

INTRODUCTION GENERALE

A.-F. GOURGUES-LORENZON

La plupart des objets qui nous entourent ont été façonnés par l'homme. Celui-ci leur a donné une composition, une consistance, une forme, une couleur... propre à leur usage. On voit généralement bien l'objet... mais dès qu'une défaillance apparaît, se révèle rapidement le matériau, c'est-à-dire l'objet en tant que matière structurée, possédant telle ou telle propriété de solidité, d'aptitude à la déformation, de tenue à la corrosion, etc.

L'étude des matériaux est par nature interdisciplinaire, les propriétés des matériaux étant gouvernées par des phénomènes physiques, chimiques, mécaniques... Elle se situe à la frontière entre les domaines plus fondamentaux de la physique du solide, de la mécanique des milieux continus, des mathématiques... et la démarche pragmatique utilisée en conception ou en évaluation des coûts.

Loin de considérer le matériau comme source de tous les maux (tout comme la technique ne se résume pas aux « incidents techniques » !), l'ingénieur doit « comprendre pour maîtriser ». C'est l'objectif des enseignements de Sciences et Génie des Matériaux. Ce site présente les éléments les plus utiles à la formation d'un futur ingénieur. Il est dérivé d'un cours de tronc commun destiné aux élèves de deuxième année du cycle Ingénieurs Civils de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Il s'adresse plus généralement à un public connaissant, au moins dans leur principe, les lois de base de la physique et de la mécanique des milieux continus et maîtrisant les principaux outils mathématiques nécessaires au métier d'ingénieur.

La subdivision en chapitres correspond aux séances de cours ou de travaux dirigés. La numérotation des chapitres a régulièrement changé, il est inutile d'en tenir compte, le visiteur se référera aux différents onglets du site. A titre d'information, l'ordre des séances est donné pour l'année en cours.

Après une introduction présentant les concepts de base, les chapitres retracent l'histoire d'un matériau en passant par son élaboration et la constitution de sa structure interne appelée « microstructure ». On aborde ensuite les propriétés d'usage (fondements physique des lois de comportement mécanique) et la tenue en service. L'ensemble se termine par des études de cas, les annales corrigées des examens passés, une liste des notations utilisées et un glossaire.

STRUCTURE DES MATERIAUX : LES CONCEPTS DE BASE

Dans un premier chapitre, on présente les « briques » à la base de la structure des matériaux, en suivant la gamme des échelles de distances, depuis l'échelle atomique jusqu'à celle de l'objet. Les principaux « défauts » de ces structures sont également décrits. Le chapitre est clos par une synthèse comparative des propriétés des grandes familles de matériaux, qui sont liées à celles des liaisons atomiques. La suite de l'ouvrage montrera comment, en « remontant » les diverses échelles, on peut déduire les propriétés d'un composant à partir de celles de ses éléments constitutifs. Une série d'exercices détaillée, sous la forme de travaux (très) dirigés, quelques éléments de cristallographie indispensables à l'étude de la plupart des matériaux.

ELABORATION : OBTENTION DE LA MATIERE

Un chapitre décrit la mise en œuvre des matériaux non organiques (alliages métalliques et matériaux céramiques). Dans une première partie, descriptive, consacrée à l'élaboration, on aborde le domaine des céramiques (ce qui permet, au passage, de décrire ce que sont un béton, une brique, un verre...), puis celui des alliages métalliques. Le chapitre se poursuit par la présentation des outils quantitatifs fondamentaux pour la compréhension des procédés d'élaboration et de la structure interne des matériaux, à savoir les diagrammes d'équilibre thermodynamique, la prise en compte des interfaces et les principales lois régissant la diffusion et la cinétique des transformations de phase.

Un deuxième chapitre est consacré à la synthèse chimique et à la classification des polymères dont on précise, au préalable, la structure particulière.

Les chapitres suivants sont consacrés à la mise en forme à partir de l'état fondu. Il est en effet commode d'élaborer la matière à haute température, pour des raisons évidentes liées à la thermodynamique et à la cinétique. Il faut ensuite refroidir le produit, ce qui conduit généralement au passage à l'état solide et à la

formation d'une première microstructure. Dans de nombreux cas (et en particulier pour les polymères), on profite de cette étape pour conférer à l'objet sa forme quasiment définitive.

Une ouverture vers la modélisation est donnée avec une introduction à la dynamique moléculaire et aux méthodes utilisées pour faire le pont entre la physique des particules et la physique des matériaux.

Une série d'exercices aborde la pratique des diagrammes d'équilibre thermodynamiques des systèmes à plusieurs constituants. Après quelques exercices simples, un problème plus conséquent sur les alliages de brasage et un autre sur les alliages d'aluminium permettent de traiter quelques implications concrètes des changements de phase. S'y ajoutent quelques exercices sur la solidification et la cinétique des transformations de phase.

MICROSTRUCTURE : DE LA MATIERE AU MATERIAU

Les éléments de la structure interne d'un matériau forment ce qu'on appelle sa microstructure (organisation des cristaux, des phases...). Deux chapitres décrivent les différents éléments de la microstructure avec leurs échelles de taille caractéristiques (s'étendant sur plus de dix ordres de grandeur !). A titre indicatif, on a ajouté une aide à la sélection de méthodes expérimentales de caractérisation. Quelques exemples détaillés (en particulier à propos d'alliages métalliques) montrent comment, par l'optimisation des microstructures, on obtient des matériaux de plus en plus performants.

Deux TD présentent quelques exercices d'application, de difficultés inégales.

DEFORMATION : QUELLE PHYSIQUE DERRIERE LES LOIS DE COMPORTEMENT MACROSCOPIQUE ?

Il s'agit ici de comprendre comment on peut maîtriser la microstructure du matériau en vue d'optimiser telle ou telle propriété de l'objet. On s'attache aux propriétés mécaniques, qui sont des atouts et faiblesses critiques (avec le prix) de la plupart des matériaux « de structure ».

Un premier chapitre présente les mécanismes physiques de la déformation, en lien avec la microstructure ; c'est le point de vue « matériau » appliqué à la mécanique des solides déformables. On aborde ensuite, dans un deuxième chapitre, les conséquences sur le comportement « macroscopique » des matériaux non organiques, avec leurs justifications physiques. Un troisième chapitre traite ces mêmes points à propos des polymères.

Le chapitre suivant aborde spécifiquement l'optimisation de la microstructure, ou « comment obtenir le meilleur matériau possible » vis-à-vis d'une propriété mécanique donnée. Il décrit les différents moyens d'optimiser la rigidité ou la dureté d'un matériau en utilisant tous les leviers de la microstructure.

Un dernier chapitre est consacré au comportement à chaud des alliages métalliques et des céramiques. Il aborde à la fois les mécanismes de déformation qui entrent en jeu à température « élevée » et les phénomènes de viscosité qui en résultent à l'échelle macroscopique. Une première ouverture sur l'estimation de la durée de vie est donnée à cette occasion.

Une large série d'exercices est proposée. Les deux premiers chapitres sont consacrés à l'étude expérimentale de la déformation des polymères. Le premier aborde notamment l'exploitation de l'essai « ultra-classique » de traction simple à la fois en termes de protocole expérimental et de mécanismes physiques sous-jacents. Le deuxième est une application pratique sur la mise en forme des bouteilles « plastiques » : on montre comment la fabrication d'un objet apparemment simple et de très faible valeur marchande met en œuvre des phénomènes physiques complexes.

Le chapitre suivant aborde l'évolution de la microstructure lors de la mise en forme d'un alliage métallique. Deux chapitres sont ensuite consacrés aux moyens pratiques d'obtention de ces microstructures, que ce soit « in situ » par traitement thermique ou par mélange de constituants au sein d'un composite. On y utilise notamment les diagrammes d'équilibre, les lois de cinétique, les éléments de la microstructure. Un dernier chapitre montre la compétition entre mécanismes de déformation dans le cadre du fluage d'un alliage pour convertisseur catalytique automobile.

DIMENSIONNEMENT : LA TENUE EN SERVICE DES MATERIAUX

Il est évident que le coût d'un objet ne se limite pas au coût d'achat et qu'un « bon » produit doit avoir une durée de vie contrôlée et ajustée, autant que possible, au besoin du client. Cette partie du cours aborde, dans une optique « ingénieur », le dimensionnement pour la tenue en service de pièces de structure :

- la résistance à la rupture brutale,
- la fissuration en fatigue, qui est à l'origine de la plupart des défaillances « mécaniques » ;
- la dégradation par les surfaces (usure, corrosion), qui représente une perte annuelle de plusieurs pour-cent du produit intérieur brut.

A chaque chapitre de cours correspond un TD sur une application pratique, qui aboutit à des lois de dimensionnement ou à des conséquences sur le choix des matériaux. On y traite de la rupture d'un pipeline, de la corrosion des aciers inoxydables, de la sélection des matériaux, de dimensionnement en fluage, de l'expertise de la tenue en fatigue d'un élastomère pour pneumatiques et enfin de dimensionnement en « tolérance au dommage » d'un alliage pour fuselage aéronautique. A contrario, un chapitre montre comment, en considérant le matériau comme une « boîte noire » et à l'aide de modèles très simples, on peut envisager une solution optimisée à un problème de conception.

SYNTHESE : ETUDES DE CAS

L'ensemble des connaissances exposées dans les chapitres précédents est mobilisé dans des études de cas centrées sur des applications pratiques. Cette partie du cours sera enrichie d'une année sur l'autre. On y aborde l'élaboration, la microstructure et les propriétés des matériaux pour culasses de moteur automobile, pour piles à combustible à oxyde solide et pour conduite d'adduction d'eau.