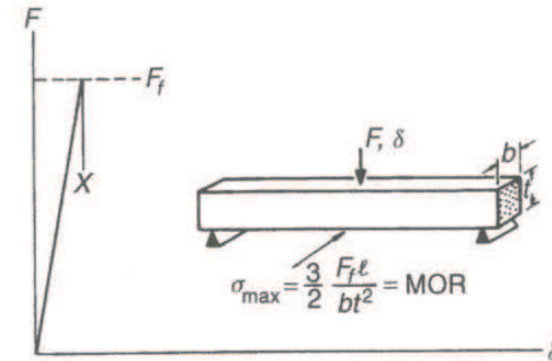


Figure II.4 – Module de rupture en flexion.

e) Résistance sous contrainte multiaxiale

La résistance varie donc selon la famille de matériaux et le mode de chargement. D'autres modes sont possibles, comme par exemple le cisaillement. Le comportement sous contrainte multiaxiale est relié à celui en traction par une fonction de plasticité. Pour les métaux, cette fonction est bien décrite par le critère de Von Mises :

$$2\sigma_f^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \tag{II.5}$$

où σ_1, σ_2 et σ_3 sont les contraintes principales (positives en traction). Par convention, σ_1 représente la contrainte la plus élevée et σ_3 la plus faible. Pour les polymères, ce critère est modifié pour tenir compte de l'effet de la pression :

$$2\sigma_f^2 \left(1 + \frac{\beta p}{K}\right)^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \tag{II.6}$$

où K est le module de compressibilité du polymère, β est un coefficient numérique (≈ 2) caractérisant la dépendance en pression de la force d'écoulement et p la pression définie par :

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{II.7}$$

Pour les céramiques, on utilise une loi d'écoulement de Coulomb :

$$\sigma_1 - B\sigma_3 = C \tag{II.8}$$

où B et C sont des constantes.

II.3.1.4 Résistance à la traction

C'est la contrainte nominale R_m (en MPa) à laquelle une éprouvette cylindrique du matériau, chargée en traction, se casse (Figure II.1). Pour les matériaux fragiles

(céramiques, verres et polymères non ductiles), c'est la résistance en traction vue précédemment. Pour les métaux, les polymères ductiles et la plupart des composites, elle est supérieure à la limite d'élasticité d'un facteur compris entre 1.1 et 3, en raison de l'écroutissage ou, dans le cas des composites, du renforcement par transfert de charge.

II.3.1.5 Energie élastique

Notée R (en $J.m^{-3}$), elle mesure l'énergie élastique maximale qui peut être stockée par le matériau et restituée une fois la charge supprimée. Elle correspond à l'aire située sous la partie élastique de la courbe contrainte-déformation :

$$R = \frac{1}{2} \sigma_f \epsilon_f = \frac{\sigma_f^2}{2E} \tag{II.9}$$

où σ_f est la limite d'élasticité, ϵ_f la déformation correspondante et E le module d'Young. Les matériaux ayant une énergie élastique importante font de bons ressorts.

II.3.1.6 Dureté

La dureté H d'un matériau (en MPa) est une estimation grossière de sa résistance. On la mesure en appuyant une pointe diamant ou une bille d'acier trempé sur la surface du matériau. La dureté est définie comme le rapport de la force appliquée par la surface projetée du poinçon. On peut la relier à la limite d'élasticité ainsi :

$$H \approx 3\sigma_f \tag{II.10}$$

On exprime souvent la dureté avec d'autres unités, la plus courante étant l'échelle de dureté Vickers HV (en $kg.mm^{-2}$), reliée à la précédente par :

$$H \approx 10HV \tag{II.11}$$

II.3.1.7 Ténacité

L'énergie de rupture G_c (en $kJ.m^{-2}$) et la ténacité K_c (en $MPa.m^{-\frac{1}{2}}$) expriment la résistance du matériau à la propagation d'une fissure. On mesure la ténacité en chargeant une éprouvette dans laquelle on a fait une fissure de longueur $2c$ (Figure II.5) et en enregistrant la contrainte σ_c pour laquelle la fissure se propage, et on a les relations suivantes :

$$KI = Y\sigma_c\sqrt{\pi c} \tag{II.12}$$

et pour l'énergie de rupture :

$$G_c = \frac{K_c^2}{E(1+\nu)} \tag{II.13}$$

où Y est un facteur de correction géométrique proche de l'unité, qui dépend des caractéristiques de l'éprouvette. Mesurées ainsi, K_c et G_c sont des valeurs bien définies pour les matériaux fragiles. Pour les matériaux ductiles, une zone plastique apparaît en tête de fissure, ce qui crée des conditions nouvelles pour la propagation de celles-ci, qui nécessite une modélisation plus évoluée. Des valeurs existent néanmoins, qui sont une bonne façon de classer les matériaux.

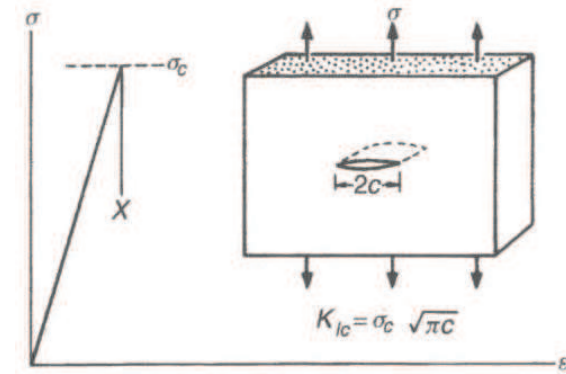


Figure II.5 – Essai de ténacité.

II.3.1.8 Capacité d'amortissement

Cette quantité sans dimension exprime la facilité qu'a un matériau à dissiper l'énergie vibratoire (Figure II.6). Un matériau chargé élastiquement avec une contrainte σ_1 et une déformation ϵ_1 emmagasine une énergie par unité de volume :

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon \tag{II.14}$$

En un cycle de chargement-déchargement, il dissipe une énergie :

$$\Delta U = \int \sigma d\epsilon \tag{II.15}$$

La capacité d'amortissement est η

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U} \tag{II.16}$$

La valeur de ce nombre dépend de la fréquence du cycle. Il existe d'autres expressions de l'amortissement, comme la capacité d'amortissement spécifique $D = \Delta U/U$, le décrement logarithmique Δ (logarithme du rapport entre les amplitudes successives des vibrations naturelles), le déphasage δ entre la contrainte et la déformation, ou encore le facteur de résonance Q . Si l'amortissement est faible ($\eta < 0.01$), ces expressions sont reliées entre elles :

$$\eta = \frac{D}{2\pi} = \frac{\Delta}{\pi} = \tan \delta = \frac{1}{Q} \tag{II.17}$$

mais dès que l'amortissement devient important, il n'y a plus équivalence.

II.3.1.9 Fatigue

Un chargement cyclique ne fait pas que dissiper de l'énergie, mais peut aussi provoquer la germination et la croissance d'une fissure, menant à une rupture par

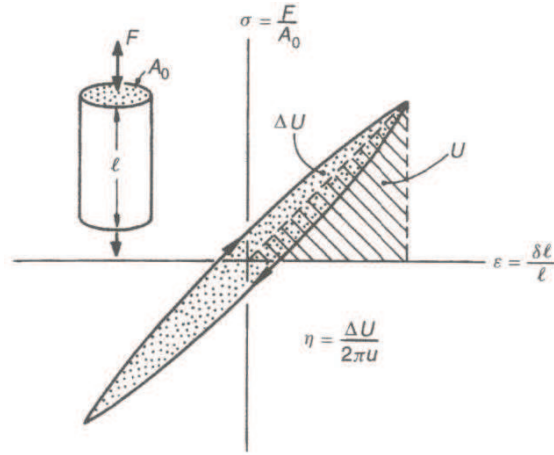


Figure II.6 – Energie élastique et capacité d’amortissement.

fatigue. La plupart des matériaux possède une limite d’endurance, qui est l’amplitude de contrainte en deçà de laquelle la rupture ne se produit pas, ou alors seulement après un très grand nombre de cycles ($> 10^7$). Cette notion s’exprime par un nombre sans dimension, le rapport de fatigue f , qui est égal au rapport entre la limite d’endurance σ_D et la limite d’élasticité σ_f .

$$f = \frac{\sigma_D}{\sigma_f} \tag{II.18}$$

II.3.2 Propriétés thermiques

II.3.2.1 Conductivité thermique

La vitesse à laquelle la chaleur se propage en régime permanent à travers un solide s’exprime par sa conductivité thermique λ (en $W.K^{-1}.m^{-1}$). La figure II.7 montre la façon de mesurer cette grandeur, en enregistrant le flux de chaleur q (en $W.m^{-2}$) s’écoulant entre deux surfaces à des températures respectives T_1 et T_2 , séparées par une distance X . La loi de Fourier donne :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dX} = \frac{T_1 - T_2}{X} \tag{II.19}$$

La mesure n’est pas aisée en pratique (surtout pour les matériaux à faible conductivité), mais on trouve en général aujourd’hui des données fiables.

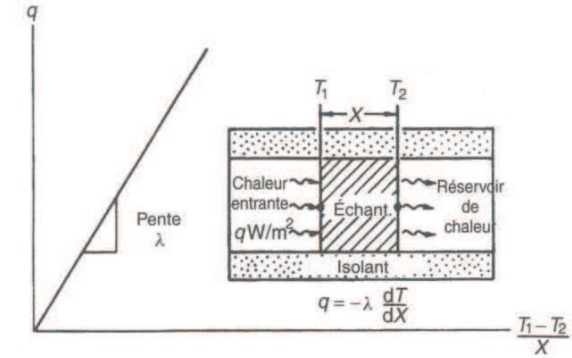


Figure II.7 – Mesure de la conductivité thermique.

II.3.2.2 Diffusivité thermique

En régime transitoire, le flux de chaleur dépend de la diffusivité thermique a ($m^2.s^{-1}$) définie par :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \tag{II.20}$$

où ρ est la densité et c_p la chaleur spécifique à pression constante ($J.K^{-1}.kg^{-1}$). Il est possible de mesurer directement la diffusivité thermique en mesurant la baisse de température qui s’opère quand on éteint la source de chaleur appliquée au matériau. On peut aussi l’obtenir à partir de λ , en utilisant l’équation précédente, mais cela nécessite de posséder des valeurs pour c_p (qui est quasiment identique pour les solides à c_v , chaleur spécifique à volume constant), mesurées par calorimétrie.

II.3.2.3 Températures caractéristiques

La calorimétrie peut également être utilisée pour connaître la température de fusion T_f et la température de transition vitreuse T_g (en K). Cette dernière est une propriété des matériaux non cristallins qui ne possèdent pas de point de fusion bien défini, et caractérise la transition entre le solide et le liquide visqueux.

Il est utile de définir deux autres températures, la température de service maximale T_{max} et la température de ramollissement T_s (en K). La première correspond à la température maximale à laquelle un matériau peut être utilisé sans subir d’oxydation, de modifications chimiques ou de fluage excessif. La deuxième est la température à laquelle le matériau peut s’écouler facilement pour permettre sa mise en forme.

II.3.2.4 Coefficient de dilatation

La plupart des matériaux se dilatent quand ils sont chauffés (Figure II.8). La déformation thermique par degré de température s’exprime par le coefficient de dilatation thermique α (en K^{-1}). Si le matériau est isotrope thermiquement, la

dilatation volumique par degré sera 3α ; s'il est anisotrope, il faudra définir d'autres coefficients et la dilatation volumique sera égale à la somme des déformations thermiques principales.

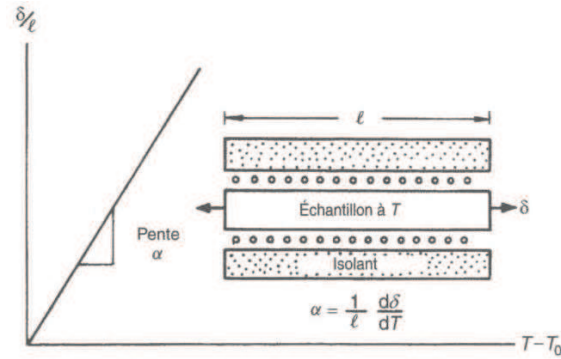


Figure II.8 – Coefficient de dilatation thermique.

II.3.2.5 Fluage

La résistance au choc thermique (en K) est l'écart maximum de température que peut subir un matériau lors d'une trempe sans être endommagé. Cette valeur, ainsi que la résistance au fluage, sont des données importantes quand on conçoit pour les hautes températures. Le fluage est le phénomène de déformation lente et dépendant du temps qui prend place lorsque les matériaux sont chargés à une température supérieure à $T_f/3$ ou $2T_g/3$ (Figure II.9). Il est caractérisé par un certain nombre de constantes : un exposant de fluage n (sans dimension), une énergie d'activation Q (en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), un facteur cinétique $\dot{\epsilon}_0$ (en s^{-1}) et une contrainte de référence σ_0 (en MPa). La vitesse de fluage à la température T sous une contrainte σ est :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \tag{II.21}$$

où R est la constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.

II.3.3 Usure, oxydation et corrosion

Ces phénomènes sont difficiles à quantifier, en partie parce qu'ils concernent la surface et non le volume, et également parce qu'ils font intervenir deux matériaux et non plus un seul. Lors du glissement d'un solide (Figure II.10), le volume de matière perdu sur une surface par unité de longueur parcourue s'appelle l'usure volumétrique W . La résistance à l'usure de la surface est caractérisée par le coefficient d'usure d'Archard k_A (en $\text{m}\cdot\text{MN}^{-1}$) définie par :

$$\frac{W}{A} = k_{AP} \tag{II.22}$$

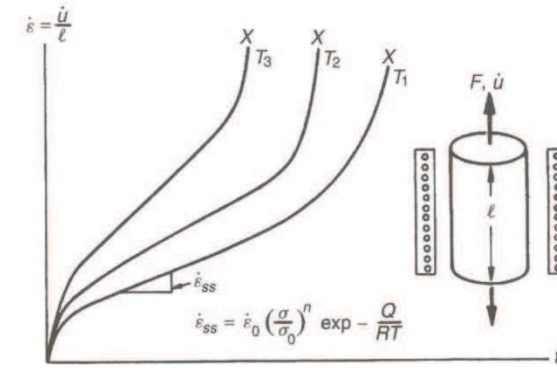


Figure II.9 – Vitesse de fluage à différentes températures.

où A est l'aire de la surface et p la pression entre les deux corps. Il existe des données sur k_A , qui doivent être interprétées comme une propriété du couple de glissement et pas seulement d'un des deux matériaux.

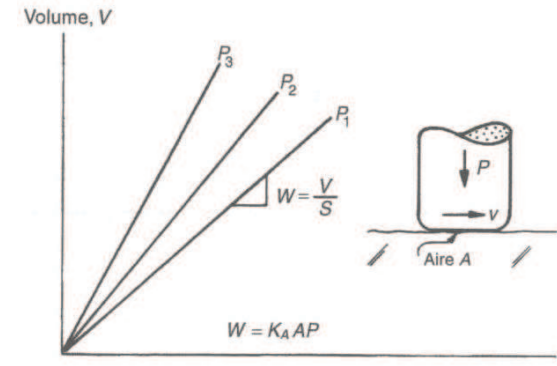


Figure II.10 – Usure volumétrique pour différentes pressions.

La corrosion sèche correspond à la réaction chimique qui intervient entre la surface d'un solide et un gaz (Figure II.11). Typiquement, un métal M réagit avec l'oxygène O_2 pour former une couche d'oxyde MO_2 en surface :



Si l'oxyde est protecteur, formant une couche continue sans fissures (épaisseur x), la réaction se ralentit avec le temps :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_p}{x} \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right) \tag{II.24}$$

soit, en intégrant :

$$x^2 = k_p \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\text{II.25})$$

ou k_p est la constante de vitesse parabolique d'oxydation ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) et Q une énergie d'activation ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$).

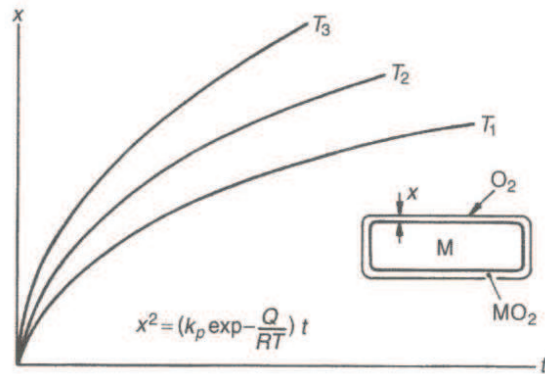


Figure II.11 – Courbes de corrosion sèche pour différentes températures.

La corrosion aqueuse (dans l'eau douce ou salée, les milieux acides ou alcalins) est beaucoup plus compliquée et ne peut être exprimée par des équations de vitesse avec des constantes. On estimera simplement la résistance à la corrosion par une échelle allant de A (très bonne) à E (très mauvaise).

II.4 Récapitulation

On considère six grandes familles de matériaux en conception mécanique : les métaux, les polymères, les élastomères, les céramiques, les verres et les composites qui combinent les propriétés de deux ou plus d'entre elles. Au sein d'une même famille, il existe des points communs :

- les céramiques sont dures, fragiles et résistent bien à la corrosion ;
- les métaux sont ductiles, résistants à la déformation et bons conducteurs électriques ;
- les polymères sont légers, faciles à mettre en forme et isolants électriques ;
- etc.

Cependant, en conception, il faut s'affranchir de cette classification et penser les matériaux en terme de profil de propriétés, que l'on comparera au profil idéal souhaité. On a donc défini dans ce chapitre les propriétés thermomécaniques importantes et le chapitre suivant expose une façon de les représenter afin de maximiser la liberté de choix.

Pour en savoir plus

Les ouvrages de références

Pour en savoir plus sur les changement de phase et diagramme de phase, consulter les ouvrages de référence :

- M. F. Ashby (2004) *Choix des Matériaux en Conception Mécanique*. Dunod (620.11 ASH)
- Y. Bréchet, M. F. Ashby & L. Salvo (2001) *Sélection des matériaux et des procédés de mise en IJuvre (Traité des Matériaux Volume 20)*. Presses polytechniques et universitaires romandes (620.11 TRA)

Vocabulaire anglais

Pour le vocabulaire anglais technique, il est conseillé de consulter le site du Grand Dictionnaire Terminologique (<http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>)

Exercices

Exercice 1 : Conception d'une barre

On veut concevoir une barre cylindrique de longueur donnée l capable de supporter une force de traction F sans casser, et qui doit être la plus légère possible. Ici, « maximiser la performance » signifie « minimiser la masse tout en supportant la charge F en toute sécurité ».

Question 1 A l'aide d'un tableau, explicitez la fonction, l'objectif et les contraintes liées à la conception de cette barre.

Question 2 Spécifiez les paramètres matériaux et géométrique associés à l'objectif et à chacune des contraintes.

Question 3 Ecrire l'équation représentant la quantité à minimiser ou à maximiser. En déduire l'indice de performance associé à l'objectif.

Exercice 2 : Ventilateurs à haut débit

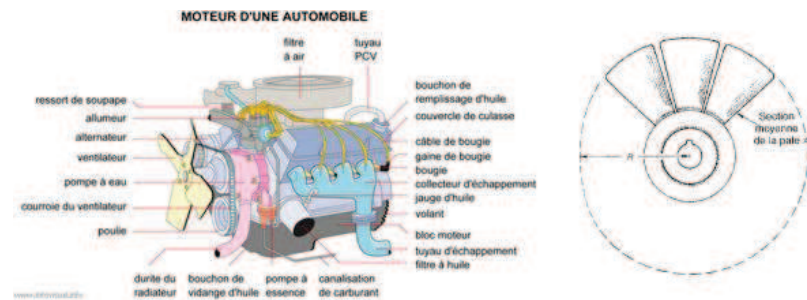


Figure II.12 – Schéma d'un moteur de voiture (à gauche). Schéma du ventilateur (à droite).

Les moteurs de voiture sont équipés de ventilateurs servant à refroidir le radiateur quand le mouvement de la voiture ne suffit pas (Figure II.12). Généralement, le ventilateur est entraîné par une courroie reliée à l'arbre de transmission principal du moteur. Les pales du ventilateur sont soumises à la fois à des forces centrifuges et à des moments de flexion causés par l'accélération brusque du moteur. Il est arrivé au moins une fois que la désintégration d'un ventilateur cause une perte humaine, lorsqu'un moteur qui ne voulait pas démarrer s'est soudain réveillé et emballé alors que quelqu'un se penchait au-dessus.

Le matériau sélectionnée doit être peu coûteux : tous les constructeurs qui ont survécu jusqu'à aujourd'hui n'ont eu de cesse de réduire les coûts de tous les composants. Toutefois, la sécurité passe en premier. Pour des raisons évidente de performance, on cherche à atteindre le débit d'aire le plus élevé sans que le ventilateur

ne se déformer ni se rompre. Le rayon R du ventilateur est imposé par la conception : vitesse d'écoulement de l'air, espace dans lequel le ventilateur doit rentrer.

Question 1 A l'aide d'un tableau, explicitez la fonction, l'objectif et les contraintes liées à la conception du ventilateur.

Question 2 Spécifiez les paramètres matériaux et géométrique associés à l'objectif et à chacune des contraintes.

Question 3 Ecrire l'équation représentant la quantité à minimiser ou à maximiser. En déduire l'indice de performance associé à l'objectif.

Exercice 3 : Réservoirs de pression sûrs

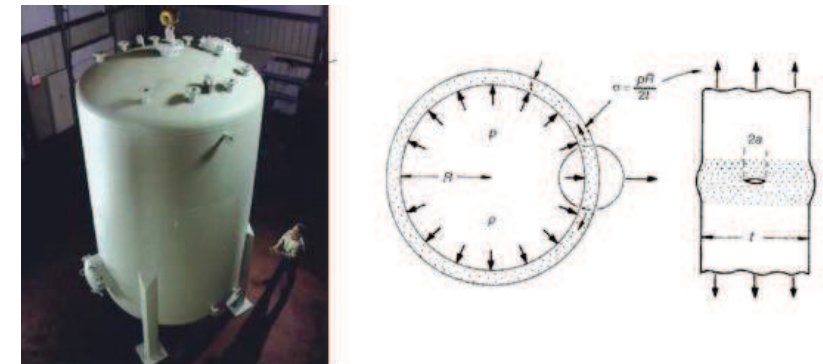


Figure II.13 – Photo d'un réservoir sous pression (à gauche). Schéma d'un réservoir sous pression contenant un défaut (à gauche).

Les réservoirs sous pression, du plus simple aérosol à la plus grande chaudière, sont conçus pour se déformer ou fuir avant de casser, pour des raisons de sécurité. Les détails de la méthode de conception sont différents selon les dispositifs :

- Les petits réservoirs sont généralement conçus pour autoriser la plasticité à une pression encore trop basse pour provoquer la propagation de fissures qui pourraient être présentes dans le réservoir (plasticité avant rupture). La distorsion provoquée par la plasticité est facile à détecter et la pression peut être libérée de façon sûre.
- Cela n'est pas possible avec les grands réservoirs sous pression. Dans ce cas, la sécurité consiste à s'assurer que la plus petite fissure susceptible de se propager de façon instable a une longueur supérieure à l'épaisseur de la paroi du réservoir (fuite avant rupture). La fuite est facilement détectable et libère la pression graduellement, donc en toute sécurité.

Question 1 A l'aide d'un tableau, explicitez la fonction, l'objectif et les contraintes liées à la conception des deux types de réservoirs.

Question 2 Spécifiez les paramètres matériaux et géométrique associés à l'objectif et à chacune des contraintes.

Question 3 Ecrire l'équation représentant la quantité à minimiser ou à maximiser pour chacun des cas. En déduire l'indice de performance associé.

Exercice 4 : Mur de stockage de chaleur

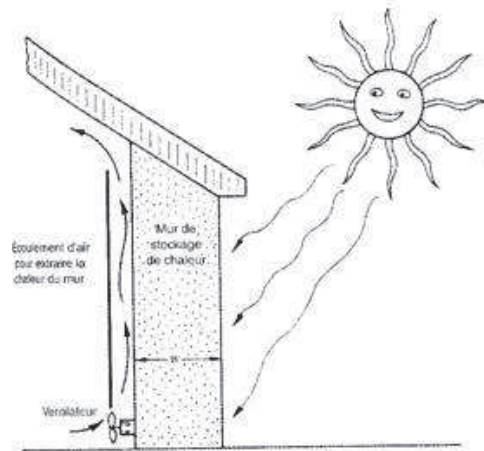


Figure II.14 – Schéma d'un mur de stockage de chaleur.

Il existe un certain nombre de façons de capter l'énergie solaire pour le chauffage individuel : panneaux solaires, échangeurs de chaleurs remplis de liquide et réservoirs de chaleur solides. Le système le plus simple est celui des murs de stockage de chaleur : un mur épais dont la surface extérieure est chauffée pendant la journée par exposition directe au soleil, et duquel la chaleur est extraite pendant la nuit en faisant passer de l'air sur sa surface intérieure (Figure II.14). Un élément essentiel pour un tel système est que la constante de temps de l'écoulement de chaleur soit d'environ 12 h. De cette façon, la surface interne commence à chauffer à peu près 12 h après que le soleil a commencé à chauffer la surface extérieure, restituant la nuit ce qu'il a pris pendant la journée. On supposera, pour des considérations architecturales, que l'épaisseur de mur doit être supérieure à 0.5 m.

Question 1 A l'aide d'un tableau, explicitez la fonction, l'objectif et les contraintes liées à la conception du mur de stockage.

Question 2 Spécifiez les paramètres matériaux et géométrique associés à l'objectif et à chacune des contraintes.

Question 3 Ecrire l'équation représentant la quantité à minimiser ou à maximiser. En déduire l'indice de performance associé.

Exercices

Exercice 1 : Ventilateurs à haut débit

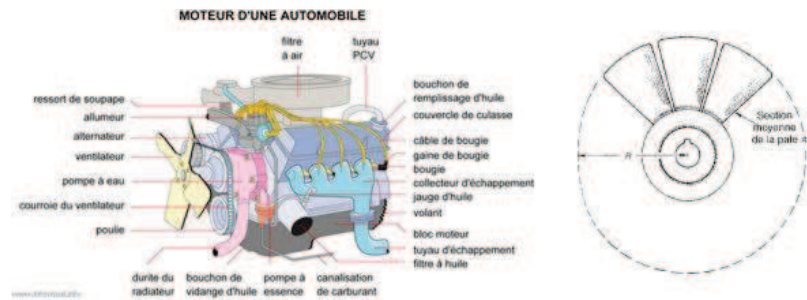


Figure III.30 – Schéma d'un moteur de voiture (à gauche). Schéma du ventilateur (à droite).

Les moteurs de voiture sont équipés de ventilateurs servant à refroidir le radiateur quand le mouvement de la voiture ne suffit pas (Figure III.30). Généralement, le ventilateur est entraîné par une courroie reliée à l'arbre de transmission principal du moteur. Les pales du ventilateur sont soumises à la fois à des forces centrifuges et à des moments de flexion causés par l'accélération brusque du moteur. Il est arrivé au moins une fois que la désintégration d'un ventilateur cause une perte humaine, lorsqu'un moteur qui ne voulait pas démarrer s'est soudain réveillé et emballé alors que quelqu'un se penchait au-dessus.

Le matériau sélectionné doit être peu coûteux : tous les constructeurs qui ont survécu jusqu'à aujourd'hui n'ont eu de cesse de réduire les coûts de tous les composants. Toutefois, la sécurité passe en premier. Pour des raisons évidente de performance, on cherche à atteindre le débit d'aire le plus élevé sans que le ventilateur ne se déformer ni se rompre. Le rayon R du ventilateur est imposé par la conception : vitesse d'écoulement de l'air, espace dans lequel le ventilateur doit rentrer.

Table III.6 – Spécifications pour un ventilateur.

Fonction	Ventilateur de refroidissement
Objectif	Vitesse angulaire maximale sans défaillance
Contraintes	(a) rayon R spécifié (b) peu coûteux et facile à mettre en forme

Question 1 A l'aide des cartes en annexe, proposez des matériaux potentiels pour le ventilateur pour un indice de performance de $M \approx 50$ kJ/kg

Question 2 Commentez les différents matériaux possibles en prenant en compte le coût et le procédé.

Exercice 2 : Réservoirs de pression sûrs

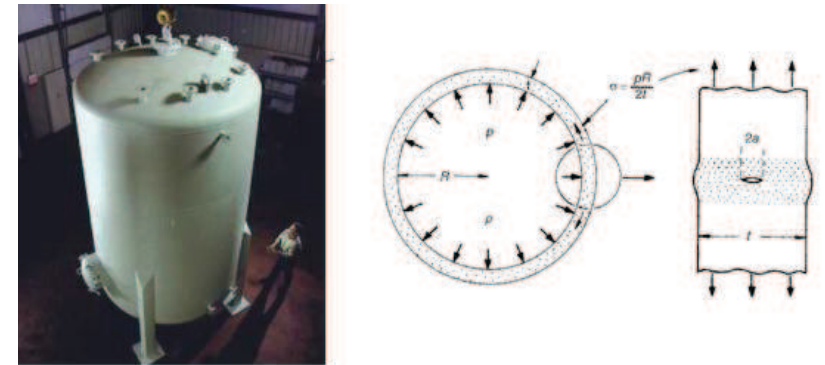


Figure III.31 – Photo d'un réservoir sous pression (à gauche). Schéma d'un réservoir sous pression contenant un défaut (à gauche).

Les réservoirs sous pression, du plus simple aérosol à la plus grande chaudière, sont conçus pour se déformer ou fuir avant de casser, pour des raisons de sécurité. Les détails de la méthode de conception sont différents selon les dispositifs :

- Les petits réservoirs sont généralement conçus pour autoriser la plasticité à une pression encore trop basse pour provoquer la propagation de fissures qui pourraient être présentes dans le réservoir (plasticité avant rupture). La distorsion provoquée par la plasticité est facile à détecter et la pression peut être libérée de façon sûre.
- Cela n'est pas possible avec les grands réservoirs sous pression. Dans ce cas, la sécurité consiste à s'assurer que la plus petite fissure susceptible de se propager de façon instable a une longueur supérieure à l'épaisseur de la paroi du réservoir (fuite avant rupture). La fuite est facilement détectable et libère la pression graduellement, donc en toute sécurité.

Table III.7 – Spécifications pour un petit réservoir

Fonction	Doit contenir une pression P
Objectif	Taille de fissure stable maxi
Contraintes	(a) Doit se déformer plastiquement avant qu'une fissure ne se propage de façon instable. (b) Limite élastique mini : 100 MPa

Question 1 A l'aide des cartes en annexe, proposez des matériaux potentiels pour les deux types de réservoirs. Dans le cas du petit réservoir, on prendra un indice de

Table III.8 – Spécifications pour un grand réservoir.

Fonction	Doit contenir une pression P
Objectif	Pression P maxi.
Contraintes	(a) Il faut pouvoir détecter une fissure visuellement avant sa propagation de façon instable. (b) Limite élastique mini : 100 MPa

performance $M \geq 0.6 \text{ m}^{1/2}$. Dans le cas du grand réservoir, on cherchera le matériau qui maximise l'indice de performance.

Question 2 Commentez les différents matériaux possibles dans les deux cas.

Exercice 3 : Mur de stockage de chaleur

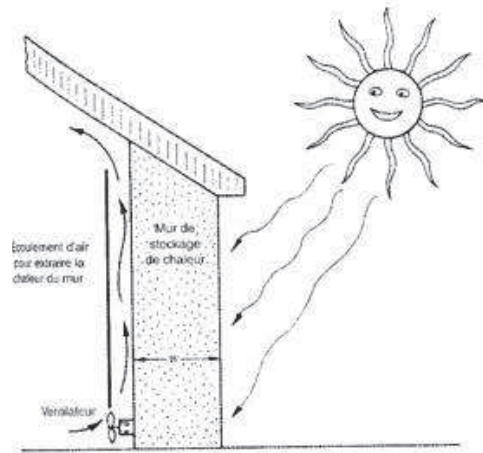


Figure III.32 – Schéma d'un mur de stockage de chaleur.

Il existe un certain nombre de façons de capter l'énergie solaire pour le chauffage individuel : panneaux solaires, échangeurs de chaleurs remplis de liquide et réservoirs de chaleur solides. Le système le plus simple est celui des murs de stockage de chaleur : un mur épais dont la surface extérieure est chauffée pendant la journée par exposition directe au soleil, et duquel la chaleur est extraite pendant la nuit en faisant passer de l'air sur sa surface intérieure (Figure III.32). Un élément essentiel pour un tel système est que la constante de temps de l'écoulement de chaleur soit d'environ 12 h. De cette façon, la surface interne commence à chauffer à peu près 12 h après que le soleil a commencé à chauffer la surface extérieure, restituant la nuit ce qu'il a pris pendant la journée. On supposera, pour des considérations architecturales, que l'épaisseur de mur doit être supérieure à 0,5 m.

Table III.9 – Spécifications pour le chauffage solaire passif.

Fonction	Moyen de stockage de chaleur
Objectif	Énergie thermique emmagasinée par unité de coût du matériau maximale
Contraintes	(a) temps de diffusion de la chaleur à travers le mur d'environ 12 h (b) épaisseur du mur inférieure ou égale à 0,5 m (c) température de fonctionnement adaptée, $T_{\max} > 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Question 1 A l'aide des cartes en annexe, proposez des matériaux potentiels pour le chauffage solaire passif tel que $M_1 = \frac{\lambda}{\alpha^{1/2}} > 10^3 \text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Question 2 Commentez les différents matériaux possibles au regard du coût et des disponibilités.

Exercice 4 : Miroirs de grands télescopes

Il existe dans le monde des grands télescopes optiques. Les plus récents utilisent des astuces complexes pour conserver leur précision quand ils balayent le ciel. Pour les télescopes de base, le réflecteur est un simple miroir rigide. Le plus grand de ces télescopes existants est celui du Mont Seinvodrike (Caucase), dont le miroir mesure 6 m de diamètre. Pour avoir une rigidité suffisante, le miroir (en verre) fait environ 1 m d'épaisseur et pèse 70 t.

Le coût global d'un grand télescope est, comme celui-ci, astronomique, environ 240 millions de dollars. Le miroir lui-même ne représente qu'environ 5 % du coût total, le reste étant le coût du mécanisme permettant de soutenir, de positionner et de déplacer le miroir. Ce mécanisme doit être suffisamment rigide pour pouvoir positionner le miroir par rapport au reste du système avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière. On pourrait croire, à première vue, que si l'on double le poids m du miroir, les sections de la structure de support devront être également doublées, de façon à maintenir les contraintes (donc les déformations et les déplacements) égales. Cependant, une structure plus lourde se déforme sous son propre poids. Dans la pratique, les sections évoluent en raison du carré de la masse m , et le coût également.

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, les miroirs étaient faits en métal (densité : $\approx 8 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Depuis, on utilise le verre (densité : $2.3 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$), dont la surface de devant est argentée, si bien qu'aucune des propriétés optiques du verre n'est utilisée. Le verre est choisi pour ses propriétés mécaniques uniquement : les 70 t de verre ne constituent qu'un support très élaboré pour une couche d'argent de 100 nm (environ 30 g).

Serait-il possible, en considérant les matériaux pour miroirs de façon radicalement différente, de suggérer des solutions pour la construction de télescopes plus légers et moins cher ?

En schématisant, un miroir est un disque circulaire de diamètre $2a$ et d'épaisseur moyenne t , soutenu à sa périphérie (Figure III.33). A l'horizontale, il se déforme sous son propre poids m ; à la verticale, il ne se déforme pas de façon significative. Cette distorsion (qui modifie la distance focale et introduit des aberrations dans le miroir)

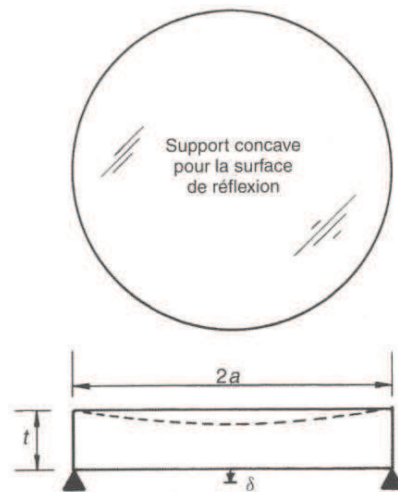


Figure III.33 – Miroir de grand télescope optique, modélisé par un disque soutenu à sa périphérie.

doit être suffisamment faible pour ne pas avoir de conséquence sur les performances. En pratique, cela veut dire que la déformation δ au centre du miroir doit être inférieure à la longueur d'onde de la lumière. Les autres spécifications sont une haute stabilité dimensionnelle (pas de fluage) et une faible dilatation thermique (Tableau III.10).

Table III.10 – Spécifications pour un miroir de télescope.

Fonction	Miroir de précision
Objectif	Poids minimal
Contraintes	(a) rayon a spécifié (b) ne doit pas se déformer de plus de δ sous son propre poids (c) stabilité dimensionnelle élevée : pas de fluage, pas de prise d'humidité, faible dilatation thermique

Question 1 Déterminer l'indice de performance pour le miroir de télescope. Calculez sa valeur pour le verre ($E = 69\,000$ MPa).

Question 2 A l'aide des cartes en annexe, proposez des matériaux potentiels pour remplacer le verre.

Question 3 Commentez les différents matériaux possibles au regard des autres contraintes.

Chapitre -IV-

Choix des matériaux et de la géométrie

Table des Matières

IV.1	Facteurs de forme	121
IV.1.1	Définitions	121
IV.1.2	Domaine élastique	122
IV.1.3	Résistance	125
IV.1.4	Chargement axial et flambage des colonnes	127
IV.2	Limites dues au matériau pour les facteurs de forme . . .	128
IV.2.1	Contraintes de fabrication	128
IV.2.2	Compétition entre les modes d'endommagement	128
IV.3	Indices de performance incluant la géométrie	128
IV.3.1	Traction axiale des barres	129
IV.3.2	Domaine élastique	129
IV.3.3	Résistance	130
IV.3.4	Géométries soumises à des limitations	131
IV.4	Facteur de forme microscopique ou microstructural	132
IV.4.1	Géométrie microscopique	132
IV.4.2	Facteurs de forme microscopiques	133
IV.5	Co-sélection matériau-géométrie	136
IV.5.1	Co-sélection par le calcul	136
IV.5.2	Co-sélection graphique utilisant les diagrammes de propriétés	137
IV.6	Récapitulation	139

Objectifs

–

Introduction Les sections géométriques sont plus performantes que les sections pleines pour supporter des charges en flexion, torsion et compression axiale. L'adjectif « géométrique » signifie que la section transversale est tubulaire, rectangulaire, en I, etc. Le terme « performant » sous-entend que, pour des conditions de charge données, la section utilise le moins de matériau et est donc aussi légère que possible. Les sections tubulaires, rectangulaires ou en I seront appelées « géométries simples ». Il est possible d'obtenir des résultats encore meilleurs avec des panneaux sandwich (où un revêtement supportant la charge recouvre un intérieur en mousse ou en nid d'abeille) et des structures.

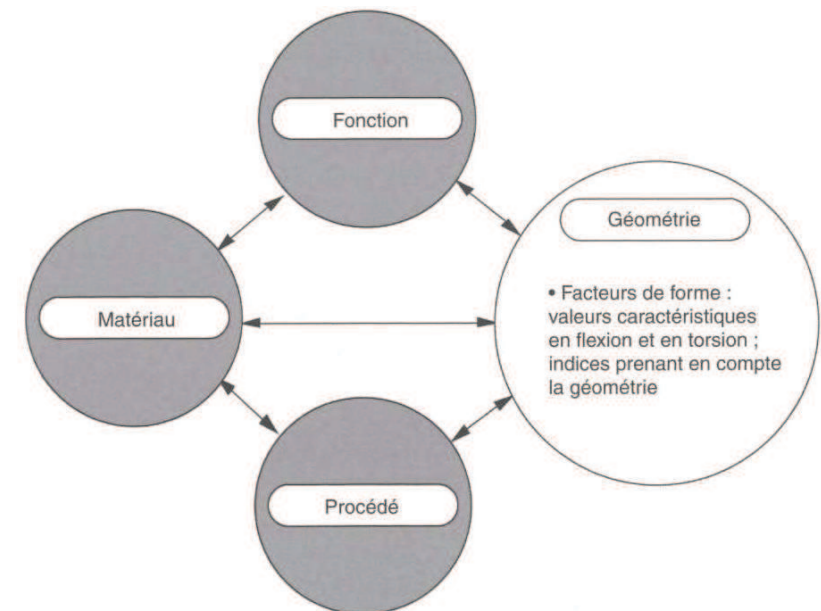


Figure IV.1 – La géométrie de section est importante pour certains modes de chargement.

Ce chapitre élargit le concept d'indice de façon à inclure la géométrie (Figure IV.1). Souvent ce n'est pas nécessaire, la géométrie n'intervient pas du tout ou alors comme une variable (c'est-à-dire que l'on comparait des matériaux avec la même géométrie). Mais quand deux matériaux sont disponibles avec des géométries de section différentes et que la géométrie est un paramètre de la conception (poutre en flexion, par exemple), le problème devient plus général : comment choisir parmi le grand nombre de matériaux et les géométries dans lesquelles ils sont disponibles (ou peuvent potentiellement être fabriqués), le couple qui maximise les performances ?

Exemple IV.1 *Considérons une bicyclette dont la fourche est chargée en flexion. Celle-ci peut être faite, mettons, en acier ou en bois (les premières bicyclettes étaient effectivement faites en bois).*

L'acier est disponible en tubes minces mais pas le bois, qui a généralement une section pleine. Une bicyclette en bois est sûrement plus légère et plus rigide qu'une en acier plein, mais est-elle meilleure qu'une faite en acier tubulaire? Est-ce que le magnésium avec une section en I ne serait pas encore meilleur? Et un polymère nervuré?

Pour répondre à ces questions et à d'autres, une procédure est explicitée dans ce chapitre. Elle implique la définition de facteurs de forme, qui sont de simples nombres caractérisant la performance des sections géométriques. Ils permettent de définir des indices de performance proches de ceux définis pour le choix des matériaux, mais incluant cette fois-ci la géométrie. Quand la géométrie est fixée, on retrouve exactement les indices classiques, mais quand elle est variable, les facteurs de forme apparaissent dans l'expression des indices (Tableaux IV.2 et IV.3).

Les idées développées dans ce chapitre sont un peu plus compliquées que celles du chapitre précédent, mais elles sont importantes car elles permettent de faire le lien entre le choix des matériaux et la conception des structures porteuses.

Table IV.1 – La géométrie de section est importante pour certains modes de chargement.

Section	$A(m^2)$	$I_{xx}(m^4)$	$K(m^4)$	$Z(m^3)$	$Q(m^3)$
	πr^2	$\frac{\pi}{4}r^4$	$\frac{\pi}{2}r^4$	$\frac{\pi}{4}r^3$	$\frac{\pi}{2}r^3$
	b^2	$\frac{b^4}{12}$	$0.14b^4$	$\frac{b^3}{6}$	$0.21b^3$
	πab	$\frac{\pi}{4}a^3b$	$\frac{\pi a^3b}{(a^2+b^2)}$	$\frac{\pi}{4}a^2b$	$\frac{\pi a^2b}{2}$ ($a < b$)

	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{b^3h}{3}\left(1-0.58\frac{b}{h}\right)$ ($h > b$)	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{b^2h^2}{3h+1.8b}$ ($h > b$)
	$\frac{\sqrt{3}}{4}a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{a^4\sqrt{3}}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	$\frac{a^3}{20}$
	$\pi(r_o^2 - r_i^2)$ $\approx 2\pi r t$	$\frac{\pi}{4}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^3 t$	$\frac{\pi}{2}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^3 t$	$\frac{\pi}{4r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^2 t$	$\frac{\pi}{2r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^2 t$
	$4bt$	$\frac{2}{3}b^3t$	$b^3t\left(1-\frac{t}{b}\right)^4$	$\frac{4}{3}b^2t$	$2b^2t\left(1-\frac{t}{b}\right)^2$
	$\pi(a+b)t$	$\frac{\pi}{4}a^3t\left(1+\frac{3b}{a}\right)$	$\frac{4\pi(ab)^{5/2}t}{(a^2+b^2)}$	$\frac{\pi a^2t}{4}\left(1+\frac{3b}{a}\right)$	$2\pi t(a^3b)^{1/2}$ ($b > a$)
	$b(h_o - h_i)$ $\approx 2bt$	$\frac{b}{12}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx \frac{1}{2}bth_o^2$	—	$\frac{b}{6h_o}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx bth_o$	—
	$2t(h+b)$	$\frac{1}{6}h^3t\left(1+\frac{3b}{h}\right)$	$\frac{2tb^2h^2}{h+b}$ \square	$\frac{h^2t}{3}\left(1+\frac{3b}{h}\right)$	$2tbh$ \square $\frac{2}{3}bt^2\left(1+\frac{4h}{b}\right)$
	$2t(h+b)$	$\frac{t}{6}(h^3+4bt^2)$	$\frac{2}{3}bt^3\left(1+\frac{4h}{b}\right)$ \square	$\frac{t^3}{3}(8b+h)$ \square	$\frac{t^2}{3}(8b+h)$ \square $\frac{2}{3}ht^2\left(1+\frac{4b}{h}\right)$
	$t\lambda\left(1+\frac{\pi^2d^2}{4\lambda^2}\right)$	$\frac{t\lambda d^2}{8}$	—	$\frac{t\lambda d}{4}$	—

Table IV.2 – Valeurs des quatre facteurs de forme.









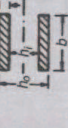
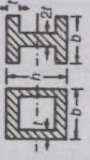
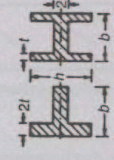

Géométrie de section	Rigidité		Résistance	
	ϕ_f^R	ϕ_f^R	ϕ_f^R	ϕ_f^R
	1	1	1	1
	$\frac{\pi}{3} = 1.05$	0.88	$\frac{2}{3}\sqrt{\pi} = 1.18$	0.74
	$\frac{a}{b}$	$\frac{2ab}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}}$	$\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}}$ (a < b)
	$\frac{\pi h}{3b}$	$\frac{2\pi b}{3h} \left(1 - 0.58 \frac{h}{b}\right)$ (h > b)	$\frac{2}{3}\sqrt{\pi} \left(\frac{h}{b}\right)^{1/2}$	$\frac{2}{3}\sqrt{\pi} \left(\frac{b/h}{1 + 0.6b/h}\right)^{1/2}$ (h > b)
	$\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} = 1.21$	$\frac{2\pi}{5\sqrt{3}} = 0.73$	0.77	0.62
	$\frac{r}{t}$	$\frac{r}{t}$	$\left(\frac{2r}{t}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{2r}{t}\right)^{1/2}$
	$\frac{\pi b}{6t}$	$\frac{\pi b}{8t} \left(1 - \frac{t}{b}\right)^4$	$\frac{2}{3}\sqrt{\pi} \left(\frac{b}{t}\right)^{1/2}$	$\frac{\sqrt{\pi} (b/t)^{1/2}}{2} \left(1 - \frac{t}{b}\right)^2$

Table IV.3 – Valeurs des quatre facteurs de forme (suite).

Géométrie de section	Rigidité		Résistance	
	ϕ_f^R	ϕ_f^R	ϕ_f^R	ϕ_f^R
	$\frac{a(1+3b/a)}{t(1+b/a)^2}$	$\frac{8(ab)^{3/2}}{t(a^2+b^2)(a+b)^2}$	$\left(\frac{a}{t}\right)^{1/2} \frac{(1+3b/a)}{(1+b/a)^{3/2}}$	$\frac{4a^{1/2}}{t^{1/2}(1+a/b)^{3/2}}$
	$\frac{\pi h^2}{2bt}$	—	$\sqrt{2\pi} \frac{h}{(bt)^{1/2}}$	—
	$\frac{\pi h(1+3b/h)}{6t(1+b/h)^2}$	$\frac{\pi b^2 h^2}{t(h+b)^3}$ $\frac{\pi t(1+4h/b)}{3b(1+h/b)^2}$	$\frac{\sqrt{2\pi} (h/t)^{1/2} (1+3b/h)}{3} \frac{(1+4h/b)^{1/2}}{(1+b/h)^{3/2}}$	$\frac{\sqrt{2\pi h}}{(bt)^{1/2} (1+h/b)^{3/2}}$ $\frac{\sqrt{2\pi} t^{1/2} (1+4h/b)}{3 (b/h)^{3/2} (1+h/b)^{3/2}}$
	$\frac{\pi h(1+4b^2/h^3)}{6t(1+b/h)^2}$	$\frac{\pi t(1+8b/h)}{6h(1+b/h)^2}$ $\frac{\pi t(1+4b/h)}{3h(1+b/h)^2}$	$\frac{\sqrt{\pi} (h/t)^{1/2} (1+4b^2/h^3)}{2} \frac{(1+4b/h)^{1/2}}{(1+b/h)^{3/2}}$	$\frac{\pi t^{1/2} (1+8b/h)}{(18h)^{3/2} (1+b/h)^{3/2}}$ $\frac{\sqrt{2\pi} t^{1/2} (1+4b/h)}{3 (h/h)^{3/2} (1+b/h)^{3/2}}$
	$\frac{\pi d^2}{2t\lambda}$	—	$\sqrt{\pi} \frac{d}{(t\lambda)^{1/2}}$	—

IV.1 Facteurs de forme

IV.1.1 Définitions

Comme on l'a dit au chapitre précédent, un composant est en général chargé soit axialement, soit en flexion, soit en torsion :

- les barres sont chargées en traction,
- les poutres en flexion,
- les arbres avec un couple de torsion,
- les colonnes en compression axiale.

La figure IV.2 représente ces modes de chargement, appliqués à des géométries qui leur résistent bien. L'idée sous-jacente est que le meilleur couple matériau-géométrie dépend du mode de chargement. Dans ce qui suit, les différents modes seront traités séparément.

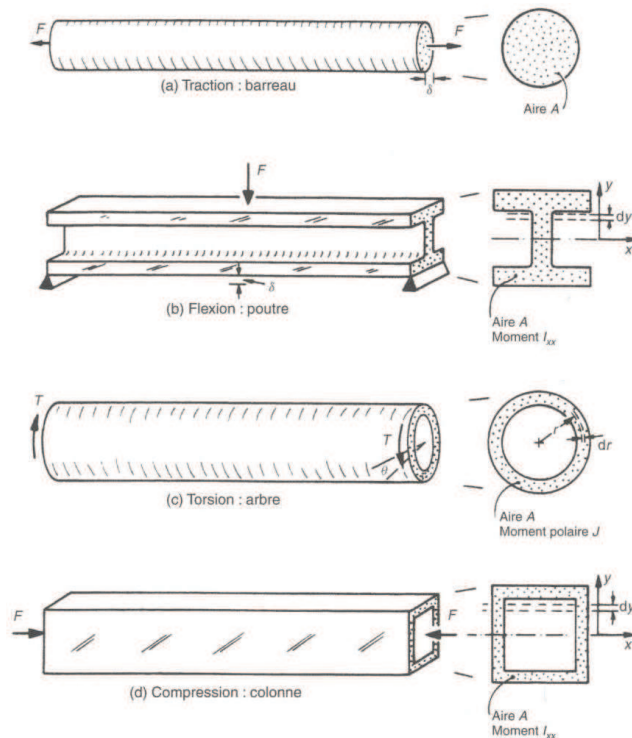


Figure IV.2 – Modes de chargement usuels : (a) traction axiale; (b) flexion; (c) torsion; (d) compression axiale (pouvant induire du flambage).

En traction axiale, l'aire de la section transversale est importante, mais pas sa forme. Toutes les sections de même aire pourront supporter la même charge. Ce n'est pas le cas en flexion : les poutres rectangulaires creuses ou celles en I sont meilleures que les sections pleines de même aire. Il existe aussi des géométries meilleures que d'autres en torsion : les tubes circulaires, par exemple, sont meilleurs que les sections pleines ou celles en I.

Pour rendre compte de cela, on définit un facteur de forme ϕ qui représente, pour chaque mode de chargement, la performance de la section géométrique. Il y en a quatre, qui sont définis ci-dessous.

Un matériau peut être considéré comme possédant des propriétés, mais pas une forme; un composant ou une structure est un matériau mis en forme (Figure IV.3). Le facteur de forme est un nombre sans dimension qui caractérise la performance d'une géométrie, sans considération de taille, pour un mode de chargement donné.

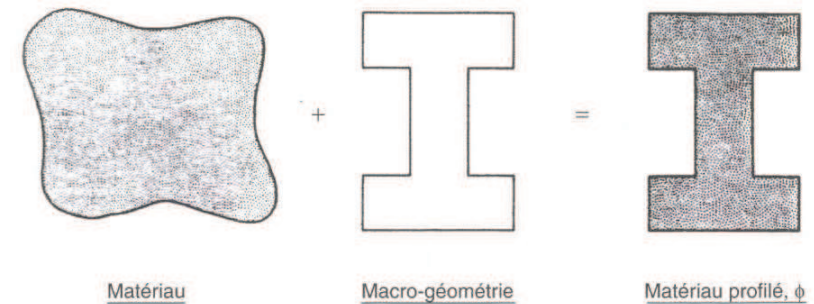


Figure IV.3 – La performance mécanique est obtenue en combinant le matériau avec une forme macroscopique. La forme est caractérisée par un facteur de forme ϕ sans dimension.

Il existe donc un facteur de forme ϕ_F^e , pour la flexion élastique des poutres et un autre ϕ_T^e , pour la torsion élastique des arbres (l'exposant e signifie « élastique »). Ces facteurs sont utiles dans le cas de la conception basée sur la rigidité.

Si celle-ci est basée sur la résistance (apparition de la plasticité ou de la rupture), il faut deux autres facteurs, ϕ_F^f et ϕ_T^f (l'exposant f signifie *failure* en anglais, c'est-à-dire la défaillance du matériau). Les quatre facteurs sont définis de telle façon qu'ils valent 1 pour un barreau circulaire plein.

IV.1.2 Domaine élastique

IV.1.2.1 Traction élastique

L'allongement ou le raccourcissement élastique d'une barre sous une charge donnée (Figure IV.2a) dépend de l'aire de sa section, mais pas de sa géométrie. Il n'y a donc pas besoin de facteur de forme.

IV.1.2.2 Flexion élastique

Si, dans une poutre de longueur l (Figure IV.2b), faite dans un matériau ayant un module d'Young E , le cisaillement est négligeable, alors la rigidité en flexion est :

$$S_F = \frac{C_1 EI}{l^3} \quad (\text{IV.1})$$

avec C_1 , une constante qui dépend des détails du chargement (voir annexe A, section A3). La géométrie intervient dans le moment d'inertie I de la surface autour de l'axe de flexion (axe des x) :

$$I = \int_{\text{section}} y^2 dA \quad (\text{IV.2})$$

avec y , mesuré perpendiculairement à l'axe de flexion et dA , l'élément différentiel de surface en y . Les valeurs de I et de l'aire A pour les sections usuelles sont listées au tableau IV.1. Pour les géométries complexes, ce sont des valeurs approchées, mais qui suffisent amplement pour les besoins présents.

Le premier facteur de forme, celui de la flexion élastique, est défini comme le rapport entre la rigidité S_F de la poutre avec géométrie et la rigidité S_F^0 , d'une poutre de section circulaire pleine (de moment d'inertie I^0) ayant la même aire de section transversale A , et donc la même masse par unité de longueur. D'après l'équation (IV.1) on a :

$$\phi_F^e = \frac{S_F}{S_F^0} = \frac{I}{I^0} \quad (\text{IV.3})$$

Le moment I^0 d'une section circulaire pleine d'aire A est (tableau 7.1) :

$$I^0 = \pi r^4 = \frac{A^2}{4\pi} \quad (\text{IV.4})$$

d'où :

$$\phi_F^e = \frac{4\pi I}{A^2} \quad (\text{IV.5})$$

On remarque que ce nombre est sans dimension : I a la dimension de $[L]^4$, de même que A^2 . Il dépend uniquement de la géométrie. Les petites et les grandes poutres auront le même facteur de forme si la géométrie de leurs sections est identique. C'est ce que montre la figure IV.4 : les trois sections rectangulaires en bois ont le même facteur de forme ($\phi_F^e = 2$), ainsi que les trois sections en I ($\phi_F^e = 10$). Dans chaque groupe, la taille varie mais pas la forme, chaque section étant une version agrandie ou réduite de sa voisine.

Les valeurs de ϕ_F^e pour les géométries usuelles, calculées à partir des expressions de A et de I du tableau IV.1, sont listées à la première colonne du tableau IV.2. Les sections équiaxes pleines (cercles, carrés, hexagones, octogones) ont toutes valeurs proches de 1, et pour des raisons pratiques, on peut prendre 1 comme valeur. Pour les sections allongées, creuses, en I ou ondulées, les choses sont différentes. Un tube à paroi mince ou une poutre mince en I peuvent avoir des valeurs de 50 ou plus. Ces géométries sont performantes car elles utilisent moins de matériau (et donc moins de masse) pour obtenir la même valeur de rigidité en flexion. Une poutre avec un facteur de 50 est 50 fois plus performante qu'une poutre pleine de même poids.

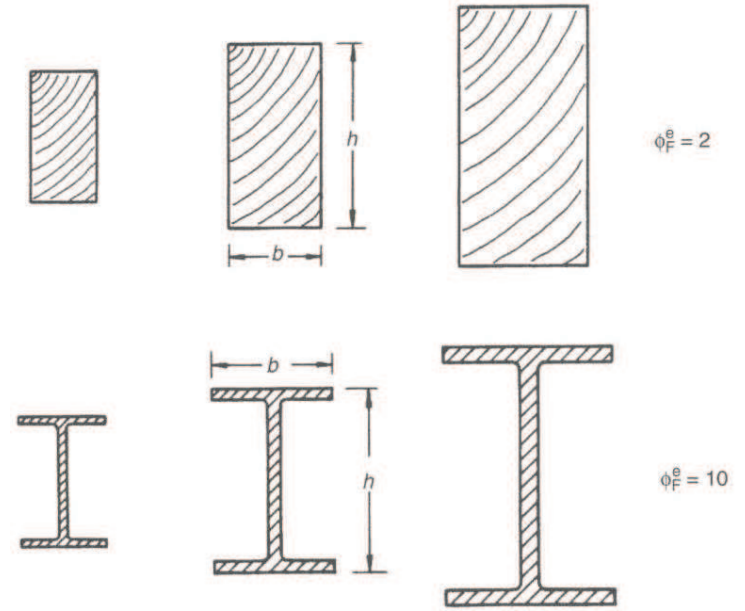


Figure IV.4 – Ensembles de sections rectangulaires d'indice $\phi_F^e = 2$ et de sections en I d'indice $\phi_F^e = 10$. Les membres d'un même ensemble diffèrent par la taille mais pas par leur forme.

IV.1.2.3 Torsion élastique

Les géométries performantes en flexion peuvent s'avérer moins bonnes en torsion. La rigidité d'un arbre (le couple de torsion T divisé par l'angle de torsion θ , Figure IV.2c) s'écrit :

$$S_T = \frac{KG}{l} \quad (\text{IV.6})$$

avec G , le module de cisaillement. La géométrie intervient cette fois dans l'expression du moment de torsion K . Pour des sections circulaires, il est identique au moment polaire J :

$$J = \int_{\text{section}} r^2 dA \quad (\text{IV.7})$$

avec dA , l'élément différentiel de surface situé à la distance radiale r , mesurée à partir du centre de la section. Pour des sections non circulaires, K est inférieur à J . Il est défini de façon à ce que l'angle de torsion θ soit relié au couple de torsion T par :

$$\theta = \frac{Tl}{KG} \quad (\text{IV.8})$$

avec I , la longueur de l'arbre et G , le module de cisaillement du matériau dans lequel il est fait. Des expressions approchées de K sont données au tableau IV.1.

Le facteur de forme pour la torsion élastique est défini, comme précédemment, par le rapport entre la rigidité en torsion de la section géométrique S_T et celle S_T^0 d'un arbre circulaire plein de mêmes longueur I et aire transversale A , soit (d'après IV.6) :

$$\phi_T^e = \frac{S_T}{S_T^0} = \frac{K}{K^0} \quad (\text{IV.9})$$

La constante de torsion K^0 pour un cylindre solide est (Tableau IV.1) :

$$K^0 = \frac{\pi}{2} r^4 = \frac{A^2}{2\pi} \quad (\text{IV.10})$$

d'où

$$\phi_T^e = \frac{2\pi K}{A^2} \quad (\text{IV.11})$$

Ce facteur vaut également 1 pour un cylindre circulaire plein, et prend des valeurs proches de 1 pour toutes les sections équiaxes solides. Mais pour les sections fines, et particulièrement les tubes, il peut être grand. Comme précédemment, des sections ayant la même valeur différent par la taille mais pas par la forme. Les valeurs, calculées à partir des expressions de K et de A , sont données au tableau IV.2.

IV.1.3 Résistance

IV.1.3.1 Définitions

La plasticité se produit quand la contrainte atteint pour la première fois, à un certain endroit, la limite d'élasticité. La rupture intervient quand cette contrainte dépasse la résistance à la rupture. La défaillance par fatigue se produit si elle dépasse la limite d'endurance. Tous ces phénomènes provoquent l'endommagement. Comme dans les chapitres précédents, on utilise le symbole σ_f pour la résistance mécanique, qui représente « la contrainte locale à laquelle commence la plasticité, la rupture ou la fatigue ». Un seul facteur de forme rend compte des trois phénomènes.

IV.1.3.2 Résistance en flexion

En flexion, la contrainte est la plus élevée au point y_m de la surface le plus éloigné de la fibre neutre, et on a :

$$\sigma = \frac{M y_m}{I} = \frac{M}{Z} \quad (\text{IV.12})$$

avec M , le moment de flexion. Ainsi, dans les problèmes d'endommagement de poutres, la géométrie intervient par le biais du module de section $Z = I/y_m$. Si cette contrainte dépasse la résistance mécanique σ_f , la poutre sera endommagée, et le moment de rupture est :

$$M_f = Z \sigma_f \quad (\text{IV.13})$$

Le facteur de forme pour la résistance en flexion est défini comme le rapport entre le moment de rupture M_f (ou la charge équivalente) de la section géométrique et celui d'une section circulaire pleine de même aire transversale :

$$\phi_F^f = \frac{M_f}{M_f^0} = \frac{Z}{Z^0} \quad (\text{IV.14})$$

La grandeur Z^0 pour le cylindre plein est (Tableau IV.1) :

$$Z^0 = \frac{\pi}{4} r^3 = \frac{A^{3/2}}{A\sqrt{\pi}} \quad (\text{IV.15})$$

ce qui donne :

$$\phi_F^f = \frac{4\pi Z}{A^{3/2}} \quad (\text{IV.16})$$

Comme les autres facteurs, c'est un nombre sans dimension, et par conséquent indépendant de l'échelle, et qui vaut 1 pour une poutre pleine de section circulaire. Le tableau IV.2 donne les expressions pour les autres géométries, dérivées des valeurs du module de section Z que l'on trouve au tableau IV.1.

IV.1.3.3 Résistance en torsion

En torsion, le problème est plus compliqué. Pour des tubes circulaires ou des cylindres soumis à un couple de torsion T (comme à la figure IV.2c), la contrainte de cisaillement est maximale à la surface extérieure, à la distance radiale r_m de l'axe de torsion :

$$\tau = \frac{T r_m}{J} \quad (\text{IV.17})$$

La quantité J/r_m en torsion a la même signification que $Z = I/y_m$ en flexion. Pour des sections non circulaires dont les extrémités sont libres de se voiler, la contrainte maximale à la surface est donnée par :

$$\tau = \frac{T}{Q} \quad (\text{IV.18})$$

où Q (en m^3) joue le rôle de J/r_m ou de Z . Cela permet de définir un facteur de forme ϕ_T^f pour la résistance en torsion, de la même façon que précédemment :

$$\phi_T^f = \frac{T_f}{T_f^0} = \frac{Q}{Q^0} = \frac{2\sqrt{\pi}Q}{A^{3/2}} \quad (\text{IV.19})$$

Les valeurs de Q et de ϕ_T^f sont données aux tableaux IV.1 et IV.2. Les arbres de sections équiaxes pleines ont tous des valeurs de facteur proches de 1.

La flexion ou la torsion totalement plastique (où la limite d'élasticité est dépassée en tout point de la section) nécessite deux facteurs de forme supplémentaires. Cependant, les géométries qui sont résistantes au démarrage de la plasticité résistent en général bien également à la plasticité totale. Il n'est donc pas nécessaire d'ajouter de facteurs à ce stade.

IV.1.4 Chargement axial et flambage des colonnes

Une colonne, chargée en compression, flambe de façon élastique quand la charge dépasse la charge d'Euler :

$$F_c = \frac{n^2 \pi^2 EI_{min}}{l^2} \quad (IV.20)$$

avec n , une constante qui dépend des contraintes aux extrémités. La résistance au flambage, donc, dépend du plus petit des moments d'inertie I_{min} , et le facteur de forme est le même que pour la flexion élastique (équation (IV.5)) en remplaçant I par I_{min} .

Une poutre ou un arbre avec un facteur de forme de 50 est 50 fois plus résistant que le même élément avec une section circulaire pleine de même masse linéaire. Si l'on souhaite faire des structures rigides et résistantes performantes (utilisant le moins de matériau possible), alors il faut chercher à avoir les facteurs de forme les plus élevés. Il semblerait donc que plus ϕ est grand, mieux c'est. C'est vrai, mais il y a des limites qui sont données dans le tableau IV.4.

Table IV.4 – Limites supérieures des quatre facteurs de forme.

Matériau	$(\phi_F^e)_{max}$	$(\phi_T^e)_{max}$	$(\phi_F^l)_{max}$	$(\phi_T^l)_{max}$
Aciers de structure	65	25	13	7
Alliages Al	44	31	10	8
GFRP et CFRP	39	26	9	7
Polymères (p. e. nylons)	12	8	5	4
Bois (sections pleines)	5	1	3	1
Élastomères	< 6	3	–	–

Remarque IV.1 Il est clair que la limite supérieure du facteur de forme pour les géométries simples dépend du matériau.

Ces limites supérieures d'efficacité sont importantes. Elles sont au centre de la conception des structures légères et des structures pour lesquelles, pour d'autres raisons (le coût, par exemple), l'utilisation de matériau doit être minimisée. Trois questions se posent alors :

- Qu'est-ce qui fixe les limites supérieures d'efficacité du tableau IV.4 ?
- Pourquoi cette limite dépend-elle du matériau ?
- Quelle est, pour une application donnée dans laquelle on recherche la performance, la meilleure combinaison matériau-géométrie ?

IV.2 Limites dues au matériau pour les facteurs de forme

IV.2.1 Contraintes de fabrication

L'intervalle de valeurs du facteur de forme pour un matériau donné est limité soit par des contraintes de fabrication, soit par le flambage local. L'acier, par exemple, peut être étiré en tubes minces ou mis en forme (laminage, pliage ou soudage) avec des sections en I performantes, et il est courant d'obtenir des facteurs de forme aussi élevés que 50. Le bois ne peut être mis en forme aussi facilement. La technologie du contreplaqué peut en principe être utilisée pour faire des tubes minces ou des sections en I, mais en pratique, des géométries avec des facteurs supérieurs à 5 sont rares. Cela constitue une contrainte de fabrication. Les composites peuvent également être limités par la difficulté actuelle qu'il y a à faire des parois minces, même si la technologie existe.

IV.2.2 Compétition entre les modes d'endommagement

Dans les cas où il est possible de fabriquer des géométries performantes, les limites d'efficacité proviennent de la compétition entre les modes d'endommagement. Les sections non performantes sont endommagées simplement : elles se déforment plastiquement, elles cassent ou elles subissent du flambage à grande échelle. Dans la recherche de performance, on choisit une géométrie qui augmente la charge requise pour les modes d'endommagement de base, mais en faisant cela, on pousse la structure plus près de la charge pour laquelle les autres modes, particulièrement ceux faisant intervenir le flambage local, deviennent dominants. C'est une caractéristique des géométries proches de la performance limite que de montrer deux modes d'endommagement ou plus pour presque la même valeur de charge.

Pourquoi ? Voici une explication « naïve ». Si l'endommagement par un mécanisme se produit à une charge inférieure aux autres, la géométrie de la section peut être ajustée pour le supprimer, mais cela repousse la charge jusqu'à ce qu'un autre mécanisme devienne dominant. Si la géométrie est décrite par une seule variable (ϕ), quand deux mécanismes se produisent pour la même charge, on ne peut plus faire d'ajustement de géométrie pour améliorer les choses. Ajouter des âmes, des nervures ou autres renforts rajoutent des variables, ce qui permet d'optimiser encore la géométrie, mais on ne s'étendra pas sur ce point ici.

IV.3 Indices de performance incluant la géométrie

Cette section explique la façon de trouver la meilleure combinaison matériau-géométrie permettant de maximiser les performances pour un mode de chargement donné. La méthode suit celle développée au chapitre précédent, en allant plus loin pour inclure la géométrie.

IV.3.1 Traction axiale des barres

La capacité d'une barre à supporter une charge F sans trop se déformer ou être endommagée dépend uniquement de l'aire de sa section, pas de sa géométrie. L'indice de performance pour la rigidité à poids minimal E/ρ est valable pour toutes les géométries de section. Cela, comme on l'a déjà dit, n'est pas vrai pour la flexion ou la torsion, ou le flambage.

IV.3.2 Domaine élastique

IV.3.2.1 Flexion élastique

Considérons le choix d'un matériau pour une poutre de rigidité S_F et de longueur l spécifiées, qui doit avoir une masse m minimale. Le choix doit prendre en compte le fait que les matériaux candidats ont des géométries de section différentes. La masse m d'une poutre de longueur l et de section d'aire A est donnée par l'équation

$$m = \rho l A \quad (IV.21)$$

Sa rigidité en flexion est donnée par l'équation (IV.1). En remplaçant l par ϕ_F^e avec l'équation (IV.5), on obtient :

$$S_B = \frac{C_1 E}{4\pi l^3} \phi_F^e A^2 \quad (IV.22)$$

Se servant de cette équation pour éliminer A dans l'équation (IV.22), on obtient la masse de la poutre :

$$m = \left(\frac{4\pi S_F}{C_1 l} \right)^{1/2} l^3 \left(\frac{\rho^2}{\phi_F^e E} \right)^{1/2} \quad (IV.23)$$

Pour des poutres de même géométrie (ϕ_F^e constant), le meilleur choix pour la légèreté est celui d'un matériau ayant le plus grand indice E/ρ (on remarque que cela s'applique au choix des matériaux pour toutes les géométries identiques, pas seulement les pleines). Mais si l'on veut choisir un couple matériau-géométrie pour une poutre légère et rigide, le meilleur choix est celui ayant la plus grande valeur de :

$$M_1 = \frac{(\phi_F^e E)^{1/2}}{\rho} \quad (IV.24)$$

Le même résultat est valable pour le flambage élastique général d'une colonne chargée axialement.

IV.3.2.2 Torsion élastique

La procédure pour la torsion élastique d'un arbre est similaire. Considérons un arbre de section A et de longueur l soumis à un couple de torsion T . Il se tord d'un angle θ . Il est spécifié que la rigidité en torsion T/θ soit égale à une certaine valeur S_T pour

une masse minimale. La masse d'un arbre est donnée par l'équation IV.21. Sa rigidité en torsion est :

$$S_T = \frac{KG}{\rho} \quad (IV.25)$$

avec G , le module de cisaillement et K , défini plus haut. En remplaçant K par avec l'équation (IV.11), on obtient :

$$S_T = \frac{G}{2\pi l} \phi_T^e A^2 \quad (IV.26)$$

On utilise cela pour éliminer A dans l'équation (IV.21) et on a :

$$m = \left(\frac{2\pi S_T}{l^3} \right)^{1/2} l^3 \left(\frac{\rho^2}{\phi_T^e G} \right)^{1/2} \quad (IV.27)$$

La meilleure combinaison matériau-géométrie est celle présentant la plus grande valeur de $(\phi_T^e E)^{1/2}/\rho$. Le module de cisaillement G est relié au module d'Young E . Pour des raisons pratiques, on approchera G par la valeur $3E/8$. L'indice devient alors :

$$M_2 = \frac{(E\phi_T^e)^{1/2}}{\rho} \quad (IV.28)$$

Pour les arbres ayant la même géométrie, on retrouve $E^{1/2}/\rho$. Quand le matériau et la géométrie diffèrent, il faut utiliser l'indice de l'équation (IV.28).

IV.3.3 Résistance

IV.3.3.1 Résistance en flexion

Une poutre chargée en flexion doit supporter une charge spécifiée F sans endommagement. La masse de cette poutre doit être minimisée. Quand la géométrie n'est pas un paramètre du problème, le meilleur choix est celui d'un matériau ayant l'indice $\sigma_f^{2/3}/\rho$ le plus élevé (σ_f est la résistance du matériau). Quand la géométrie de la section est une variable, le meilleur choix se fait de la façon suivante.

La défaillance se produit si la charge dépasse le moment de rupture :

$$M_f = Z \sigma_f \quad (IV.29)$$

En remplaçant Z par le facteur de forme approprié ϕ_F^f , (équation (IV.16)), on obtient :

$$M_f = \frac{\sigma_f}{4\sqrt{\pi}} \phi_F^f A^{2/3} \quad (IV.30)$$

En substituant cela dans l'équation (IV.21) de la masse de la poutre, on a :

$$m = \left(\frac{4\sqrt{\pi} M_f}{l^3} \right)^{2/3} l^3 \left(\frac{\rho^{3/2}}{\phi_F^f \sigma_f} \right)^{2/3} \quad (IV.31)$$

Le meilleur couple matériau-géométrie est celui ayant le plus grand indice :

$$M_3 = \frac{(\phi_F^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \quad (\text{IV.32})$$

À géométrie constante, l'indice se réduit à celui du chapitre précédent. Mais quand la géométrie est une variable, il faut utiliser l'indice complet.

IV.3.3.2 Résistance en torsion

Le cas de la torsion d'un arbre se traite de la même manière. Considérons un arbre devant supporter un couple de torsion T sans endommagement. Cela nécessite que T ne soit pas supérieur au couple limite d'endommagement T_f qui est :

$$T_f = Q\tau_f \quad (\text{IV.33})$$

En remplaçant Q avec l'équation (IV.19), on obtient :

$$T_f = \frac{\sigma_f}{4\sqrt{\pi}} \phi_T^f A^{3/2} \quad (\text{IV.34})$$

où la résistance en cisaillement τ_f , a été remplacée par $\sigma_f/2$. En utilisant cela pour éliminer A dans l'équation (IV.21) de la masse de l'arbre, on a :

$$m = \left(\frac{4\sqrt{\pi}T_f}{l^3} \right)^{2/3} l^3 \left(\frac{\rho^{2/3}}{\phi_T^f \sigma_f} \right)^{2/3} \quad (\text{IV.35})$$

Les performances sont maximisées par le choix de la plus grande valeur de :

$$M_4 = \frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \quad (\text{IV.36})$$

IV.3.4 Géométries soumises à des limitations

Parfois, la conception impose des limitations sur la forme. Les panneaux, par exemple, ont en général une largeur imposée mais une épaisseur « libre », ce qui veut dire qu'elle peut être ajustée pour obtenir la rigidité voulue. La géométrie de la section est également libre : elle peut être en nid d'abeille, par exemple. Les poutres peuvent aussi être limitées en hauteur ou en largeur. Quand il existe une limite dimensionnelle, le facteur de forme varie. L'annexe du chapitre 7 du livre d'Ashby traite des indices de performance pour les formes soumises à certaines limites.

IV.4 Facteur de forme microscopique ou microstructural

IV.4.1 Géométrie microscopique

Les sections listées dans les tableaux IV.1 et IV.2 sont performantes grâce à leur géométrie macroscopique. Il existe une autre façon d'atteindre la performance, à petite échelle, par la géométrie microscopique, ou structurale. On parle alors de matériaux architecturés.

Exemple IV.2 *Le bois en offre un exemple. Le composant solide du bois (qui est un composite de cellulose, de lignine et d'autres polymères) est formé de petites cellules prismatiques, qui disperse le solide loin de l'axe de flexion ou de torsion de la branche ou du tronc de l'arbre. Cela procure au bois une plus grande rigidité en flexion et en torsion que le solide dans lequel il est fait.*

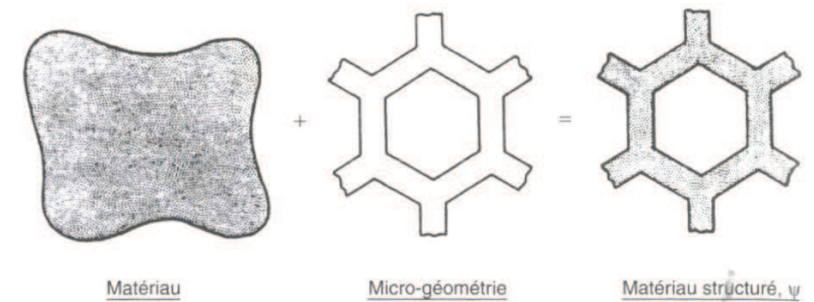


Figure IV.5 – La performance mécanique peut être obtenue en combinant le matériau avec une forme microscopique (ou interne) qui est répétée pour former une structure étendue. La forme est caractérisée par des facteurs de forme microscopiques ψ .

Le gain de performance (Figure IV.5) est caractérisé par un ensemble de facteurs de forme microscopique ψ , qui sont définis et établis exactement comme les facteurs ϕ . La caractéristique d'une géométrie microscopique est qu'elle se répète, elle est étendue. On peut concevoir un solide architecturé comme un matériau à part entière : il possède un module, une densité, une résistance, etc. On peut découper, dedans des formes qui, si elles sont grandes par rapport à la taille des cellules, hériteront de ses propriétés. Il est possible, par exemple, de fabriquer une section en I avec du bois, et une telle section a une géométrie macroscopique (définie ci-dessus) et une géométrie microscopique (Figure IV.6). On va montrer dans les paragraphes suivants que le facteur de forme total pour une poutre en I en bois est le produit du facteur de forme de la structure du bois et de celui de la section en I , qui peut être élevé.

Beaucoup de matériaux naturels ont des géométries microscopiques, le bois n'est qu'un exemple. Les os, les tiges ont tous des structures qui présentent une rigidité élevée pour un poids faible. Il est plus compliqué de citer des exemples de matériaux

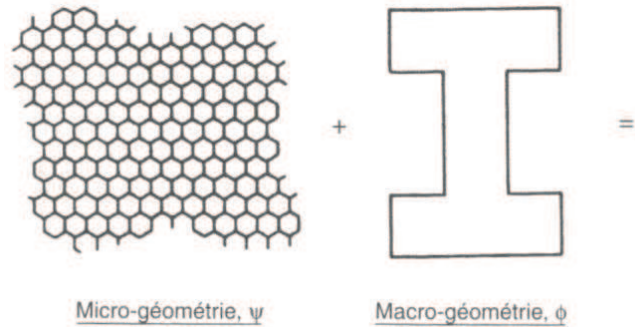


Figure IV.6 – La forme microscopique combinée avec la forme macroscopique permet d’obtenir des structures performantes. Le facteur de forme global est le produit des deux facteurs de forme.

élaborés par l’homme, même s’il serait possible de les réaliser. La figure IV.7 montre quatre exemples de structures étendues ayant une géométrie microscopique, qui peuvent toutes être trouvées dans la nature :

- la première est une structure de cellules prismatiques hexagonales, comme celle du bois ;
- la deuxième est un réseau de fibres séparées par une matrice en mousse, typique du palmier ;
- la troisième est une structure axisymétrique de coques cylindriques concentriques séparées par une matrice en mousse, semblable à la tige de certaines plantes ;
- la quatrième est une structure en couches, une sorte de panneau sandwich, comme un os de seiche. Elle présente une symétrie orthotropique.

IV.4.2 Facteurs de forme microscopiques

IV.4.2.1 Flexion

Considérons le gain de rigidité en flexion obtenu quand on passe, à masse constante, d’une poutre cylindrique pleine (comme celle au centre de la figure IV.7) à une poutre circulaire avec une quelconque des structures qui l’entourent sur cette figure. La rigidité S_S de la poutre pleine est :

$$S_S = \frac{C_1 E_S I_S}{l^3} \tag{IV.37}$$

Quand la poutre est étendue à masse constante vers une des structures, sa densité chute de ρ_s à ρ et son rayon augmente de r_s à :

$$r = \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^{1/2} r_s \tag{IV.38}$$

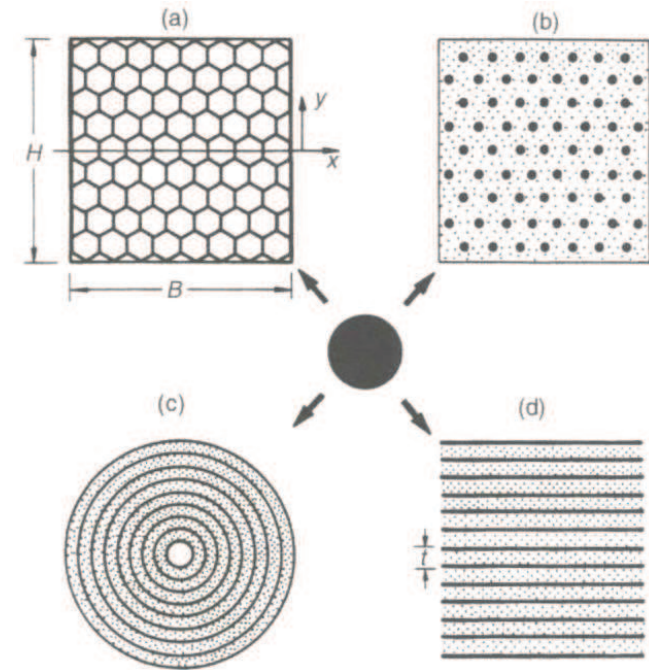


Figure IV.7 – Matériaux microstructure : (a) cellules prismatiques ; (b) fibres enrobées d’une matrice en mousse ; (c) coques cylindriques concentriques avec de la mousse intercalée ; (d) plaques parallèles séparées par de la mousse.

avec comme conséquence une augmentation de son moment d’inertie de I_S à :

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^2 r_s^4 = \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^2 I_S \tag{IV.39}$$

Si les cellules, les fibres, les anneaux ou les plaques sont étendues parallèlement à l’axe de la poutre, le module chute de E_S à :

$$E = \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) E_S \tag{IV.40}$$

La rigidité de la poutre étendue est donc :

$$S = \frac{C_1 E I}{l^3} = \frac{C_1 E_S I_S}{l^3} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \tag{IV.41}$$

On définit le facteur de forme microscopique de la même façon que celui macroscopique : c’est le rapport entre la rigidité de la poutre structurée et celle de la poutre pleine. En faisant le rapport des équations (IV.41) et (IV.37), on trouve :

$$\psi_F^e = \frac{S}{S_S} = \frac{\rho_S}{\rho} \tag{IV.42}$$

En d'autres termes, le facteur de forme microscopique pour les structures prismatiques est simplement le rapport inverse des densités. On remarque que pour une poutre pleine, le facteur vaut 1.

La même analyse pour la résistance en flexion donnerait le facteur de forme :

$$\phi_F^f = \left(\frac{\rho_S}{\rho} \right)^{1/2} \tag{IV.43}$$

IV.4.2.2 Torsion

La torsion, comme toujours, est un cas plus difficile. Quand la structure de la figure IV.7c subit une torsion, ses anneaux se comportent comme des tubes concentriques pour lesquelles :

$$\psi_T^e = \frac{\rho_S}{\rho} \quad \text{et} \quad \phi_T^f = \left(\frac{\rho_S}{\rho} \right)^{1/2} \tag{IV.44}$$

Les autres structures ont des rigidités et des résistances en torsion moins élevées (donc des facteurs de forme moindres), pour la même raison que les sections en I, bonnes en flexion, sont mauvaises en torsion.

IV.4.2.3 Structuration

La structuration transforme un solide de module E_S et de résistance $\sigma_{S,f}$ en un nouveau solide de module E et de résistance σ_f . Si on donne à ce solide une géométrie macroscopique performante (tube ou section en I, par exemple), sa rigidité en flexion augmentera d'un facteur ϕ_F^e . La rigidité de la poutre sera I

$$S = \psi_F^e \phi_F^e S_S \tag{IV.45}$$

c'est-à-dire que les facteurs de forme se multiplient. La même chose est vraie pour la résistance.

Voilà un exemple de hiérarchisation structurale et du bénéfice qu'elle apporte. On peut l'étendre encore : les parois des cellules ou les couches peuvent à leur tour être structurées, ce qui donnerait un troisième facteur multiplicatif pour le facteur de forme total, et ainsi de suite.

La nature agit de la sorte, mais c'est plus difficile pour les structures réalisées par l'homme. Il y a la difficulté évidente de la fabrication, qui impose des limites économiques sur le niveau de structuration. Il y a également celle, moins évidente, de la fiabilité. Si la structure est optimisée, alors une défaillance de l'un des membres d'un niveau de la structure pourrait entraîner la défaillance de la structure entière. Plus la structure est complexe, plus il devient difficile de s'assurer de l'intégrité de tous les niveaux.

Comme on l'a dit plus haut, un matériau microstructure peut être considéré comme un nouveau matériau. Il possède une densité, une résistance, une conductivité thermique, etc. On rencontre des difficultés uniquement quand la taille de l'échantillon est comparable à celle de la cellule, quand les propriétés commencent à dépendre de la taille. Cela veut dire que les matériaux architecturés peuvent être indiqués sur les diagrammes de choix des matériaux (et d'ailleurs le bois y figure déjà) et que l'on peut leur appliquer les critères de sélection pour les matériaux pleins.

IV.5 Co-sélection matériau-géométrie

On peut optimiser le choix du matériau et de la géométrie de plusieurs façons, dont deux sont illustrées ci-après.

IV.5.1 Co-sélection par le calcul

Considérons l'exemple du choix d'un matériau pour une poutre rigide géométrique de masse minimale. Quatre matériaux sont possibles, dont les propriétés et les géométries disponibles (caractérisée par ϕ_F^e) sont listées au tableau IV.5. On recherche la combinaison ayant la plus grande valeur d'indice M_1 (équation IV.24) :

$$M_1 = \frac{(\phi_F^e E)^{1/2}}{\rho} \tag{IV.46}$$

L'avant-dernière colonne du tableau donne les valeurs de cet indice pour une forme fixée. Le bois présente la meilleure valeur ; il est plus de deux fois plus rigide que l'acier pour le même poids. Mais quand tous les matériaux sont mis en forme de façon performante, on voit que le bois a la plus faible valeur d'indice ; même l'acier est meilleur. Les alliages d'aluminium arrivent en tête, légèrement meilleurs que les GFRP.

Table IV.5 – Choix du matériau et de la géométrie pour une poutre légère et rigide.

Matériau	ρ (Mg · m ⁻³)	E (GPa)	ϕ_{max}^*	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_{max} E)^{1/2}}{\rho}$
Acier 1020	7,85	205	65	1,8	14,7
Al 6061-T4	2,7	70	44	3,1	20,5
GFRP (isotrope)	1,75	28	39	2,9	19,0
Bois (chêne)	0,9	13,5	5	4,1	9,1

* ϕ_{max} signifie la valeur maximale possible pour ϕ d'après le tableau 3.

IV.5.2 Co-sélection graphique utilisant les diagrammes de propriétés

Les matériaux avec géométrie peuvent être représentés et choisis avec les diagrammes de matériaux.

IV.5.2.1 Domaine élastique

Le raisonnement, dans le cas de la flexion élastique, est le suivant. L'indice de performance pour la flexion élastique (équation IV.24) peut être réécrit ainsi :

$$M_1 = \frac{(\phi_F^e E)^{1/2}}{\rho} = \frac{\left(\frac{E}{\phi_F^e}\right)^{1/2}}{\frac{\rho}{\phi_F^e}} \quad (\text{IV.47})$$

L'équation montre qu'un matériau de module E et de densité ρ , se comporte avec géométrie comme un matériau de module :

$$E^* = \frac{E}{\phi_F^e} \quad (\text{IV.48})$$

et de densité :

$$\rho^* = \frac{\rho}{\phi_F^e} \quad (\text{IV.49})$$

Le diagramme module-densité est représenté de façon schématique à la figure IV.8. Les propriétés du matériau structuré E^* et ρ^* peuvent être tracées dessus. Le fait de prendre en compte la géométrie ($\phi_F^e = 10$, par exemple) déplace le matériau M vers le bas et la gauche le long d'une droite de pente 1, en partant du point (E, ρ) vers la position $(E/10, \rho/10)$, comme indiqué sur la figure. On trace les critères de sélection sur la figure comme précédemment : une valeur constante de l'indice $E^{1/2}/\rho$, par exemple, se matérialise par une droite de pente 2; elle est représentée pour une valeur par une ligne en pointillés sur la figure. La prise en compte de la géométrie a déplacé le matériau d'une position située en dessous de cette ligne vers une située au-dessus : ses performances se sont améliorées. On traite de la même façon le cas de la torsion élastique.

IV.5.2.2 Résistance

Le choix des matériaux basé sur la résistance pour un poids minimal se fait en utilisant le diagramme résistance-densité représenté de façon schématique à la figure IV.9. La géométrie est prise en compte de la même façon. L'indice de performance pour la résistance en flexion peut être réécrit ainsi :

$$M_3 = \frac{(\phi_F^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} = \frac{\left(\frac{\sigma_f}{(\phi_F^f)^2}\right)^{2/3}}{\frac{\rho}{\phi_F^f}} \quad (\text{IV.50})$$

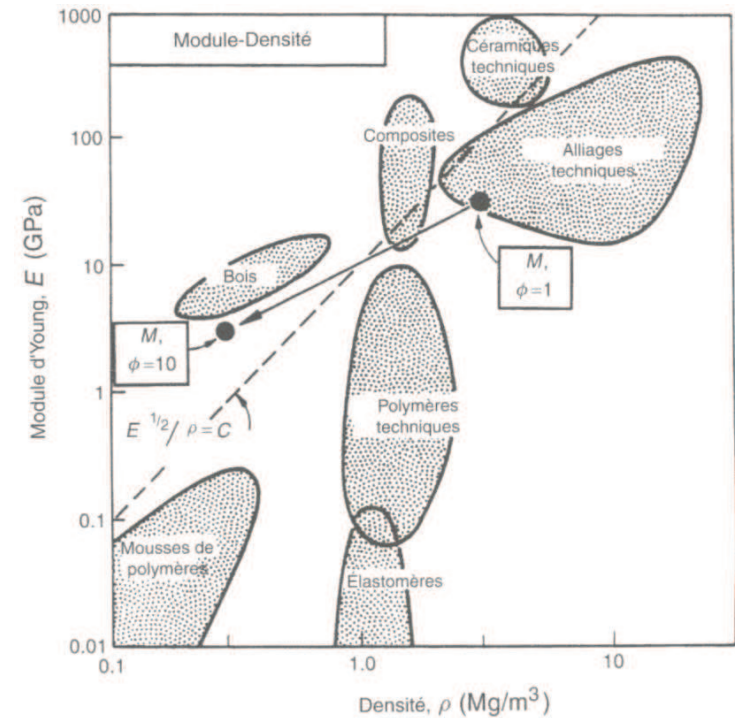


Figure IV.8 – Représentation schématique du diagramme n° 1.

Un matériau de résistance σ_f et de densité ρ se comporte, avec géométrie, comme un matériau de résistance :

$$\sigma_f^* = \frac{\sigma_f}{(\phi_F^f)^2} \quad (\text{IV.51})$$

et de densité :

$$\rho^* = \frac{\rho}{\phi_F^f} \quad (\text{IV.52})$$

La suite est claire. La prise en compte de la géométrie ($\phi_F^f = \sqrt{10}$, par exemple) déplace le matériau M le long d'une ligne de pente 1, ce qui l'amène sur le schéma du point σ_f , ρ situé sous la droite d'indice (en pointillés) au point $(\sigma_f/10, \rho/10)$ situé au-dessus. Encore une fois, les performances sont améliorées. La résistance en torsion se traite de la même façon, avec le facteur de forme approprié.

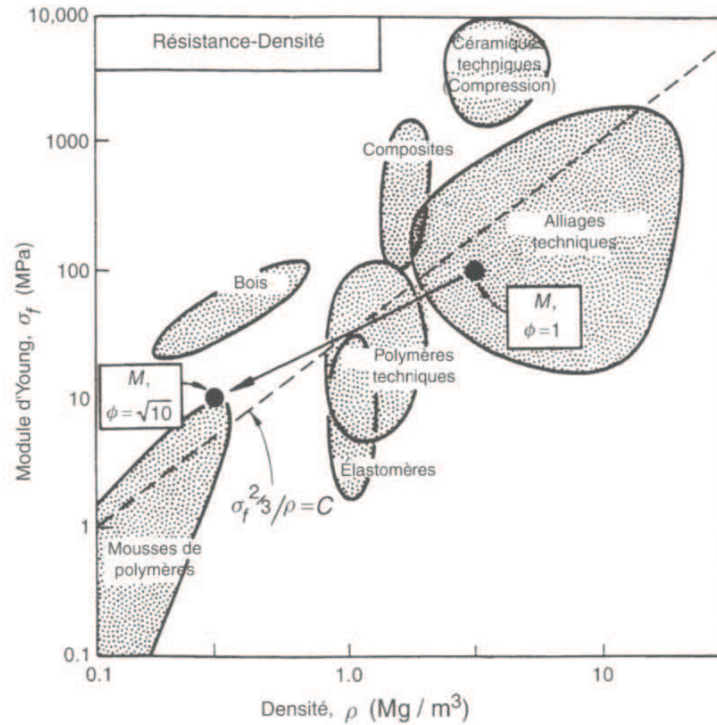


Figure IV.9 – Représentation schématique du diagramme n° 2.

IV.6 Récapitulation

Le concepteur dispose de deux types de variables avec lesquelles il peut optimiser les performances d'un composant de structure : les propriétés du matériau et la géométrie de la section. Ces variables ne sont pas indépendantes. Le choix du meilleur matériau dépend, pour une application donnée, des géométries dans lesquels il est disponible ou peut potentiellement être mis en forme. On a développé une méthode pour optimiser simultanément le choix du matériau et de la géométrie.

On a défini quatre facteurs de forme qui permettent de rendre compte de la contribution de la géométrie (Tableau IV.6) :

- un pour la flexion et le flambage élastique des poutres ϕ_F^e ,
- un pour la torsion élastique des arbres ϕ_T^e ,
- un pour la résistance des poutres en flexion ϕ_F^f ,
- un pour la résistance des arbres en torsion ϕ_T^f .

Les facteurs de forme sont des nombres sans dimension qui caractérisent la performance de l'utilisation du matériau pour chaque mode de chargement. Ils sont

Table IV.6 – Définition des facteurs de forme.

Contrainte de conception*	Flexion	Torsion
Rigidité	$\phi_F^e = \frac{4\pi I}{A^2}$	$\phi_T^e = \frac{2\pi K}{A^2}$
Résistance	$\phi_F^f = \frac{4\sqrt{\pi}Z}{A^{3/2}}$	$\phi_T^f = \frac{2\sqrt{\pi}Q}{A^{3/2}}$

* A = aire de la section ; I, K, Z et Q sont définis dans le texte et dans le tableau 7.1.

définis de telle sorte qu'ils valent tous 1 pour une section circulaire pleine. Avec cette définition, toutes les sections équiaxes pleines ont des facteurs de forme valant environ 1, mais les géométries performantes qui dispersent le matériau loin de l'axe de flexion ou de torsion (poutres en I, tubes creux, structures sandwiches, etc.) ont des facteurs élevés. Leurs valeurs sont données dans le tableau IV.2 pour les géométries usuelles.

La meilleure combinaison matériau-géométrie pour une poutre légère ayant une rigidité en flexion spécifiée est celle qui maximise l'indice de performance :

$$M_1 = \frac{(\phi_F^e E)^{1/2}}{\rho} \tag{IV.53}$$

Une expression similaire M_2 faisant intervenir ϕ_T^e est établie pour un arbre léger et rigide. Le meilleur couple matériau-géométrie pour une poutre légère de résistance spécifiée est celui qui maximise l'indice :

$$M_3 = \frac{(\phi_F^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} \tag{IV.54}$$

Une expression similaire M_4 faisant intervenir ϕ_T^f est établie pour un arbre léger et résistant. Le critère de performance était ici celui de satisfaire à une spécification de conception pour un poids minimum. D'autres couples matériau-géométrie similaires permettent de maximiser d'autres critères de performance : minimiser le coût plutôt que le poids, par exemple, ou maximiser l'énergie emmagasinée.

Le concept de facteurs de forme microscopique ψ est introduit pour caractériser la performance, en flexion et en torsion, de structures cellulaires, en couches ou autres structures de petite échelle couramment rencontrées dans la nature. Ils sont définis de la même façon que les facteurs ϕ . La différence est que la géométrie microscopique se répète ; les structures possédant une géométrie microscopique sont étendues et peuvent elles-mêmes être découpées pour donner une géométrie macroscopique. Ces structures peuvent être considérées :

- soit comme un solide de propriétés E_S , $\sigma_{f,S}$ et ρ_S avec un facteur de forme microscopique ψ ;
- soit comme un nouveau matériau avec un nouveau jeu de propriétés E_S/ψ , ρ_S/ψ , etc. avec un facteur de forme de 1.

Exemple IV.3 *Le buis peut être considéré comme de la cellulose et de la lignine composant les cellules du bol; ou comme du bois lui-même, avec une densité, une résistance, un module inférieur mais des valeurs d'indice plus élevées qui caractérisent la performance de la structure.*

Quand on donne aux matériaux architecturés ou microstructurés (ψ) une géométrie macroscopique (ϕ), le facteur de forme total est le produit $\phi\psi$, qui peut être élevé.

Pour en savoir plus

Les ouvrages de références

Pour en savoir plus sur les choix des matériaux, consulter les ouvrages de référence :

- M. F. Ashby (2004) *Choix des Matériaux en Conception Mécanique*. Dunod (620.11 ASH)
- Y. Bréchet, M. F. Ashby & L. Salvo (2001) *Sélection des matériaux et des procédés de mise en IJuvre (Traité des Matériaux Volume 20)*. Presses polytechniques et universitaires romandes (620.11 TRA)

Vocabulaire anglais

Pour le vocabulaire anglais technique, il est conseillé de consulter le site du Grand Dictionnaire Terminologique (<http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>)