

Chapitre 1

Introduction: histoire et caractère des matériaux



Professeur James Stuart, premier
Professeur d'Ingénierie à Cambridge.

Contenu du chapitre

1.1 Matériaux, procédés et sélection	2
1.2 Propriétés des matériaux	4
1.3 Propriétés limitant la conception	10
1.4 Résumé et conclusions	10
1.5 Lectures complémentaires	11
1.6 Exercices	11

1.1 Matériaux, procédés et sélection

Les ingénieurs *fabriquent* des objets. Ils les fabriquent à partir de *matériaux*. En fonction de l'application souhaitée, ces matériaux doivent être capables de supporter des charges mécaniques, d'isoler ou de conduire la chaleur et l'électricité, de produire ou de repousser un champ magnétique, de transmettre ou de réfléchir la lumière, de survivre dans des environnements souvent hostiles, et tout cela sans nuire à l'environnement ni coûter trop cher.

Par ailleurs, le matériau requiert un partenaire dans le processus d'élaboration. En effet, pour *fabriquer* quelque chose à partir d'un matériau, l'ingénieur a aussi besoin d'un *procédé*, et pas n'importe lequel: il faut en choisir un qui soit compatible avec le matériau qui est prévu d'être utilisé. Parfois le procédé joue un rôle prépondérant et il s'agit alors de trouver un matériau compatible avec celui-ci. Il est donc question d'une union entre un matériau et un procédé. La compatibilité n'est pas toujours facile à trouver, beaucoup d'unions échouent, et la défaillance d'un matériau peut avoir des conséquences catastrophiques, faisant intervenir des problèmes de responsabilités et d'indemnisation. Cela sonne comme du pain béni pour les avocats, et c'en est parfois: des spécialistes travaillent comme experts témoins dans des cas juridiques impliquant la défaillance de matériaux. Mais notre but ici n'est pas d'entrer dans ce débat, mais plutôt de donner une vision de l'univers des matériaux (car même sur les planètes les plus éloignées, les mêmes éléments sont présents) et de l'univers des procédés, et de fournir des méthodes et des outils pour les choisir de sorte à assurer une union heureuse et durable.

Mais les ingénieurs fabriquent des objets à partir de matériaux depuis plusieurs siècles déjà, et avec succès: pensez à Isambard Kingdom Brunel, Thomas Telford, Gustave Eiffel, Henry Ford, Karl Benz et Gottlieb Daimler, ou encore aux frères Wright. Alors pourquoi avons-nous besoin de nouvelles méthodes de sélection? Un peu d'histoire aide à répondre à cette question. Ce chapitre commence avec le portrait de James Stuart, qui a été le premier Professeur d'Ingénierie à l'Université de Cambridge, de 1875 à 1890 (notez le cigare sur le tableau). A cette époque, le nombre de matériaux disponibles pour les ingénieurs était limité à quelques centaines tout au plus. Les polymères synthétiques n'existaient pas, alors que de nos jours il y en a plus de 45'000. Il n'y avait pas d'alliages légers (l'aluminium n'est considéré comme un matériau d'ingénierie que depuis le 20e siècle), il y en a actuellement des milliers. Il n'y avait pas non plus de composites à hautes performances, il y en a maintenant des centaines. L'histoire des matériaux est développée plus en détail en figure 1.1, pour une période s'étendant sur plus de 10'000 ans. Cette figure montre grossièrement quand la première évolution de chacune des classes principales de matériaux a eu lieu. L'échelle de temps n'est pas linéaire car la plupart des matériaux utilisés de nos jours ont été développés lors des 100 dernières années. Leur nombre est énorme: plus de 160 000 matériaux sont disponibles pour les ingénieurs d'aujourd'hui, nous confrontant à un problème que le Professeur Stuart ignorait, celui d'effectuer une sélection optimale parmi ce large éventail. Avec la demande toujours croissante de performances, d'économie et de rendement, ainsi que l'impératif d'éviter toute nuisance à l'environnement, le bon choix devient très important. Une conception innovante signifie alors exploiter avec imagination les propriétés offertes par les matériaux.

Ces propriétés sont aujourd'hui largement connues et documentées dans des ouvrages de

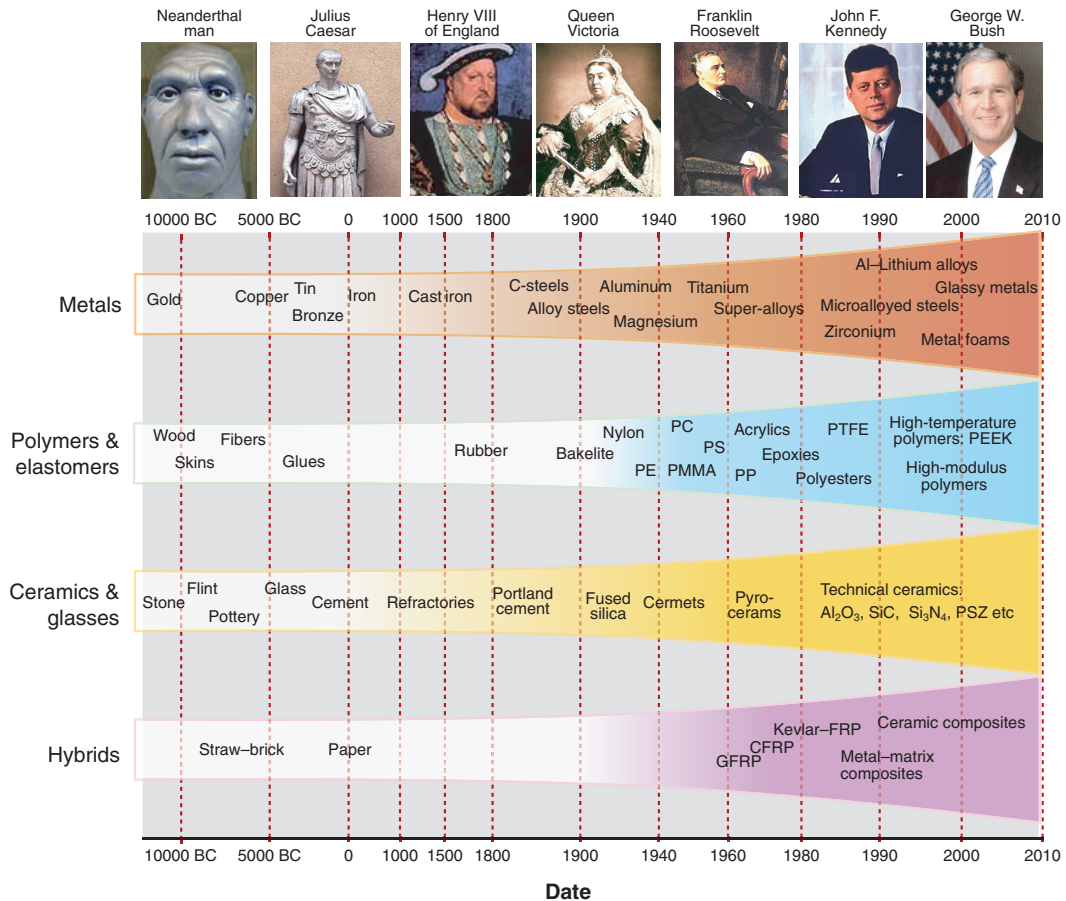


Figure 1.1 Le développement des matériaux au fil du temps. Les matériaux préhistoriques, à gauche, sont présents naturellement; le défi des ingénieurs de cette époque était leur mise en forme. Le développement de la thermochimie, et (plus tard) de la chimie des polymères, a permis l'émergence de matériaux faits par l'homme, représentés dans les zones colorées. Trois matériaux, à savoir la pierre, le bronze et le fer, étaient si importants qu'ils ont donné leur nom à la période de leur prédominance.

référence comme le *ASM Materials Handbook*, qui comporte 22 volumes épais, et ce n'est qu'un exemple parmi beaucoup d'autres. Comment faire face à cette vaste quantité d'informations? Heureusement, quelque chose d'autre a changé depuis l'époque du Prof. Stuart: il existe désormais des moyens numériques de stockage et de traitement de l'information. La conception assistée par ordinateur est devenue partie intégrante de la formation d'un ingénieur et peut s'appuyer sur des progiciels largement répandus de modélisation 3D, d'analyse

par éléments finis, d'optimisation et de sélection des matériaux et des procédés. Un logiciel de sélection des matériaux et des procédés utilise des bases de données regroupant les attributs des matériaux et ceux des procédés, en documentant également leur compatibilité. Il permet d'effectuer des recherches et de présenter les résultats de manière à ce que la sélection remplisse au mieux les exigences d'une conception.

Que ce soit pour un voyage à pieds, à vélo ou en voiture, il est utile de se munir d'une carte. Le paysage des matériaux, comme le paysage terrestre, peut être complexe et porter à confusion; les cartes y sont par conséquent aussi une bonne idée. Ce texte présente une approche des matériaux et des procédés de fabrication guidée par la conception et utilisant des cartes: des graphiques innovants pour représenter le monde des matériaux et des procédés par des moyens facilement accessibles. Ces graphiques présentent les propriétés des matériaux de manière à offrir une vue d'ensemble, à révéler les relations entre différentes propriétés et à permettre la sélection.

1.2 Propriétés des matériaux

Quelles sont alors ces propriétés? Certaines, comme la densité (masse par unité de volume) et le prix (coût par unité de volume ou de poids), sont assez familières. D'autres en revanche ne le sont pas et il est donc essentiel de les clarifier. Commençons par celles qui permettent de déterminer de manière sûre si un matériau peut supporter une charge: les *propriétés mécaniques*.

Propriétés mécaniques Il est assez facile de plier *élastiquement* une règle en acier, «élastique» signifiant que celle-ci retrouve sa forme initiale lorsqu'elle est relâchée. Sa rigidité élastique (dans ce cas la résistance à la flexion) est donnée en partie par sa forme, en l'occurrence la faible épaisseur de la règle qui facilite son fléchissement, et en partie par une propriété de l'acier lui-même: son *module élastique*, E . Les matériaux avec un module élevé, comme l'acier, sont intrinsèquement rigides alors que ceux avec un module faible, comme le polyéthylène, ne le sont pas. La figure 1.2(b) illustre les conséquences potentielles d'une rigidité trop faible pour des ailes d'avion.

Si la règle en acier se fléchit élastiquement, il est toutefois difficile de la plier de manière permanente s'il s'agit d'une bonne règle. La déformation permanente est reliée à la *résistance*, et non pas à la rigidité. La facilité avec laquelle une règle peut être fléchie de manière permanente dépend là encore de sa forme, ainsi que d'une autre propriété de l'acier: sa *limite élastique*, σ_y . Les matériaux possédant une limite élastique élevée, comme les alliages de titane, sont difficiles à déformer de manière permanente et cela même si leur rigidité, donnée par E , n'est pas forcément élevée. En revanche, les matériaux avec une faible limite élastique, comme le plomb, peuvent facilement être déformés de manière permanente. Lorsque les métaux sont déformés, ils deviennent généralement plus résistants (cet effet est appelé «écrouissage»), mais il existe tout de même une limite ultime, appelée la *résistance maximale en traction*, σ_{ts} , au-delà de laquelle le matériau rompt (la déformation au moment de la rupture est appelée *ductilité*). La figure 1.2(c) donne une idée des effets négatifs que peut avoir une résistance inappropriée.

Jusqu'ici tout va bien, alors considérons encore une autre propriété. Si, au lieu d'être en

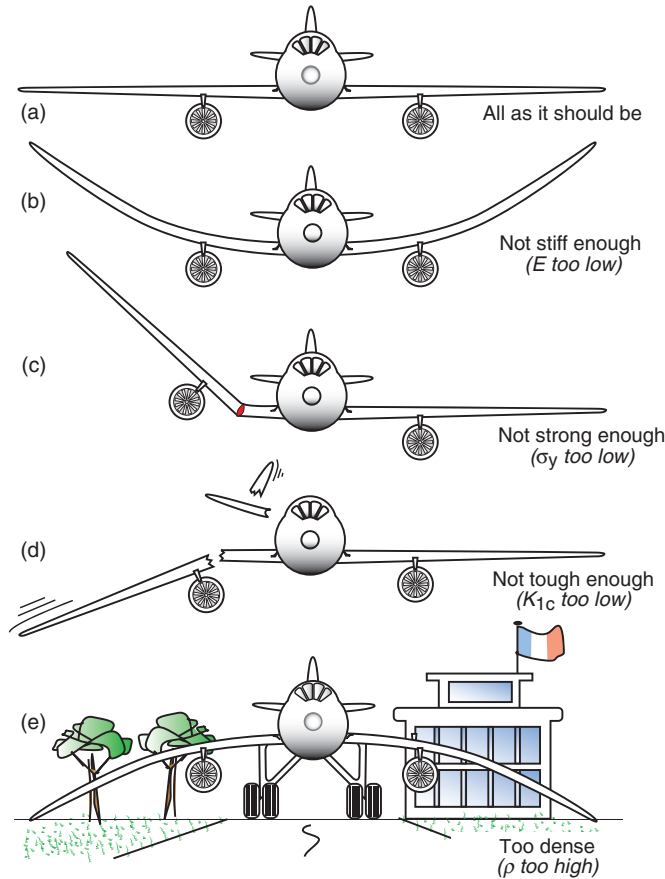


Figure 1.2 Propriétés mécaniques.

acier, la règle est désormais faite de verre ou de PMMA (Plexiglas, Perspex), comme le sont les règles transparentes, il est alors absolument impossible de la déformer de manière permanente. La règle va en effet se rompre soudainement, sans préavis, avant d'acquiescer une déformation permanente. Les matériaux qui rompent de cette manière sont qualifiés de fragiles, par opposition à ceux dits tenaces. Comme il n'y a pas de déformation permanente dans ce cas, σ_y n'est pas la bonne propriété pour décrire ce comportement. La résistance des matériaux à la propagation d'une fissure et à la rupture est mesurée par la *ténacité à la rupture*, K_{1c} . Les aciers sont tenaces (en fait la plupart le sont, mais les aciers *peuvent* aussi être fragilisés) et ont donc des valeurs de K_{1c} élevées. Le verre au contraire symbolise parfaitement la fragilité et possède une valeur de K_{1c} très faible. La figure 1.2(d) suggère les conséquences d'une rupture et d'une ténacité inadéquate.

Nous avons commencé cette section avec la propriété de *densité*, c'est-à-dire la masse par

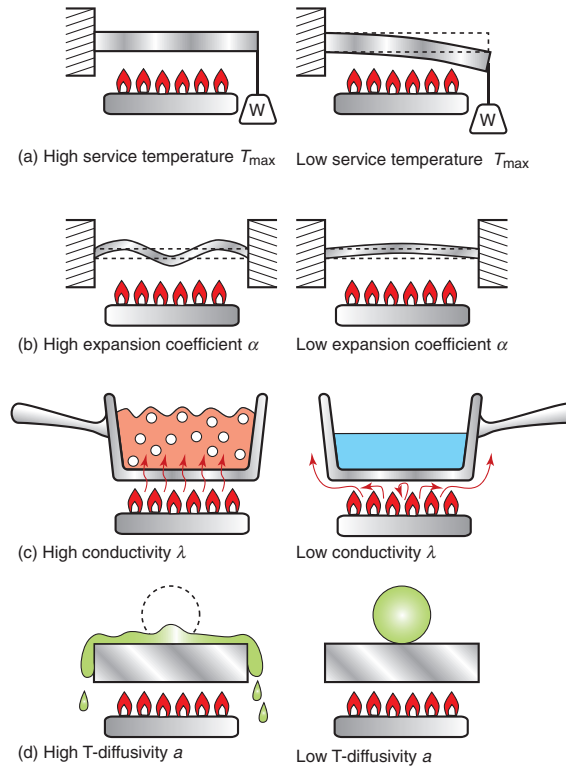


Figure 1.3 Propriétés thermiques.

unité de volume, de symbole ρ . La densité n'est pas une propriété pertinente dans le cas d'une règle. Mais pour la majorité des véhicules, le poids est synonyme d'augmentation de la consommation de carburant. Cette augmentation reste modeste pour les automobiles, mais est déjà plus importante pour les camions et les trains, encore plus pour les avions, et devient même énorme pour les engins spatiaux. La minimisation du poids se fait principalement par une conception intelligente, nous reviendrons sur ce point plus tard, mais également par le choix du bon matériau. L'aluminium a une faible densité, alors que celle du plomb est au contraire élevée. Si notre petit avion était fait en plomb, il ne pourrait jamais décoller du sol (figure 1.2(e)).

Les propriétés évoquées dans cette section ne sont pas les seules propriétés mécaniques, mais ce sont les plus importantes. Nous allons les rencontrer, ainsi que d'autres, dans les chapitres 4 à 11.

Propriétés thermiques Les propriétés d'un matériau changent avec la température, cette évolution étant généralement synonyme de détérioration. La résistance du matériau chute,

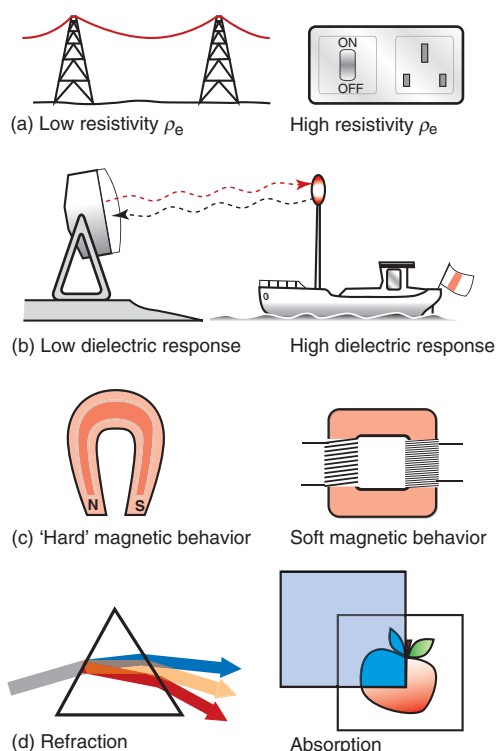


Figure 1.4 Propriétés électriques, magnétiques et optiques.

il commence à «fluer» (s'affaïsser lentement avec le temps), il peut s'oxyder, se dégrader ou se décomposer (figure 1.3(a)). Par conséquent, il existe une température limite appelée la *température maximale d'utilisation*, $T_{\max}$, au-dessus de laquelle son utilisation est impossible. L'acier inoxydable possède une température $T_{\max}$ élevée, il peut être utilisé jusqu'à des températures de 800 °C, alors que la majorité des polymères ont une température $T_{\max}$ faible et ne sont que rarement utilisés au-dessus de 150 °C.

La plupart des matériaux se dilatent lorsqu'ils sont chauffés, mais d'une quantité variable en fonction de leur coefficient d'expansion thermique, α . La dilatation est faible mais ses conséquences peuvent toutefois être importantes. Considérons par exemple un cylindre contraint entre deux parois, comme illustré sur la figure 1.3(b). Lorsque ce cylindre est chauffé, la restriction de son expansion par les parois peut provoquer son flambage. Les voies ferrées flambent de cette manière si des dispositions ne sont pas prises pour tenir compte de cet effet.

D'autre part, certains matériaux, les métaux par exemple, sont ressentis comme froids alors que d'autres comme le bois semblent chauds. Cette sensation fait intervenir deux propriétés

thermiques du matériau: la *conductivité (ou conductibilité) thermique* et la *chaleur spécifique (ou capacité thermique)*. La première, la conductivité thermique, λ , mesure la capacité d'un matériau à transférer la chaleur lorsqu'un de ses côtés est chaud alors que l'autre est froid. Les matériaux avec une valeur élevée de λ sont utilisés lorsqu'on désire transmettre la chaleur d'un endroit à un autre, comme pour les casseroles, les radiateurs ou les échangeurs de chaleur; la figure 1.3(c) illustre les effets d'une valeur de λ faible ou élevée dans le cas d'une casserole. Cependant, une faible conductivité est aussi utile: les matériaux avec une valeur faible de λ permettent d'isoler les bâtiments, de réduire la consommation énergétique des réfrigérateurs et des congélateurs, et rendent également possible le retour des engins spatiaux dans l'atmosphère terrestre.

Ces applications concernent des flux de chaleur constants, sur des longues durées. Lorsque le temps est limité, c'est la seconde propriété, à savoir la *chaleur spécifique* C_p , qui est importante. Elle mesure la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un matériau d'une certaine quantité. Les matériaux avec une capacité calorifique élevée, le cuivre par exemple, demandent une grande quantité de chaleur pour que leur température change; les matériaux avec une capacité calorifique faible, comme les mousses polymères, en demandent beaucoup moins. Un flux constant de chaleur, comme nous l'avons dit, fait intervenir la conductivité thermique. Mais il y a également une propriété plus subtile qui décrit ce qui se passe dans les premiers instants suivant l'application d'une source de chaleur. Considérons la situation de la figure 1.3(d), où le gaz est allumé sous une plaque froide au-dessus de laquelle une boule de crème glacée (parfum lime dans ce cas) est disposée. Peu après avoir allumé le gaz, la face inférieure de la plaque est chaude mais le reste est encore froid. Après un moment, le centre de la plaque devient chaud, puis, encore plus tard, la face supérieure commence à chauffer et la crème glacée commence à fondre. Combien de temps cela prend-il? Pour une épaisseur donnée de plaque, le temps est inversement proportionnel à la *diffusivité thermique* a du matériau dont la plaque est faite. La diffusivité diffère de la conductivité car la capacité calorifique des matériaux est différente. En fait, elle est proportionnelle à λ/C_p .

Il y a d'autres propriétés thermiques, nous les rencontrerons dans les chapitres 12 et 13, mais nous en restons là pour l'instant et tournons notre attention vers les aspects électriques, magnétiques et optiques des matériaux.

Propriétés électriques, magnétiques et optiques Commençons avec la conduction et l'isolation électrique (figure 1.4(a)). Sans conduction électrique, nous n'aurions pas facilement accès à la lumière, à la chaleur, à l'électricité, au contrôle et aux communications, ce que nous considérons comme acquis aujourd'hui. Les métaux sont des bons conducteurs, le cuivre et l'aluminium étant les meilleurs parmi ceux à un prix abordable. Mais la conduction n'est pas toujours une bonne chose. Les boîtes à fusibles, les boîtiers d'interrupteurs ou les suspensions des lignes à haute tension requièrent des isolants qui, outre cette propriété, doivent être capables de supporter une certaine charge mécanique, de tolérer la chaleur et de supporter une étincelle s'il s'en produisait une. Dans ce cas, la propriété importante est la *résistivité*, ρ_e , qui est l'inverse de la conductivité électrique, κ_e . La plupart des plastiques et le verre ont une résistivité élevée (figure 1.4(a)) et sont utilisés comme isolants. Il est possible néanmoins de les rendre quelque peu conducteurs par des traitements spéciaux.

La figure 1.4(b) illustre d'autres propriétés électriques: la capacité de permettre le passage

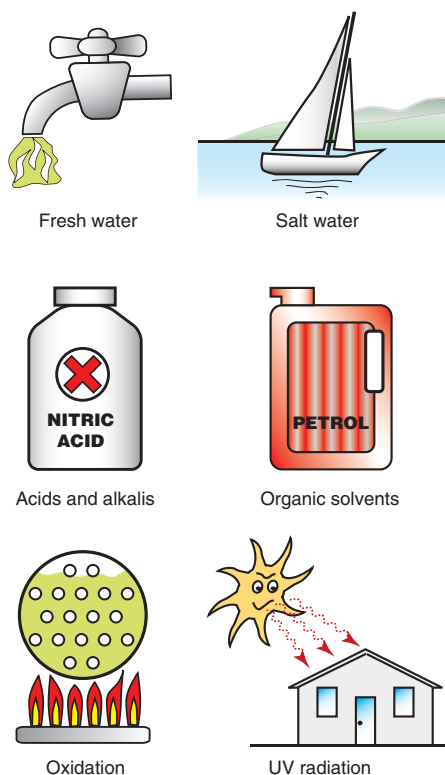


Figure 1.5 Propriétés chimiques: résistance à l'eau, aux acides, aux alcalis, aux solvants organiques, à l'oxydation ainsi qu'aux radiations.

d'ondes électromagnétiques micrométriques (micro-ondes), comme pour le dôme protégeant une antenne radar (radôme), ou alors de les réfléchir, comme dans le cas du réflecteur d'un bateau. Tous les deux font intervenir les propriétés *diélectriques*, et en particulier la *constante diélectrique*, ϵ_D . Les matériaux possédant une constante diélectrique élevée répondent à un champ électrique par un déplacement de leurs électrons, en réorientant même leurs molécules, alors que ceux avec une valeur faible de ϵ_D sont peu sensibles au champ. Nous explorerons cela, ainsi que d'autres propriétés électriques, dans le chapitre 14.

L'électricité et le magnétisme sont étroitement liés. Les courants électriques induisent des champs magnétiques et un aimant mobile induit un courant électrique dans tout conducteur à proximité. La réponse de la plupart des matériaux aux champs magnétiques est trop faible pour avoir une valeur pratique. Mais certains matériaux, dits ferromagnétiques et ferrimagnétiques, ont la capacité d'être aimantés de manière permanente. Ils sont appelés aimants «durs» car, une fois magnétisés, il est difficile de les démagnétiser. Ils sont utilisés en tant

qu'aimants permanents dans les écouteurs, les moteurs et les dynamos. Dans ce cas, la propriété clé est l'*aimantation rémanente*, une mesure de l'intensité du magnétisme résiduel. D'autres matériaux, les aimants «doux», sont facilement magnétisés et démagnétisés. Ils servent à fabriquer les noyaux des transformateurs et les bobines de déflexion des anciens tubes cathodiques. Ils ont la capacité de conduire un champ magnétique, mais sans le retenir en permanence (figure 1.4(c)). La propriété clé de ces matériaux est l'*aimantation à saturation*, qui mesure l'importance du champ que ceux-ci peuvent transmettre. Nous rencontrons à nouveau ces aspects dans le chapitre 15.

Les matériaux réagissent non seulement à l'électricité et au magnétisme, mais également à la lumière, ce qui n'est pas très surprenant étant donné que la lumière elle-même est une onde électromagnétique. Les matériaux opaques *réfléchissent* la lumière, ou l'absorbent sur des épaisseurs extrêmement faibles, alors que ceux qui sont transparents la *réfractent*. Les matériaux peuvent *absorber* ou réfléchir sélectivement certaines longueurs d'ondes, leur donnant ainsi divers aspects colorés (figure 1.4(d)). Ces aspects seront explorés plus en profondeur dans le chapitre 16.

Propriétés chimiques Les produits doivent souvent fonctionner dans des environnements hostiles, exposés à des fluides corrosifs, à des gaz chauds ou à des radiations. L'air humide ainsi que l'eau sont corrosifs. La sueur est également particulièrement corrosive et il existe bien sûr des environnements beaucoup plus agressifs. Pour survivre tout au long de sa période d'utilisation, un produit doit être constitué de matériaux (ou du moins revêtu de matériaux) capables de tolérer les milieux dans lesquels il fonctionne. Quelques exemples de milieux hostiles, parmi les plus communs, sont représentés en figure 1.5: l'eau douce ou salée, les acides et les alcalis, les solvants organiques, les flammes oxydantes et le rayonnement ultraviolet. Nous considérons la résistance intrinsèque d'un matériau à chacun de ces environnements comme étant des propriétés du matériau, mesurées sur une échelle allant de 1 (très faible) à 5 (très bonne). Le chapitre 17 traitera de la durabilité d'un matériau.

1.3 Propriétés limitant la conception

La performance d'un composant est limitée par certaines des propriétés du matériau dont il est fait. Pour atteindre un niveau désiré de performance, les propriétés limitant la conception doivent donc satisfaire certains critères et les matériaux dont les propriétés ne répondent pas à ces exigences sont inadéquats. Sur le dessin de la figure 1.2, la rigidité, la résistance et la ténacité limitent la conception: si une de ces propriétés est trop faible, l'avion ne volera pas. Pour la conception de lignes électriques, la résistivité électrique est limitante alors que pour la conception d'objectifs, c'est la qualité optique et l'indice de réfraction qui le sont.

Le choix des matériaux commence donc par l'identification des propriétés limitant la conception. Des valeurs limites sont ensuite fixées et permettent d'exclure les matériaux qui ne remplissent pas ces critères (chapitre 3). Les procédés ont également des propriétés, bien que nous ne les ayons pas encore rencontrées. Celles-ci aussi peuvent limiter la conception, amenant par conséquent à un schéma parallèle de sélection pour trouver un procédé qui soit viable (chapitres 18 et 19).

1.4 Résumé et conclusions

Pour un ingénieur la conception dépend des *matériaux*, lesquels sont mis en forme, assemblés et finalisés par des *procédés*. Les exigences de conception définissent la performance requise et sont exprimées comme des valeurs cibles pour certaines *propriétés limitant la conception*. Un matériau est choisi parce que, d'une part, ses propriétés satisfont ces objectifs et, d'autre part, il est compatible avec les procédés requis pour la mise en forme, l'assemblage et les finitions.

Ce chapitre a introduit certaines des propriétés limitant la conception: des *propriétés physiques* (comme la densité), des *propriétés mécaniques* (comme le module et la limite élastiques) et des *propriétés fonctionnelles* (celles décrivant le comportement thermique, électrique, magnétique et optique). Nous examinerons plus en profondeur toutes ces propriétés dans les chapitres suivants, mais nous pouvons pour l'instant continuer avec les notions introduites dans ce chapitre et nous tourner vers les matériaux eux-mêmes: les familles, les classes et leurs membres.

1.5 Lectures complémentaires

L'histoire et l'évolution des matériaux

Singer, C., Holmyard, E. J., Hall, A. R., Williams, T. I., & Hollister-Short, G. (Eds.), (1954–2001). *A History of Technology*. (21 volumes), Oxford, UK: Oxford University Press. ISSN 0307-5451. (*Une compilation d'essais sur des aspects technologiques, incluant les matériaux.*)

Delmonte, J. (1985). *Origins of Materials and Processes*. Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Company. ISBN 87762-420-8. (*Une synthèse des informations sur les matériaux dans l'ingénierie, documentant leur historique.*)

Tylenoate, R. F. (1992). *A History of Metallurgy* (2nd ed.). London, UK: The Institute of Materials. ISBN 0-904357-066. (*Une immersion totale dans l'historique de l'extraction et de l'utilisation des métaux de -6000 à 1976, par un auteur doté d'un talent scientifique et d'un amour du détail.*)

1.6 Exercices

Exercice E1.1 Utiliser Google pour trouver l'histoire et les utilisations d'un des matériaux suivants:

- L'étain.
- Le verre.
- Le ciment.
- Le titane.
- Les fibres de carbone.

Présenter les résultats sous forme d'un court rapport d'environ 100 à 200 mots (environ une demi-page).

- Exercice E1.2** Qu'entend-on par *propriétés limitant la conception* d'un matériau pour une application donnée?
- Exercice E1.3** Les tentatives de fabriquer et commercialiser des vélos en plastique furent nombreuses. Cependant, tous les modèles ainsi réalisés se sont avérés trop flexibles. Quelle propriété limitant la conception n'est pas suffisamment élevée?
- Exercice E1.4** Quelles sont, selon vous, les propriétés d'un matériau limitant la conception de la lame d'un couteau destiné à l'éviscération de poissons?
- Exercice E1.5** Quelles sont, selon vous, les propriétés d'un matériau limitant la conception d'un gant de cuisine?
- Exercice E1.6** Quelles sont, selon vous, les propriétés d'un matériau limitant la conception d'un filament de lampe électrique?
- Exercice E1.7** Un matériau est recherché pour fabriquer un tuyau servant à transporter de l'essence depuis un réservoir jusqu'au carburateur d'une tondeuse. La conception nécessite que le tuyau puisse être plié et que l'essence soit visible. Lister les propriétés qui selon vous limitent la conception.
- Exercice E1.8** Un matériau est recherché pour réaliser un aimant pour un support magnétique de savon. Le savon est légèrement basique. Lister les propriétés qui selon vous limitent la conception.
- Exercice E1.9** Les boîtiers dans lesquels la plupart des CD sont vendus ont une fâcheuse tendance à se fissurer et à casser. Quelle propriété limitant la conception a été négligée dans le choix du matériau dont ils sont faits?
- Exercice E1.10** Lister trois applications qui, selon vous, nécessitent une rigidité élevée et un faible poids.
- Exercice E1.11** Lister trois applications qui, selon vous, nécessitent un verre de qualité optique.