

Chapitre I

Description générale de la matière

Pour que la matière ait tant de pouvoir, il faut qu'elle contienne un esprit.

(La Tentation de Saint Antoine)

GUSTAVE FLAUBERT

Sommaire

1	Les grandes familles usuelles de matériaux	1
2	Propriétés de la matière	3
2.1	La matière à l'échelle macroscopique	3
2.2	La matière à l'échelle microscopique	12
3	L'observation de la matière	18
3.1	Force caractéristique de la matière : force et champ Coulombien	18
3.2	Énergie caractéristique de la matière : potentiel Coulombien et énergie potentielle	19
3.3	Énergies caractéristiques de la matière	24
3.4	Ondes	25
4	Premières modélisations de l'interaction rayonnement-matière (1898-1904)	31
4.1	Modèle de Thomson (1898)	31
4.2	Modèle de Nagaoka-Perrin-Rutherford (1901-1904)	31
5	La matière : un résonateur (1900-1905)	33
5.1	Amortissement : modèle de Drude (1900)	39
5.2	Modèle de Lorentz(1905)	40

Dans ce chapitre, nous introduisons la matière par le biais de ses propriétés connues et utilisables dans la vie courante. Les connaissances nécessaires pour aborder cette partie sont celles acquises au lycée. Le problème de la modélisation de la matière y est posé.

1 Les grandes familles usuelles de matériaux

Sous l'appellation matériaux, on désigne souvent des composés trouvés à l'état solide à température ambiante. On peut étendre la notion de matériau à tout composé chimique,

puisque selon la température tout matériau peut se trouver dans les états solide, liquide ou gazeux. Les matériaux que nous rencontrons dans notre vie quotidienne sont très divers et nous leur donnons souvent des dénominations assez réductrices, celles-ci ne reflétant qu'une partie de leur nature et de leurs propriétés. La dénomination usuelle des matériaux montre déjà la variété de l'objet de notre propos :

- métaux
- semiconducteurs
- plastiques
- caoutchoucs
- céramiques
- verres
- béton
- composites
- tissus
- papier
- bois...

Évidemment, cette liste n'est nullement exhaustive et chacun pourrait la compléter comme il le souhaite. Maintenant interrogeons-nous sur la signification de ces noms et sur la réalité des matériaux qu'ils désignent. Sont-ils véritablement représentatifs du matériau lui-même ?

Prenons par exemple un métal. Celui-ci est reconnaissable par son aspect brillant et réfléchissant. Il est froid au toucher, mais si on le chauffe, nous pouvons remarquer que sa température augmente très rapidement et dans tout le matériau. Nous pouvons également constater en le branchant dans un circuit électrique qu'il conduit bien le courant...

En fait, le terme de métal, même s'il nous évoque l'ensemble de ces propriétés, n'est pas significatif de toutes celles-ci. Ainsi, une surface peut réfléchir la lumière sans pour autant être un métal (l'eau, les verres...). Par contre, les métaux conduisent en général assez bien le courant électrique. C'est en fait ce seul paramètre qui permet de définir un métal, les autres propriétés étant une conséquence de la nature métallique du matériau. En effet, le courant électrique (qui correspond à un déplacement de charges dans un milieu) circule aisément dans un métal car au sein de celui-ci, il existe des électrons très peu liés aux atomes. Les métaux auront donc une grande conductivité électrique. De plus, ces électrons peuvent jouer d'autres rôles dans le matériau. Ainsi, ils permettent également un transport aisé de la chaleur (transfert thermique rapide dans le métal). Ils empêchent les ondes électromagnétiques et donc la lumière de pénétrer dans le métal (épaisseur de peau) le rendant ainsi réfléchissant.

Les propriétés évoquées pour le métal dépendront donc essentiellement de la répartition des électrons dans le matériau et donc de sa structure électronique qui est elle-même fortement dépendante de la structure atomique du matériau. Toutes ces propriétés dépendent de la pulsation du rayonnement d'éclairage. Un rayonnement visible peut révéler le comportement métallique d'un matériau alors qu'un rayonnement infrarouge ou ultraviolet le verront transparent.

Dans le cas des plastiques, la terminologie est encore plus réductrice. En effet, pour nous, un plastique signifie un matériau léger, facile à tordre, qui fond à basse température et ne conduit pas le courant. Pourtant, le terme plastique ne concerne que les aspects mécaniques du matériau. Ainsi, un matériau est dit plastique (voir section 5 pages 273 et suivantes) quand celui-ci se déforme de manière irréversible lorsqu'il est soumis à une action

mécanique (traction, compression, torsion...). Ce comportement est effectivement celui de la plupart des plastiques. En fait, les plastiques sont un assemblage de longues molécules appelées polymères (contenant jusqu'à plusieurs milliers d'atomes) qui peuvent se déplacer (glisser) facilement les unes par rapport aux autres, ce qui explique la facilité que nous avons à les déformer. De plus, les électrons sont fortement localisés dans les liaisons covalentes du polymère et ils ne peuvent pas se déplacer facilement. Les polymères ne sont en général pas conducteurs d'électricité¹.

Le terme « plastique » n'est représentatif que d'une seule propriété mécanique. Malgré tout, cette dernière est fortement révélatrice de la structure du matériau (chaînes polymères peu liées) et donc de l'ensemble de ces propriétés.

Les matériaux ont donc une nature et des propriétés complexes qu'on ne peut expliquer qu'en étudiant leur structure. Il faudra les modéliser afin de comprendre l'origine de ses propriétés. Pour illustrer la complexité des propriétés, donnons-en d'abord une description simplifiée.

2 Propriétés de la matière

Les propriétés de la matière sont en général caractérisées au niveau macroscopique mais résultent de phénomènes qui doivent être décrits à l'échelle microscopique.

2.1 La matière à l'échelle macroscopique

Propriétés gouvernées par la structure des matériaux

Chaque matériau est d'abord caractérisé par la nature de ses constituants. Ainsi, le fer seul est un métal alors que le simple apport d'oxygène va provoquer la formation d'oxyde de fer (plus connu sous le nom de rouille) dont les propriétés sont bien différentes de celles d'un métal. Le matériau peut être constitué d'un seul élément (un seul atome, une seule molécule...) ou bien de plusieurs (plusieurs phases, matériau composite...). Dans ce dernier cas, les propriétés sont une « moyenne » des propriétés de chaque partie. L'existence de plusieurs constituants, même en très faible quantité, peut complètement changer les propriétés de la matière.

Les constituants du matériau étant connus, leur arrangement spatial va aussi jouer un grand rôle dans ses propriétés. Par exemple, le carbone présente deux structures cristallines différentes : le graphite (que vous retrouvez dans la mine de vos crayons à papier ou dans le charbon) et le diamant. Dans les deux cas, il n'y a que du carbone mais il peut soit former une structure hexagonale lamellaire (graphite) soit une structure cubique face centrée tridimensionnelle (diamant). Nous avons dans les deux cas le même élément chimique, et pourtant les deux matériaux ont des propriétés complètement différentes : le graphite est friable (structure lamellaire), conducteur d'électricité, bon conducteur thermique et de couleur noire alors que le diamant est très dur (c'est pour le moment le matériau naturel le plus dur connu), isolant électrique et thermique, et transparent. Nous avons

¹Découverts à la fin des années 70, certains polymères peuvent être conducteurs, comme les polyacétylènes ou les polythiophènes, par la délocalisation des électrons le long de la chaîne polymérique. Leur conductivité électrique est comprise entre 10^{-8} et $10^5 \text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, cette dernière valeur étant comparable à la conductivité électrique du fer. La découverte et l'étude des polymères dits conducteurs valurent à A.J. Heeger, A.G. Mac Diarmid et H. Shirakawa le prix de Nobel de chimie en 2001.

donc bien des propriétés mécaniques, électriques, thermiques et optiques complètement différentes (voire opposées) et ces différences sont dues à la structure du matériau et non à sa composition chimique.

Nature et structure gouvernent donc les propriétés de la matière. Il faut donc être capable :

- de connaître les composants constituant la matière (atomes, molécules, formule chimique),
- de connaître leur arrangement spatial (structure cristalline, quasi-cristalline, amorphe...)

Le passage d'une structuration à l'échelle microscopique (liaisons et arrangements atomiques) à une structuration à l'échelle macroscopique est également essentiel pour la connaissance des propriétés. Ce sont les propriétés à l'échelle microscopique (densité d'électrons, répartition et localisation électronique) qui expliquent les propriétés à l'échelle macroscopique (conductivités électrique et thermique, résistance mécanique, aimantation...) Il est donc nécessaire d'étudier l'atome pour connaître la matière. Ébauchons d'abord une première classification des matériaux.

Les corps purs

Il existe des atomes naturels et des atomes artificiels (c'est-à-dire produits par l'homme) comme le plutonium mais qui ont une durée de vie limitée (on pourra consulter le chapitre B, page 323 pour plus d'informations). Nous connaissons donc plus d'une centaine d'éléments chimiques. Ces éléments vont former les corps purs qui contiennent uniquement l'élément considéré.

Le dioxygène composé de deux atomes d'oxygène : O_2 , le diazote N_2 , le graphite ou le diamant composé uniquement de carbone C, le fer pur, l'or pur etc... sont des corps purs. Ils contiennent souvent des impuretés en quantités infimes et ils ne constituent qu'un nombre limité de matériaux. Par exemple le dioxyde de carbone CO_2 , l'eau H_2O ou le sel NaCl ne sont pas des corps purs.

Un constituant : polymères, métaux, céramiques, verres

Les matériaux sont le plus souvent constitués de plusieurs éléments chimiques. Il est même nécessaire de mélanger des éléments pour renforcer les propriétés du matériau. Ainsi, l'or est trop mou pour être utilisé tel quel dans les bijoux. Un bijou ne contient en réalité que 75 % d'or, 16 % d'argent et 9% de cuivre pour le durcir². De la même manière, les aciers ne sont pas du fer pur, mais un mélange de fer avec quelques % de carbone pour renforcer ses propriétés mécaniques. En y ajoutant du chrome ou du nickel, il peut être rendu inoxydable. On peut également contrôler la conductivité électrique du silicium (ou de semiconducteurs) utilisé dans les composés électroniques en y ajoutant des quantités mesurées d'impuretés et créer des jonctions électroniques et donc des diodes, des transistors...

La composition d'un matériau est donc souvent un mélange de plusieurs éléments chimiques. On parle alors d'alliages (mélange stable contenant plusieurs éléments chi-

²En joaillerie, la pureté de l'or est mesurée en carats. Un carat représente une proportion d'or de $1/24^e$ de la masse de l'alliage. Ainsi, l'or à 24 carats est pur alors que l'or à 18 carats, couramment utilisé dans les bijoux ne contient que 75% d'or en masse.

miques, ex : Fe-C, Ni-Cr...) et de phases. Une phase est une structure stable d'un alliage obtenu pour une composition chimique précise (le graphite et le diamant sont des phases stables du carbone, le fer a deux phases stables : l'austénite qui est une structure cubique faces centrées et la ferrite qui est cubique centrée). **Un matériau ne contenant qu'une seule phase est alors appelé monphasé et est considéré comme ne contenant qu'un seul constituant.** Ces notions d'alliages et de phases s'appliquent essentiellement aux cristaux et aux structures ordonnées et donc aux trois grandes familles de matériaux : les métaux (Fer, Nickel, Cobalt, Or, Argent, Platine, Cuivre...), les semiconducteurs (Silicium, Gallium-Arsénide, Germanium...) et les céramiques qui présentent de telles caractéristiques structurales.

Les semiconducteurs ont des conductivités électriques inférieures à celles des métaux. Mais en introduisant des dopants (éléments chimiques étrangers donnant ou captant des électrons), il est possible de contrôler leurs propriétés électriques. Ils sont à la base de toute la microélectronique. On parle parfois de nouvelle révolution industrielle avec l'arrivée de la technologie silicium.

Les céramiques sont constituées de composés définis en proportion stoechiométrique (rapport entier entre les quantités de chaque élément) formant des structures ordonnées infinies comme un grand nombre d'oxydes : TiO_2 , SiO_2 (quartz ou silice), YBaCuO (matériau supraconducteur)... Ces matériaux sont en général isolants et résistent aux très hautes températures.

Par contre, les atomes ne s'associent pas obligatoirement en structures périodiques infinies comme dans les cristaux. Ils peuvent également s'associer en molécules (H_2O , CO_2 , CH_4 ...) pour former des composés définis stables pour lesquels la quantité de chaque élément ne peut être changée sous peine de modifier la molécule. Les molécules sont souvent formées des éléments chimiques les plus légers : H, C, O, N qui sont à la base de la chimie organique. La souplesse des liaisons que peut former le carbone avec d'autres atomes permet à une très large variété de structures moléculaires d'exister et de former des molécules très complexes pouvant contenir plusieurs centaines ou milliers d'atomes (molécules d'ADN). Si ces molécules forment de longues chaînes reproduisant un motif (CH_2 , CF_2 ...) un grand nombre de fois, nous sommes en présence d'un polymère (reproduction à l'infini d'un motif appelé monomère).

Ces molécules peuvent alors former des solides en s'agrégeant les unes avec les autres. On parle alors de matériaux moléculaires. Dans la plupart des cas, les liaisons de la molécule étant saturées, c'est-à-dire qu'il n'existe plus d'électrons « libres » pour former de nouvelles liaisons avec de nouveaux éléments chimiques, les molécules sont liées entre elles par des interactions électrostatiques faibles (interaction de Van der Waals (voir page 172)). Ces interactions ayant une faible énergie, elles peuvent se briser facilement ce qui explique les faibles températures de fusion et la faible résistance de ces matériaux, les molécules « glissant » sans trop de difficulté les unes sur les autres. C'est pour cette raison que les matériaux polymères constitués de longues chaînes d'atomes ont été appelés matériaux plastiques.

Nous pouvons définir un dernier type de matériau, à un seul constituant. Ce dernier n'est pas lié à la composition du matériau mais à sa structuration. En effet, nous avons vu que des composés définis et des alliages peuvent former des cristaux dans le cas des céramiques, des métaux et des semiconducteurs. Mais ceux-ci peuvent également former des structures désordonnées, c'est-à-dire des structures ne conservant pas d'ordre à longue distance tout en conservant la structure à courte distance du composé défini. Lorsque

le matériau présente une telle structuration désordonnée, il se forme une structure dite vitreuse, amorphe et par extension un verre. Par analogie, le verre est comparable à un liquide qui s'est figé ou qui a une viscosité tellement grande que les composés ne peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres. Ainsi, la silice, SiO_2 , peut aussi bien avoir une structure cristalline, le quartz, qu'une structure désordonnée et former le verre de nos vitres. Tous les matériaux (métaux, céramiques ou polymères) peuvent former un verre si le refroidissement de leur phase liquide est suffisamment rapide pour « figer » la structure désordonnée du liquide.

Comme nous l'avons vu, la plupart des matériaux n'est constituée que d'un seul élément : un alliage avec une seule phase spécifique ou un seul composé défini pour les cristaux, un seul type de molécules pour les matériaux moléculaires...

Plusieurs constituants : les matériaux composites

De la même manière que dans un seul composé défini ou une seule phase, il est possible de mélanger plusieurs éléments chimiques, nous pouvons mélanger plusieurs phases ou plusieurs composés définis différents. Dans ce cas, nous formons des matériaux composites polyphasés ou contenant plusieurs constituants. La combinaison des deux matériaux permet de renforcer l'un par rapport à l'autre. Le matériau renforcé est appelé matrice dans laquelle est dispersée le deuxième matériau qui est appelé renfort. Le renfort va alors permettre d'améliorer les propriétés de la matrice (résistance mécanique, conductivité électrique...) tout en conservant en partie ses avantages (souplesse, plasticité, légèreté...). Le matériau composite a des propriétés qui sont alors une moyenne des propriétés de chacun de ses constituants et sa réponse aux sollicitations extérieures en est d'autant améliorée.

Il existe de très nombreux exemples de matériaux composites. Ainsi, le béton seul résiste très bien aux sollicitations mécaniques en compression mais réagit très mal aux effets de traction qui le font casser. Pour améliorer cela, il faut lui adjoindre un matériau qui résiste bien aux tractions, ce qui est notamment le cas des métaux et du fer. C'est pour cette raison que l'on mélange au béton des tiges de fer pour former du béton armé. Les tiges métalliques sont alors disposées dans les directions selon lesquelles le béton est sollicité en traction (l'axe de piliers par exemple). De nombreux polymères sont également renforcés par des fibres de verre ou des fibres de carbone (ces deux derniers matériaux ayant des capacités de résistance à la traction très importantes). Cela permet d'obtenir des matériaux très résistants mécaniquement tout en conservant la légèreté des matériaux polymères de départ. Ceux-ci sont très utilisés dans toute l'aéronautique, la construction navale, l'automobile...

Vivant et matériaux biologiques

Le vivant est composé de matériaux spécifiques car ils sont constitués de molécules de très grandes dimensions (plusieurs milliers d'atomes) comme les acides aminés, les protéines, les molécules d'ADN... et l'ensemble de ces matériaux s'agglomère entre eux pour former des structures composites très complexes comme les cellules vivantes. Les matériaux du vivant sont donc essentiellement composés de matériaux organiques et de structures polymères qui peuvent donc être utilisés comme tels. Ils sont également biodégradables et ne sont pas nuisibles pour l'environnement. C'est justement tout l'intérêt de

l'exploitation actuelle des agro-ressources que de définir de nouvelles matières polymères qui ne soient pas agressives pour l'environnement (plastiques biodégradables, biocarburant...) en remplacement des ressources d'origine organique comme le pétrole³. De plus, ces matériaux ont le plus souvent une texture particulière comme le bois constitué de fibres et ont ainsi des propriétés spécifiques (bonne résistance mécanique mais avec des propriétés d'élasticité importantes, facilité de mise en forme et de découpe). De plus, les matériaux biologiques *in vivo* ont la capacité de s'autoréparer et de se reproduire à l'infini (caractéristiques du vivant).

Après avoir distingué différentes familles de matériaux, intéressons-nous aux grandes familles de propriétés. Les propriétés d'un matériau permettent de le choisir pour une application donnée, dans des conditions d'utilisation fixées (température, acidité, humidité, pression...) Par exemple, on pourra choisir le bois pour ses propriétés d'isolant thermique plutôt que le béton pour construire un mur d'habitation. Les propriétés des matériaux vont définir le comportement du matériau face aux diverses sollicitations extérieures qu'il peut subir et sont autant de traces mesurables des processus physiques à l'intérieur du matériau. Elles vont dépendre fortement des caractéristiques du matériau (nature, structure...)

Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont liées à toute déformation du matériau. Une déformation, notée ε , se définit comme la variation relative des dimensions de la pièce déformée. Elle correspond donc au rapport $\Delta L/L$ avec L , la dimension de la pièce considérée (la déformation est sans dimension). Elle est négative lorsque le matériau se contracte, positive lorsqu'il se dilate.

Ces déformations sont définies par rapport à la force qui est appliquée sur le matériau. En fait, la force nécessaire pour déformer un matériau va dépendre de la section du matériau. Pour éviter toute dépendance en fonction de la forme et de la taille de la pièce qui est déformée, on n'utilise pas la force mais sa normalisation par rapport à la section de la pièce. Cette grandeur est appelée **contrainte mécanique** et a la dimension d'une pression⁴. Nous la noterons : σ_m .

Pour déterminer le comportement mécanique d'un matériau, il est courant de tracer la courbe de contrainte en fonction de la déformation appliquée ($\sigma_m = f(\varepsilon)$), c'est-à-dire que l'on fixe la valeur de la déformation et l'on mesure la contrainte nécessaire pour obtenir cette déformation. Cette mesure s'effectue à l'aide de machines de traction, sur des éprouvettes de matériau, ayant des tailles normalisées.

Le comportement mécanique d'un matériau est bien décrit par sa courbe de traction (Fig. I.1). Sur celle-ci, il est possible de distinguer trois régions :

- Entre A et B, la contrainte varie linéairement avec le déplacement. Le matériau a alors un comportement élastique, c'est-à-dire que toute déformation dans cette zone est réversible et que si la contrainte appliquée est ramenée à 0 Pa, le matériau reprend ses dimensions de départ. La constante de proportionnalité est appelée le module d'Young et notée E . Sa dimension est celle d'une pression ou d'une

³Le pétrole provient de la décomposition sous pression des matières organiques (végétaux et animaux) au cours du temps.

⁴pression : force par unité de surface, en Pascals (Pa) dans le système d'unités international et couramment en MPa (10^6 Pa) pour les matériaux solides.

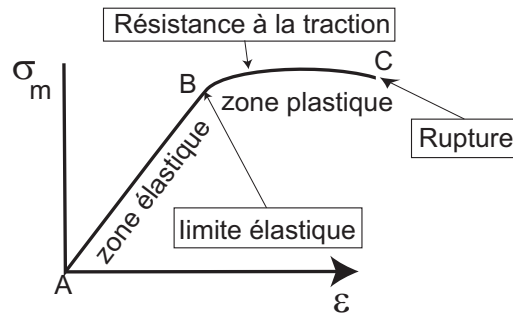


FIG. I.1 – Résultat d'un essai de traction sur une éprouvette.

contrainte et représente donc la facilité avec laquelle le matériau peut être déformé (plus \mathcal{E} est grand, plus la contrainte et donc la force à appliquer doit être grande pour déformer le matériau).

$$\mathcal{E} = \frac{d\sigma_m}{d\epsilon} = \frac{\sigma_m}{\epsilon} \text{ dans la partie linéaire.} \quad (\text{I.1})$$

- Entre B et C, la contrainte n'est plus proportionnelle à la déformation. La déformation varie alors très rapidement pour une contrainte qui reste pratiquement constante. Le matériau a un comportement plastique. Les déformations deviennent irréversibles.
- Après C, le matériau rompt, c'est la rupture.

Note : lorsque la limite entre zone élastique et plastique n'est pas nette, on définit la limite élastique comme la valeur de la contrainte lorsque l'on considère un allongement élastique de 0,2% supplémentaire. C'est l'intersection entre la courbe réelle et la droite parallèle décalée vers la droite de 0,2% de ϵ .

À partir de ces comportements mécaniques, nous pouvons définir différents types de matériaux.

Un matériau est dit ductile si il peut être déformé plastiquement avant rupture. C'est le cas des métaux, des polymères...

À l'opposé, un matériau est dit fragile quand il y a rupture sans que le matériau ne soit passé par un comportement plastique. Il se casse directement après la déformation élastique⁵. C'est notamment le cas des verres...

En fonction du type de sollicitations mécaniques, le comportement du matériau ne se résume pas uniquement à ductile ou fragile. Il existe ainsi un grand nombre de définitions en mécanique du solide dont voici quelques exemples.

- La dureté : la dureté définit la capacité d'un matériau à résister à la pénétration d'un autre matériau plus dur. Les essais de dureté se font donc par pénétration d'une pointe pyramidale (la pénétration se fait à vitesse et force constante) dans le matériau à tester. La dureté est alors quantifiée à partir de la largeur de la trace créée à la surface du matériau par la pointe. Un matériau dur est difficile à rayer.
- La ténacité : la ténacité détermine la capacité d'un matériau à résister à la rupture sous l'effet d'un choc.
- La fatigue : la fatigue correspond à la dégradation (qui aboutit à la rupture) d'un matériau au cours du temps sous l'effet d'utilisations répétées. Les essais de fatigue

⁵La rupture se produit directement au point B de la figure I.1. La courbe de traction ne comporte pas de zone plastique BC.