

1 • STRUCTURE CRISTALLINE DES MÉTAUX

Dans leur état normal à la température ambiante, les métaux sont presque tous sous forme de cristaux ; une exception bien connue est celle du mercure qui est liquide. La structure de la forme cristalline présente donc pour la compréhension de l'emboutissage un intérêt majeur puisque bon nombre de propriétés des métaux en découlent.

Nous allons partir de l'élément de base, l'atome, et aller de plus en plus loin dans la façon dont ceux-ci s'associent. Nous verrons ensuite comment les cristaux se déforment, et montrerons que cela n'est possible que grâce à la présence de petits défauts. Cette pénétration dans le détail n'est pas gratuite : elle doit nous permettre de mieux appréhender les phénomènes qui nous intéressent directement.

1.1 Métaux purs

1.1.1 Qu'est-ce qu'un atome ?

L'idée qu'une particule élémentaire puisse constituer la matière n'est pas nouvelle : elle était déjà proposée par le philosophe Démocrite, environ trois siècles avant Jésus-Christ. Comme elle était élémentaire, donc non sécable, il lui a donné le nom de « a-tomos » signifiant en grec : qu'on ne peut pas couper. Il ne s'agissait évidemment à l'époque que d'un concept purement intellectuel, aucun moyen de vérifier l'hypothèse n'existait alors.

Mais depuis que Lord Rutherford a proposé son modèle d'atome en 1910, chacun est supposé savoir que celui-ci est en fait constitué d'un noyau dont la charge électrique est positive, entouré d'un nuage d'électrons beaucoup plus petits et tous strictement identiques, dont la charge est négative. Ces derniers tournent très rapidement sur des orbites plus ou moins elliptiques autour du noyau. Il peut exister plusieurs couches d'électrons. L'ensemble est très comparable à un système solaire, y compris dans ses proportions (c'est-à-dire qu'il y a beaucoup de vide et très peu de matière, comme le suggère la figure 1.1).

Système solaire, oui, mais tellement plus petit ! Pour fixer les idées, rappelons que dans un micromètre cube de fer il y a 85 milliards d'atomes, quantité déjà très au-dessus de ce que nous sommes capables d'imaginer. Et cela devient 11×10^{27} atomes pour une tonne d'acier ! Nous l'écrivons en entier pour mieux frapper les esprits :

11 000 000 000 000 000 000 000 000 000 atomes !

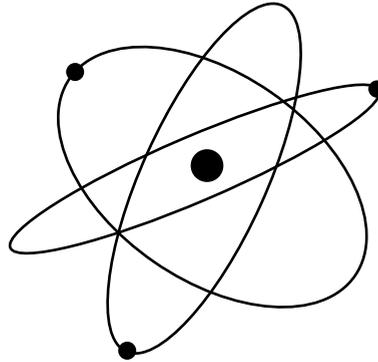


Figure 1.1 – Constitution schématique d'un atome de lithium (3 électrons)

L'équilibre d'un atome vient du fait que la force centrifuge qui s'exerce sur les électrons compense exactement leur attraction par le noyau.

Les choses se compliquent énormément quand on cherche à rentrer dans le détail : les électrons peuvent changer d'orbite, ils tournent sur eux-mêmes, le noyau est constitué d'une grande quantité de particules, etc. Pour ce qui nous concerne, nous n'avons cependant pas besoin de considérer ces phénomènes. Nous allons simplement assimiler les atomes à de petites sphères peu compressibles qui exercent entre elles des forces d'attraction et de répulsion.

1.1.2 Forces entre les atomes – les cristaux

Des forces lient les atomes entre eux. D'où viennent ces forces ?

Les forces d'attraction viennent essentiellement de l'attraction des électrons négatifs d'un atome par le noyau positif d'un autre (comme pour les aimants). Les forces de répulsion, quant à elles, sont surtout effectives quand les atomes sont proches car les électrons de l'un et de l'autre se repoussent, étant tous négatifs. Les noyaux se repoussent aussi.

Quelles sont les conséquences de ces phénomènes ? Elles peuvent s'exprimer ainsi : très proches, les atomes se repoussent ; éloignés, ils s'attirent...

Dans la suite, nous nous contenterons donc de ce modèle simple : les atomes seront de petites boules quasi élastiques (très difficilement compressibles) reliées par des ressorts de liaison qui les retiennent les unes aux autres. Cela implique qu'il existe une distance à laquelle les forces de répulsion et d'attraction s'équilibrent. C'est la raison pour laquelle les atomes s'agglomèrent généralement sous la forme de cristaux à la température ambiante, comme nous allons le voir.

Pour cela, nous sommes obligés d'entrer dans des considérations thermodynamiques. Nous nous contenterons cependant d'appliquer le principe très général qui dit que tout corps tend toujours vers son état d'énergie minimale (un corps chaud se refroidit, un corps tenu en l'air puis lâché tombe, etc.).

Considérons ce qui se passerait si l'on essayait de modifier la distance « a » séparant deux atomes identiques que l'on supposera isolés de tout autre corps ; la figure 1.2, qu'on appelle courbe de Condon-Morse, résume la situation dans ce cas simple.

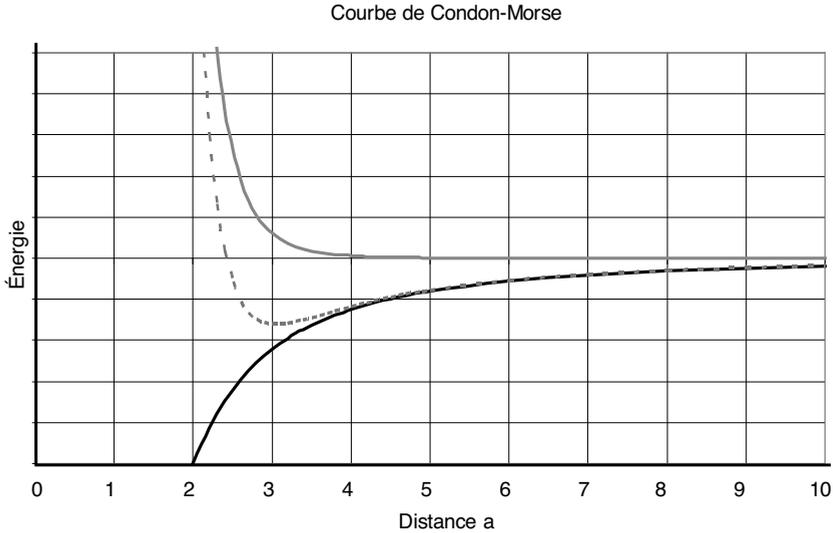


Figure 1.2 – Énergie du système composé par deux atomes proches (unités arbitraires)

L'énergie d'attraction, qui tend à rapprocher les atomes (courbe inférieure), peut se simplifier en une fonction de la forme :

$$E_{\text{attraction}} = -k/a^n$$

L'attraction est comparable à celle de la loi de Newton relative aux forces entre les corps célestes. L'énergie de répulsion (courbe supérieure) obéit à une loi semblable mais de signe contraire, de la forme :

$$E_{\text{répulsion}} = k'/a^{n'}$$

Pour les métaux, n' est toujours très supérieur à n . Des valeurs typiques (choisies pour ce graphe) sont : $n' = 8$, $n = 2$. Que n' soit plus grand implique que les forces de répulsion ont un « rayon d'action » plus faible que celles d'attraction. En fait, la répulsion est forte pour les très faibles distances mais tombe ensuite rapidement à des valeurs négligeables.

Physiquement, cela découle du fait que les couches électroniques des deux atomes ne peuvent pas s'interpénétrer et donc qu'il faut déployer de très grands efforts pour rapprocher encore deux atomes déjà proches.

La somme algébrique des deux énergies (courbe intermédiaire) indique finalement l'amplitude de l'énergie globale du système constitué par les deux atomes.

Or, on voit très clairement dans l'exemple illustré que cette énergie est très élevée pour les faibles valeurs de a . Ceci illustre le fait que des atomes très proches sont repoussés par des forces de répulsion élevées.

On voit aussi que l'énergie globale passe par un minimum. On peut aisément en déduire que, l'énergie étant alors minimale, la liaison la plus stable n'existe que pour cette distance que nous symboliserons alors par a_0 . Ce sera la distance d'équilibre de ces deux atomes isolés.