

12 L'ATOME ET LES LIENS INTERATOMIQUES

12.1 LES MATÉRIAUX

On regroupe les matériaux suivant différents critères comme leur composition, leur structure ou leurs propriétés. On forme en général trois grandes catégories :

- les métaux et leurs alliages
- les polymères
- les céramiques

Nous n'aborderons dans ce cours que les métaux (l'acier et l'aluminium sont essentiels à la fabrication d'orthèses et de prothèses) et les polymères (les plastiques en font partie). Il est possible de combiner différents matériaux et d'obtenir ce qu'on appelle un matériau composite. Nous en verrons aussi.

Les métaux

La majeure partie des éléments du tableau périodique des éléments sont des métaux (environ 70 d'entre eux, surtout à gauche et au centre). À température ambiante, la plupart des métaux sont des solides. Le mercure est l'exception la plus notable. L'aluminium est le métal qu'on rencontre le plus fréquemment en orthèses et en prothèses. Lorsqu'on combine deux ou plusieurs métaux, on obtient des alliages métalliques. Le laiton, par exemple, résulte du mélange du cuivre et du zinc. Certains alliages mettent en jeu des éléments non métalliques. Un exemple important de ce type d'alliage est l'acier, un alliage de fer et d'un élément non métallique, le carbone.

Les métaux et leurs alliages sont ordinairement très bons conducteurs de chaleur. Ils sont aussi le plus souvent durs (résiste à la pression, ne peuvent aisément être marqués par une pointe), rigides (difficiles à déformer) et ductiles, donc déformable si on dépasse la limite d'élasticité. La majorité d'entre eux possède une température de fusion élevée. La température de fusion d'un matériau correspond à celle où il devient liquide.

Les polymères

Les polymères sont des matériaux composés de molécules (des associations particulières d'atomes dont nous reparlerons) formant de longues chaînes de carbone sur lesquelles sont

fixés des atomes d'hydrogène ou d'autres atomes comme le chlore, le soufre, l'azote ou le silicium par exemple. Les polymères les plus connus sont des plastiques comme le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE, très utilisé en orthèses et prothèses), le polypropylène (PP, aussi très utilisé). On connaît souvent les plastiques par leur marque de fabrique : le «Plexiglas», le «Nylon» ou le «Kevlar».

La plupart des plastiques sont des matériaux synthétiques, c'est-à-dire fabriqués artificiellement à partir de produits dérivés du pétrole, voire de charbon ou de matière végétale. Il existe aussi des polymères provenant de source naturelle. Ainsi, le caoutchouc est un polymère qui s'obtient en traitant la sève d'un arbre.

Les polymères organiques partagent plusieurs propriétés. Ils sont presque toujours des isolants thermiques. Ils sont légers et très faciles à mettre en forme. Contrairement aux métaux, ils peuvent être souples ou rigides et, la plupart du temps, ils ne supportent pas des températures supérieures à 200 °C.

Les matériaux composites

On peut combiner tous les types de matériaux pour former des composites. Ceux-ci sont constitués de deux ou plusieurs matériaux différents de façon à combiner leurs propriétés spécifiques. On trouve, par exemple, des résines époxydes (un polymère), renforcées par des fibres de verre, formant ainsi un composite léger et résistant.

12.2 LES ATOMES

Comme toute matière, les matériaux sont formés d'atomes, entités microscopiques (de l'ordre de quelques dixièmes de millièmes de millimètre) dont la structure et les interactions sont gérées surtout par la force électrique et, dans une moindre mesure, par la force magnétique. Pour bien comprendre la structure des matériaux, il faut donc comprendre la structure atomique et comment ceux-ci interagissent.

La structure atomique

Les atomes sont formés d'un noyau autour duquel circulent des électrons. Le noyau est une structure extrêmement petite à l'intérieur du noyau puisqu'il a un diamètre environ cent mille fois plus petit que le diamètre de l'atome. Ainsi, si on pouvait grossir un atome pour qu'il ait un diamètre de 1 km, le noyau serait à peu près gros comme une cerise. Par contre, pratiquement toute la masse de l'atome (plus de 99,95 %) est comprise dans le noyau.

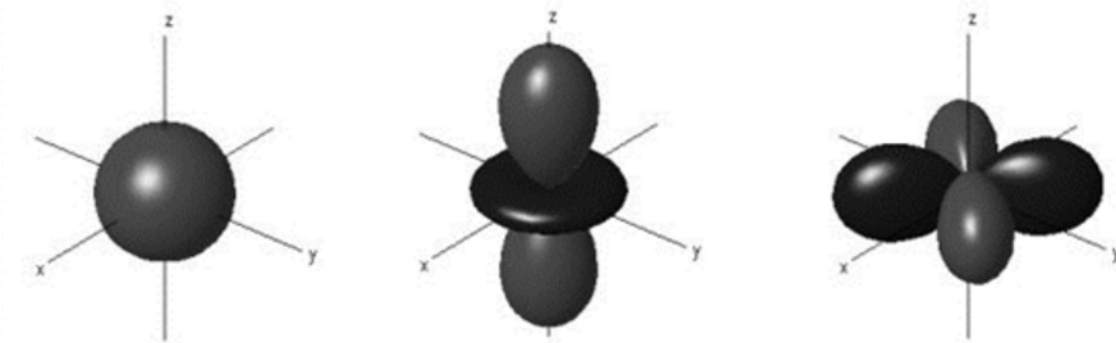
Le noyau est formé de protons, possédant une charge électrique positive, et de neutrons, qui ont une charge électrique nulle. Ces deux particules ont approximativement la même masse. Le nombre de protons et de neutrons peut varier considérablement. Le nombre de

protons est donné par le numéro atomique de l'élément. En examinant le tableau périodique, on peut donc savoir qu'il n'y a qu'un proton dans le noyau d'hydrogène, qu'il y en a 6 dans le noyau de carbone et 92 dans le noyau d'uranium. Le nombre de neutrons est plus difficile à déterminer puisqu'il peut varier même quand il s'agit du même élément. Par exemple, le noyau d'hydrogène peut n'avoir aucun neutron, 1 neutron ou 2 neutrons. Dans le cas du carbone, le nombre de neutrons varie de 2 neutrons jusqu'à 16 neutrons alors qu'il varie de 130 à 150 neutrons pour l'uranium. On parle alors de différents isotopes de l'élément. Certains de ces isotopes existent à l'état naturel, mais la plupart ont été faits en laboratoire et sont instables. En général, le nombre de neutrons est environ égal au nombre de protons pour les premiers éléments du tableau périodique pour passer à environ une fois et demie le nombre de protons pour les derniers éléments du tableau.

Puisque le noyau est formé de particules positives ou neutres, il ne devrait pas être stable à cause de la répulsion électrique (les charges identiques se repoussent et les charges contraires s'attirent). Mais il existe une force d'attraction entre les particules (protons et neutrons) composant le noyau : la force nucléaire. Cette force est largement suffisante pour s'opposer à la répulsion électrique et elle permet donc aux particules du noyau de rester ensemble. Toutefois, cette force n'agit que sur de courtes distances et il y a donc une limite à la grosseur que le noyau peut avoir. Lorsque la taille du noyau dépasse la portée de la force nucléaire, la répulsion électrique peut devenir trop grande et le noyau se désintègre en plus petit morceau. Ainsi, aucun élément avec un numéro atomique supérieur à 83 n'est stable.

Autour du noyau, il y a les électrons. Les électrons sont des particules extrêmement petites, avec une masse environ 2000 fois plus petite que celle du proton et du neutron, et possédant une charge électrique négative. Normalement, il y a autant d'électrons autour du noyau qu'il y a de proton dans le noyau. De cette façon, les charges des protons et des électrons se compensent et l'atome dans son ensemble est neutre. Il est possible cependant d'enlever des électrons pour obtenir alors un atome possédant une charge électrique. L'atome est alors un ion.

On pourrait croire que les électrons ne font que tourner autour du noyau et qu'ils se répartissent uniformément autour du noyau. Il n'en est rien. Pour toutes sortes de raisons (qu'il n'est pas question d'aborder ici), chaque électron ne peut circuler que dans certaines zones bien définies dans l'atome, qu'on appelle orbitales. Certaines de ces zones sont bien des coquilles sphériques, d'autres ont des formes plus étranges. Les quelques figures suivantes vous montrent la forme de quelques orbitales.



12.3 LES LIAISONS ENTRE LES ATOMES

Les liaisons entre atomes, ou liaisons chimiques, sont essentiellement dues aux forces électriques entre atomes. Ces forces électriques contraignent les atomes à s'approcher jusqu'à une certaine distance. Si, par leurs mouvements propres, les atomes s'éloignent trop, la force électrique est attractive (les atomes s'attirent). S'ils s'approchent trop, elle devient répulsive (les atomes se repoussent). Résultat : les atomes vibrent autour d'une position d'équilibre. La distance entre atomes est alors de l'ordre de 0,1 nm.

Il y a trois principaux types de liaison entre atomes : la liaison ionique, la liaison covalente et la liaison métallique.

La liaison ionique

La molécule NaCl, qui forme le sel de table, est l'exemple type d'une liaison ionique. Lorsque des atomes de chlore sont mis en présence d'atomes de sodium, ils leur enlèvent un électron, car ils attirent ce dernier plus fort que ne le fait l'atome de sodium. L'atome de chlore se retrouve ainsi chargé négativement, à cause de cet électron en excès. À l'opposé, l'atome de sodium acquiert une charge positive, car il lui manque désormais un électron. Les deux atomes s'attirent dès lors mutuellement, comme le fait toute paire de charges positive et négative. Notez qu'un lien de ce type entre deux atomes n'a pas d'orientation particulière; les deux atomes s'accolent simplement l'un à l'autre, peu importe leurs orientations relatives. Ce type de liaison est assez rare dans les métaux et les polymères.

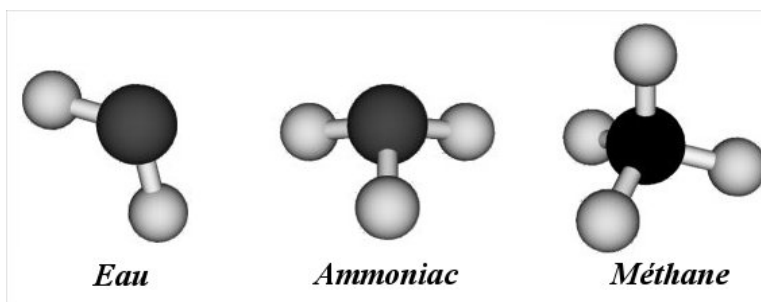
La liaison covalente

Lorsque deux atomes viennent à proximité l'un de l'autre, il arrive qu'ils partagent un ou deux ou plusieurs électrons. Ces électrons se retrouvent souvent dans une zone située entre les deux atomes ce qui va amener ces derniers à s'attirer mutuellement. En réalité, il y a presque toujours un des atomes qui attire un peu plus l'électron que l'autre. En fait, il y a

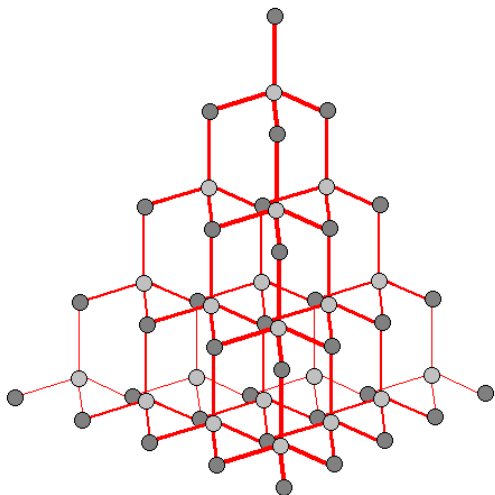
tout un spectre de liaison allant de la liaison ionique, où l'électron est capturé par un des atomes, à la liaison covalente, où l'électron est partagé équitablement entre les atomes.

Dans la liaison covalente, c'est justement le partage d'électrons entre atomes voisins qui est responsable de leur attraction mutuelle. Comme ces électrons occupent des zones précises autour de chaque atome (puisque'ils occupent des orbitales), ces liens ne peuvent s'établir que dans certaines directions bien déterminées qui dépendent des atomes en présence. (Ces directions sont fixes, à l'intérieur d'une certaine limite d'à peine un degré.) L'ensemble d'atomes ainsi relié par des liaisons covalentes s'appelle une molécule.

Il existe toutes sortes de molécules, de toute taille et de toute forme. La figure donne en exemple les molécules d'eau, d'ammoniac et de méthane, qui n'incluent que quelques atomes. À l'opposé, une molécule de diamant



(deuxième figure) a la taille... du morceau de diamant qu'elle forme, puisque dans le diamant, chaque atome de carbone est lié à quatre voisins par des liaisons covalentes, que chacun de ces voisins est aussi lié à ses voisins, et ainsi de suite. Un morceau de diamant consiste donc en une structure tridimensionnelle rigide d'un très grand nombre d'atomes de carbone fortement liés les uns aux autres par des liens dont l'orientation ne peut presque pas changer. Cela explique l'extrême rigidité et la dureté du diamant. La liaison covalente est en effet très forte.



Déformer ou plier du diamant exigerait de modifier l'orientation des liens entre atomes voisins ce que ne permet pas la liaison covalente. On ne peut que briser ces liens, ce qui résulte en une cassure.

La liaison métallique

Dans le cas des métaux, la force d'attraction entre atomes est si grande et les atomes sont si près les uns des autres que les orbitales qui se trouvent le plus loin du noyau fusionnent et que les électrons qui se trouvent sur ces orbitales sont partagés non pas seulement avec un atome voisin, mais entre tous les atomes du métal. Les électrons qui se trouvaient dans ces orbitales sont dès lors entièrement libres de circuler d'un atome à l'autre, voire dans tout le métal (ce qui explique la conductivité électrique des métaux de même que leur conductivité thermique).

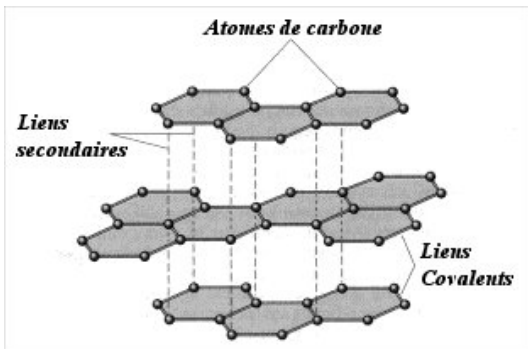
La liaison métallique n'impose aucune orientation particulière aux atomes. C'est pourquoi il est assez facile de déformer ou plier du métal. On peut en effet changer l'orientation des atomes, voire les déplacer, sans trop de difficultés et sans briser la cohésion de l'ensemble, sans casser le métal.

12.4 LES LIAISONS INTERMOLECULAIRES

Il existe aussi des forces électriques entre molécules. Comme la plupart des liaisons entre atomes ont un caractère plus ou moins ionique et que ces dernières impliquent une répartition non uniforme de la charge électrique (puisque un atome attire les électrons plus que l'autre), certaines parties des molécules ont une charge légèrement négative et d'autres parties ont une charge légèrement positive. Il peut donc y avoir des répulsions ou des attractions entre ces charges et il arrive bien souvent que les forces d'attraction l'emportent sur les forces de répulsion. Il y a en fait plusieurs variantes sur la façon dont ces forces peuvent donner une force d'attraction.

Le résultat de toutes ces forces est une force d'attraction qui est beaucoup moins importante que les forces liant les atomes entre eux dans une molécule (environ 100 fois moins intense). On les appelle donc liaisons secondaires ou liaisons de Van der Waals. Malgré leur nom, elles jouent tout de même un rôle important. Par exemple, ce sont ces forces qui maintiennent ensemble les molécules d'une substance solide ou liquide, ce sont ces forces qui assurent la rigidité des solides.

Un exemple du rôle des liaisons secondaires entre molécules est donné par le graphite (dont est faite la mine des crayons). Tout comme le diamant, le graphite est constitué uniquement



d'atomes de carbone. Cependant, parce que les conditions qui président à sa formation sont différentes, sa structure moléculaire est complètement différente. Dans le graphite, les atomes ne sont liés entre eux que par trois liens covalents orientés dans un même plan. La structure moléculaire du graphite consiste donc en strates, en minuscules feuilles d'atomes de carbone, liées entre elles par des liaisons secondaires beaucoup moins fortes que les

liaisons covalentes. Il est donc facile de briser ces liens, ce qui explique que le graphite soit si friable, qu'il s'émiette si facilement. Il faut des pressions et températures extraordinairement élevées pour forcer le carbone à devenir du diamant, conditions qu'on ne rencontre que très rarement, d'où la rareté de celui-ci.

12.5 LA RUPTURE DES LIAISONS AVEC L'AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE

Dans le cas d'un atome en liaison avec un ou plusieurs autres atomes, la température d'un corps est une forme de mesure de l'énergie de vibration des atomes. Plus la température d'un corps est élevée, et plus l'oscillation des atomes formant les molécules est importante.

À des températures très basses, les atomes n'ont pratiquement pas d'oscillation. En fait, il y a un minimum d'oscillation qu'on peut atteindre. Ce minimum est atteint à une température de $-273,15\text{ °C}$, peu importe la substance. Cette température, aussi appelée zéro absolu, est la plus basse température qu'il est possible d'atteindre. À des températures aussi basses, le mouvement d'oscillation des atomes est tellement faible que les liaisons secondaires n'ont aucune difficulté à maintenir en place tous les atomes. Nous avons affaire alors à un solide.

Si on chauffe la substance, le mouvement d'oscillation des atomes et des molécules augmente. Il arrive un moment où l'oscillation des molécules devient assez importante pour détruire la structure rigide créée par les liaisons secondaires. Il y a toujours des liaisons secondaires entre molécules, mais le mouvement de ces dernières est trop prononcé pour qu'il s'établisse une structure rigide. Il en résulte un ensemble d'agrégats pouvant glisser les uns sur les autres, ce qui permet à la substance d'épouser la forme du récipient : la substance devient liquide. Plus les liens secondaires entre les molécules sont forts, plus il faudra chauffer la substance pour qu'elle devienne liquide. Donc, plus les liaisons secondaires sont fortes, plus la température de fusion (température à laquelle la substance devient liquide) est élevée. Ainsi, pour un atome comme le néon qui a beaucoup de difficulté à établir des liaisons secondaires importantes, la température de fusion est de -249 °C . Les molécules d'eau ont par contre une grande facilité à établir des liens secondaires avec leurs voisines. Cela se remarque par une température de fusion de 0 °C , nettement plus élevée que celles du néon et de l'argon. Dans le cas des plastiques, les nombreux liens secondaires entre molécules font que la température de fusion se situe aux environs de 200 °C .

Si on chauffe encore plus, le mouvement d'oscillation des molécules peut devenir assez important pour complètement briser les liens secondaires. Les molécules sont alors libres de se promener n'importe où et le liquide devient un gaz. Cela se produit à la température d'ébullition. Encore une fois, plus les liens sont forts, plus la température d'ébullition est élevée. Par exemple, la température d'ébullition du néon est de -246 °C alors qu'elle est de 100 °C pour l'eau.

On peut se demander pourquoi les métaux ont des températures de fusion si élevée. Elle est de 660 °C pour l'aluminium et de 1540 °C pour le fer. Il faut se rappeler que les liaisons entre les atomes d'un métal sont des liaisons métalliques, beaucoup plus fortes que les liaisons secondaires. Si on veut briser ces liens, il faut que le mouvement des atomes devienne très important et c'est pourquoi il faut atteindre des températures si élevées pour que la structure rigide des métaux s'effondre. Encore une fois, plus ces liens sont forts, plus

la température nécessaire pour briser les liens est élevée. On voit donc que les liaisons métalliques entre les atomes de fer sont plus fortes que les liaisons métalliques entre les atomes d'aluminium puisque la température de fusion du fer est plus élevée que celle de l'aluminium. Ces liaisons métalliques plus fortes expliquent en partie pourquoi le fer est plus rigide que l'aluminium.

Il est également possible de briser d'autres liaisons entre atomes en élevant la température d'une substance. Pour l'eau, les molécules se sont libérées totalement à 100 °C des liens secondaires qui les unissaient. Si on chauffe davantage la vapeur d'eau ainsi obtenue, la vibration des atomes formant la molécule deviendra suffisante pour briser les liens covalents entre ces atomes à 3000 °C environ. Dans ce cas, les molécules d'eau se dissocient en oxygène et en hydrogène. Cette température élevée nous montre que les liaisons covalentes dans la molécule d'eau sont encore plus solides que les liaisons métalliques dans le fer ou l'aluminium.

Il faut noter que les polymères, et en particulier les plastiques, atteignent rarement leur température d'ébullition. Ils sont formés de gigantesques molécules interreliées par des liaisons secondaires relativement faibles. Pour cette raison, ceux-ci deviennent liquides à des températures relativement basses (100-300 °C). Par contre, les molécules qui les forment impliquent tellement d'atomes, leur masse est si importante, que certaines liaisons entre les atomes de la molécule vont se briser (le polymère brûle) avant que la température nécessaire à la formation d'un gaz ne soit atteinte.

EXERCICES

1. Quelles sont les trois classes de matériaux?
2. Quel type de matériau obtient-on lorsqu'on combine des matériaux de différents types?
3. Quel genre de matériau obtient-on lorsqu'on combine deux métaux?
4. Quelles sont les principales propriétés des métaux? Des polymères?
5. À quel type de matériaux appartiennent les plastiques?
6. Quelle force est responsable de la structure des atomes et de leurs interactions?
7. Combien y a-t-il de protons et de neutrons dans le noyau de l'atome d'aluminium?
8. Quelle force est responsable de la cohésion du noyau?
9. Si le noyau d'un atome d'argent contient 47 protons, combien d'électrons se trouvent dans les orbitales si l'atome n'est pas ionisé?
10. Combien d'électrons contient un atome neutre de cuivre? de fer?
11. Qu'est-ce qu'une orbitale atomique?
12. Nommez trois types de liaisons chimiques.
13. Qu'est-ce qu'une liaison covalente?
14. Qu'est-ce qu'une liaison métallique?
15. En quoi la liaison covalente est-elle différente de la liaison métallique?

16. Que sont les liaisons secondaires?
17. Quel type de liaison explique la rigidité de la glace? Du diamant? Du fer?
18. Au niveau atomique, que représente la température?
19. Comment nomme-t-on la température qui constitue un excellent indice de la force du lien intermoléculaire?
20. Pourquoi les plastiques ont une température de fusion inférieure à celle des métaux?