

I - Notions de minéralogie

Introduction

La minéralogie, étant la science qui se consacre à l'étude des minéraux, se trouve être le premier pilier de la lithothérapie quantique. Cette science comporte de nombreuses disciplines dont certaines nous intéressent tout particulièrement du point de vue de la lithothérapie quantique. Il s'agit de la cristallographie et de la cristallogénèse. Mais avant d'aborder ces deux disciplines, nous allons tenter de définir ce qu'est un minéral. Voici une définition classique tel que vous pouvez la trouver dans les ouvrages consacrés à l'étude de la minéralogie.

« Un minéral est un solide inorganique cristallin de composition chimique définie, qui résulte de processus cosmologique ou géologique. »

Vous vous en doutez, il y a toujours des exceptions à la règle et celle-ci n'y fait pas défaut. En effet, il existe des minéraux qui ne sont pas inorganiques comme l'ambre qui est de la résine de pin fossilisée. Concernant l'état cristallin, il en existe un huitième dit « amorphe », donc non cristallin. Certains minéraux ne sont pas solides à température ambiante comme le mercure et il y en a d'autres qui ne résultent pas de processus cosmologiques ou géologiques comme la whewellite et la struvite, car tous deux sont des constituants des calculs rénaux.

De cette définition du minéral, deux termes sont à retenir et à comprendre pour la suite de nos propos. Il s'agit de l'état cristallin (cristallographie) et de la composition chimique (cristallogénèse).

Cristallographie

La cristallographie est la science qui se consacre à l'étude des cristaux à l'échelle atomique. Ainsi, le terrain de jeux de la cristallographie s'appelle une maille élémentaire (ou maille conventionnelle). Celle-ci correspond à la « molécule intégrante » (Fig. 1) de René-Just Haüy (1743-1822).

En cristallographie, une maille élémentaire ou conventionnelle (Fig. 2.2) est une partie finie de l'espace dont le motif cristallin peut être reproduit par translation, et cela jusqu'à l'infini. Quant au motif cristallin, il est souvent utilisé, en tous cas dans la littérature francophone, afin de décrire le contenu de la maille qui correspond aux différents atomes appartenant à la formule chimique du minéral.

Une maille élémentaire se caractérise par ses paramètres de mailles (ou paramètres cristallins) qui, dans notre monde en trois dimensions, se résument par trois angles (α , β , γ) et trois longueurs (a , b , c).

En fin de compte, il est possible de définir sept systèmes cristallins.

Système cristallin	Synonymes
Triclinique	Anorthique
Monoclinique	Clinorhombique
Orthorhombique	Rhombique
Trigonal	Rhomboédrique, Ternaire
Tétraгонаl	Quadratique
Hexagonal	
Cubique	Isométrique

Ainsi, un cristal est une entité géométrique appartenant à l'un des sept systèmes cristallins, mais également une entité chimique. D'ailleurs, cette dualité chimique/géométrique se reflète parfaitement dans la définition du cristal.

« Le cristal est un corps solide dans lequel un motif atomique se répète périodiquement dans les trois directions de l'espace, engendrant ainsi un réseau. »

Observer les cristaux à l'échelle d'une maille, généralement par diffraction des rayons X, c'est les observer à l'échelle de l'Ångström (1 Å valant 10^{-10} mètre). Par exemple, concernant la galène (PbS), le paramètre cristallin « a » est égal à 5,93 Å. Alors, sur une longueur de 1 μm (1 μm valant 10^{-6} mètre, donc 0,000001 mètre), il est possible d'aligner 1685 mailles de galène. Ainsi, dans un cube de 1 μm de côté, il y a presque 5 milliards de mailles de galène.

La cristallographie est une discipline complexe et nous n'irons pas plus loin, car cela demanderait des démonstrations et des explications détaillées de ce que nous avons déjà vu jusqu'ici. Si la cristallographie vous intéresse, je vous conseille de consulter les 14 réseaux de Bravais, les 32 classes cristallines et les 230 groupes spatiaux dont les annexes VI et VII en parlent très brièvement. Étudier ces concepts demande de solides connaissances en géométrie, en trigonométrie et en mathématique, mais ils vous permettront de comprendre le lien subtil qui les relie en un tout cohérent. Pour nos propos, connaître les sept systèmes cristallins est largement suffisant.

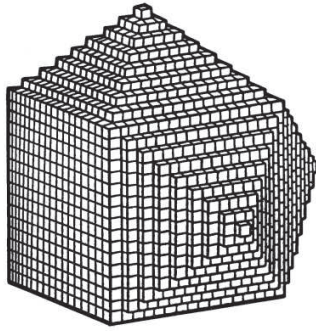


Fig. 1 - Molécules intégrantes d'un cristal cubique imaginée par René-Just Haüy.

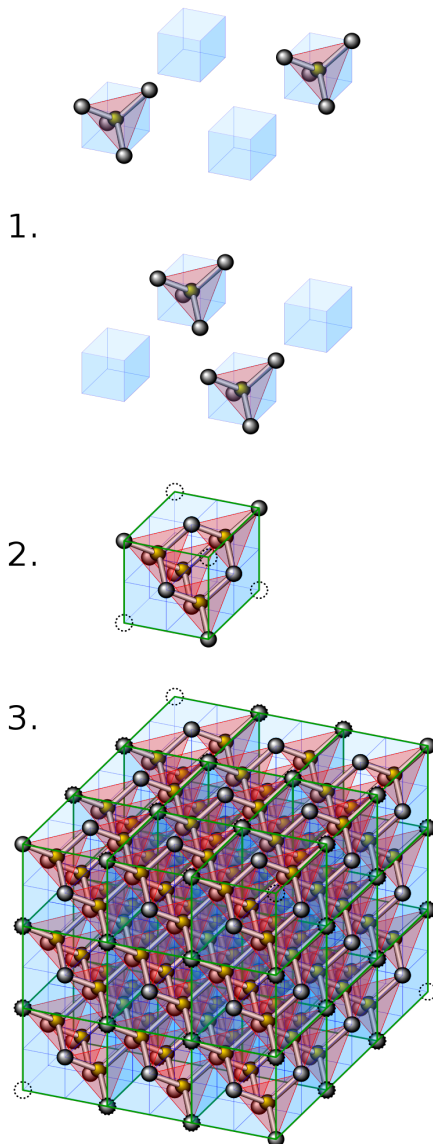


Fig. 2 - Visualisation d'une maille élémentaire cubique de diamant (C).

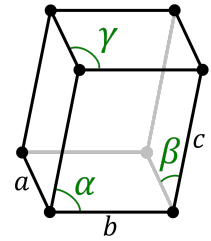
1. Composants de la maille élémentaire.
2. Maille élémentaire.
3. Réseau de $3 \times 3 \times 3$ de mailles élémentaires

Les sept systèmes cristallins

Triclinique

a, b, c / α, β, γ , tous $\neq 90^\circ$

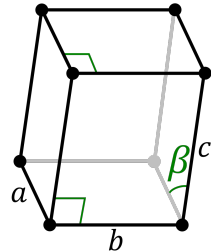
2 bases parallélogrammes
4 faces parallélogrammes



Monoclinique

a, b, c / $\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$

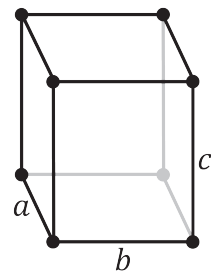
2 bases rectangles
2 faces rectangles
2 faces parallélogrammes



Orthorhombique

a, b, c / $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

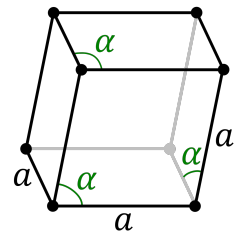
2 bases rectangles
4 faces rectangles



Trigonal

$a = b = c$ / $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

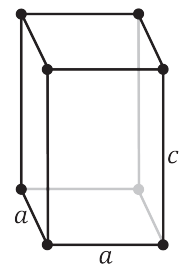
2 bases losanges
4 faces losanges



Tétragonal

$a = b, c$ / $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

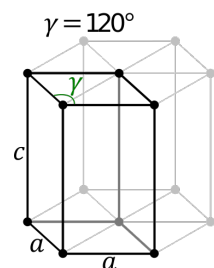
2 bases carrés
4 faces rectangles



Hexagonal

$a = b, c$ / $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

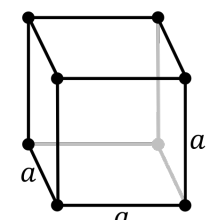
2 bases hexagonales
6 faces rectangles



Cubique

$a = b = c$ / $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

2 bases carrés
4 faces carrés



Cristallochimie

La cristallographie est la science qui se consacre à l'étude des relations entre la composition chimique et la structure cristalline des minéraux (la dualité chimique/géométrique). Ainsi, elle tente d'expliquer les propriétés chimiques et physiques des minéraux ainsi que de permettre une approche visant à comprendre leurs conditions de formation.

Il va sans dire que la cristallographie impose d'excellentes connaissances en cristallographie et en chimie. Ainsi, il est nécessaire de rappeler quelques notions de base concernant les éléments chimiques (atomes et ions), car celles-ci reviendront lorsque nous aborderons le second pilier de la lithothérapie quantique, à savoir la spectrométrie (physique quantique).

Les éléments chimiques

Les éléments chimiques sont regroupés dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïev. Ils sont ordonnés par leur numéro atomique noté « Z » et organisés en fonction de leur configuration électronique. L'annexe V donne la liste des éléments chimiques rencontrés dans cet ouvrage.

À ce jour, 118 éléments ont été étudiés, mais seulement 94 d'entre eux ont été observés sur Terre en milieu naturel.

L'atome

Commençant par décrire l'atome selon le modèle développé par Niels Bohr (1885 - 1962) en 1913, car, même s'il est partiellement faux, il a le mérite d'être simple et cela facilite grandement la compréhension et les éventuelles réflexions que nous pourrions avoir à son sujet.

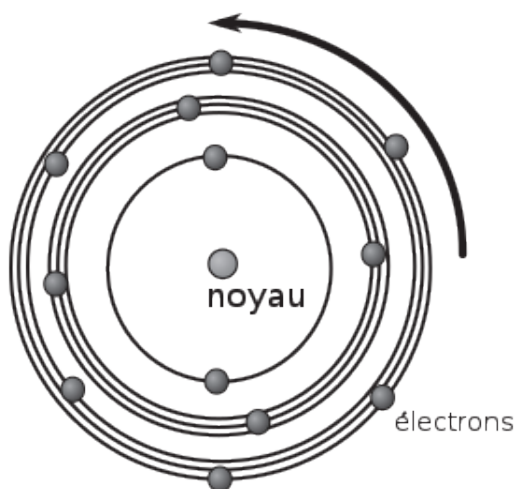


Fig. 3 - Modèle atomique de Bohr : un modèle planétaire dans lequel les électrons ont des orbites définies.

En effet, ce modèle permet de décrire les phénomènes spectroscopiques fondamentaux, c'est-à-dire le fait que les atomes absorbent ou émettent seulement certaines longueurs d'onde (ou couleur) de lumière. Cependant, ce modèle ne permet pas d'expliquer l'ensemble des observations et il faudra attendre 1924-1926 pour qu'avec Schrödinger, les orbites deviennent orbitales (Fig. 5) avec des énergies stationnaires, mais n'allant pas trop vite.

Le nom « atome » provient du grec ancien *átomos* et signifie « insécable ». Contrairement à ce que l'étymologie suggère, l'atome n'est pas indivisible, car il est lui-même constitué de particules subatomiques. Cependant, l'atome est la plus petite partie d'un corps simple pouvant se combiner chimiquement avec un autre et former ainsi une molécule.

L'atome est composé d'un noyau chargé positivement et d'électrons tournant autour. Le noyau est très compact, d'un diamètre d'environ 10^{-15} à 10^{-14} mètres. Il est cent mille à un million de fois plus petit que l'atome. Il porte une charge électrique positive et c'est aussi la partie la plus lourde de l'atome, puisque le noyau représente au moins 99,95 % de la masse de l'atome. Le noyau est composé de protons, porteurs d'une charge électrique positive, et de neutrons, électriquement neutres.

Les ions

Un ion est un atome qui a perdu ou gagné des électrons.

- Un anion est un ion qui, ayant gagné un ou plusieurs électrons, porte une ou plusieurs charges électriques élémentaires négatives, il s'écrit : X^-
- Un cation est un ion qui, ayant perdu un ou plusieurs électrons, porte une ou plusieurs charges électriques élémentaires positives, il s'écrit X^+

Le signe et la valeur de cette charge électrique sont indiqués en exposant à la fin de la formule chimique de l'ion. Exemples : Cu^{2+} représente l'ion cuivre de charge 2e, Na^+ l'ion sodium de charge e, Cl^- l'ion chlore de charge $-e$.

Molécule et formule chimique

Les atomes, dans la plupart des cas, ne peuvent pas exister à l'état libre. Ainsi, ils se groupent et s'assemblent pour former des molécules. La formule chimique d'un minéral (ou d'un composé chimique) est une expression indiquant quels éléments et dans quelles proportions constituent la maille élémentaire du minéral (ou d'un composé).

Une molécule de corps simple ne contient qu'une seule sorte d'atomes : Si_2 (deux atomes de silicium).

Une molécule de corps composé (ou combinaison) est formée de plusieurs sortes d'atomes : H_2O (deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène).

Comme nous le verrons par la suite, la formule chimique d'un minéral est une information capitale pour la lithothérapie quantique. Il est donc important de savoir lire une formule chimique et de pouvoir la décoder. Donc, voici quelques règles de base à connaître.

- On note H_2 deux atomes d'hydrogène formant une molécule d'hydrogène.
- On note 2H deux atomes d'hydrogène indépendants l'un de l'autre.
- On ne réduit jamais les formules chimiques : H_2O_2 n'est pas égal à HO
- Dans la formule $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, l'indice placé en bas et à droite de la parenthèse multiplie les indices des atomes entre la parenthèse : $\text{Ca}_3\text{P}_4\text{O}_8$

Liaisons chimiques et électronégativité

Les liaisons chimiques expliquent pourquoi les atomes des molécules ou des cristaux demeurent en contact. Dans les minéraux, les liaisons sont principalement ioniques et covalentes (accessoirement métalliques). Cela dit, certains minéraux présentent bien souvent des liaisons mixtes.

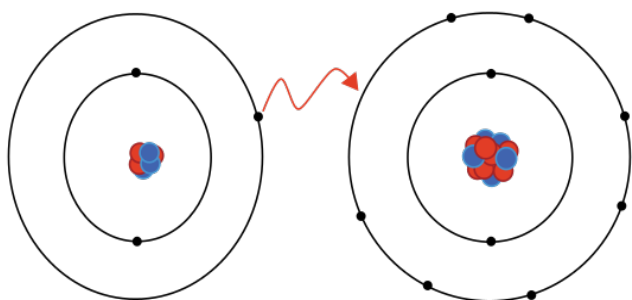


Fig. 4 - Représentation d'un transfert d'électrons entre un atome de lithium (Li) et de fluor (F). L'électronégativité du lithium est de 0,98 et celle du fluor de 3,98.

Le lithium (à gauche) a un électron dans sa couche de valence (couche la plus externe au noyau) alors que le fluor (à droite) en a sept. Si un électron est transféré du lithium au fluor, les deux atomes deviennent des ions (Li^+ et F^-). Ces deux ions de charge opposée s'attirent d'où le concept de liaison ionique.

En chimie, l'électronégativité d'un atome est une grandeur physique qui caractérise sa capacité à attirer le doublet d'électrons partagés lors de la formation d'une

liaison chimique avec un autre atome. La différence d'électronégativité entre ces deux atomes détermine la nature de la liaison :

- Liaison covalente lorsque la différence est nulle, faible ou moyenne.
- Liaison ionique lorsque la différence est tellement forte qu'un des atomes a attiré complètement, ou presque, les électrons de la liaison. Dans ce dernier cas, les atomes sont devenus des ions et portent des charges électriques entières, ou presque. Ce dernier cas est représenté ci-dessus (Fig.4).

Données complémentaires

- L'électron e^- est une particule très peu massive ($9,109\,4 \times 10^{-31}$ kg) et pourvue d'une charge électrique négative de $-1,602 \times 10^{-19}$ C.

Les électrons sont des leptons qui constituent, avec les quarks, le groupe des fermions. Un électron n'est jamais localisé à un endroit précis d'une trajectoire définie autour du noyau, mais distribué au sein d'une orbitale atomique avec une probabilité de présence (Fig. 5).

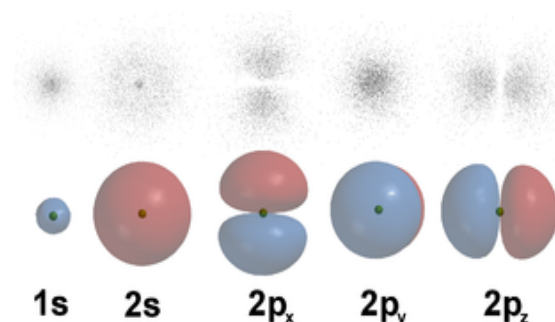


Fig. 5 - Exemples d'orbitales atomiques.

- Le proton p^+ est 1836 fois plus massif que l'électron ($1,672 \times 10^{-27}$ kg) et porte une charge électrique positive de même valeur absolue que celle de l'électron, soit $1,602 \times 10^{-19}$ C.
- Le neutron n^0 est 1838,5 fois plus massif que l'électron ($1,674 \times 10^{-27}$ kg) et il est électriquement neutre.

Le modèle standard de la physique des particules décrit les nucléons (proton ou neutron) comme des baryons composés de particules élémentaires appelées quarks :

- Le proton est constitué de deux quarks up et d'un quark down : $p^+ = uud$
- Le neutron est constitué d'un quark up et de deux quarks down : $n^0 = udd$

Voyage au cœur de la pyrite

Afin d'y voir plus clair, je vous propose une visite guidée à l'intérieur d'une maille élémentaire de pyrite, un disulfure de fer de formule chimique FeS_2 .

Cristallographie de la pyrite

La pyrite cristallise dans le système cubique (Fig. 6) ainsi, comme tous les minéraux appartenant au système cubique, elle ne possède qu'un seul paramètre de maille noté « a » qui, dans ce cas, vaut 5,416 Å.

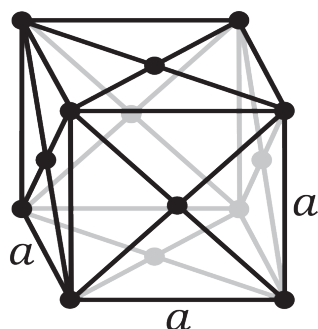


Fig. 6 - Système cristallin cubique (Maille cubique à faces centrées)

La pyrite possède un polymorphe (même composition chimique, mais de structure différente) qui s'appelle la marcassite. Celle-ci est donc également un disulfure de fer (FeS_2) et est donc le polymorphe orthorhombique (Fig. 7) de la pyrite. Ses paramètres de mailles sont les suivants : $a = 4,436$ Å, $b = 5,14$ Å, $c = 3,381$ Å.

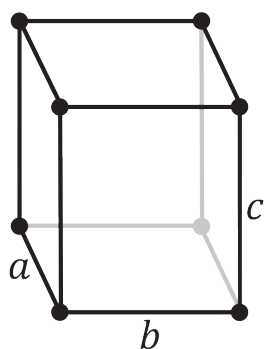


Fig. 7 - Système cristallin orthorhombique de la marcassite.

Cristallochimie de la pyrite

Ainsi, dans une maille élémentaire de pyrite (Fig. 8), nous trouvons un atome de fer (Fe) et deux atomes de soufre (S).

En y regardant de plus près, nous constatons ceci :

- Il y a un atome de fer à chaque coin de la maille élémentaire cubique, donc 8 atomes.
- Il y a un atome de fer au centre des faces de la maille élémentaire cubique, donc 6 atomes.
- Il y a 8 atomes de soufre à l'intérieur de la maille élémentaire cubique.

Ainsi, il y a (Fig. 8) :

- 8 atomes de fer qui comptent pour $1/8$ (Fig. 13).
- 6 atomes de fer qui comptent pour $1/2$.
- 8 atomes de soufre qui comptent pour 1.

Il nous reste à réaliser un petit calcul afin de déterminer le nombre d'atomes par maille.

Pour les atomes de fer : $4 = (1 + 3)$

$$8 \times 1/8 = 1$$

$$6 \times 1/2 = 3$$

Pour les atomes de soufre : 8

$$8 \times 1 = 8$$

Le résultat donne Fe_4S_8 qui se simplifie en FeS_2 .

Quant aux liaisons chimiques, elles sont mixtes, c'est-à-dire covalentes et ioniques (Fig. 10).

- Les cations Fe^{2+} sont en coordination octaédrique, entourés d'anions S^{2-} , avec une longueur de liaison Fe-S de 2,263 Å.
- Les ions S^{2-} sont en coordination tétraédrique, chaque S^{2-} étant entouré de trois ions Fe^{2+} à distance de 2,263 Å et de l'autre ions S^{2-} à une distance de 2,160 Å.

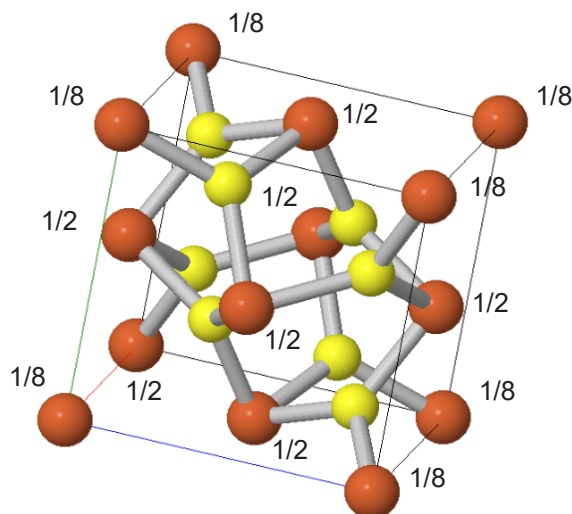


Fig. 8 - Maille élémentaire de la pyrite. Les sphères rouges représentent les atomes de fer et les jaunes, les atomes de soufre.

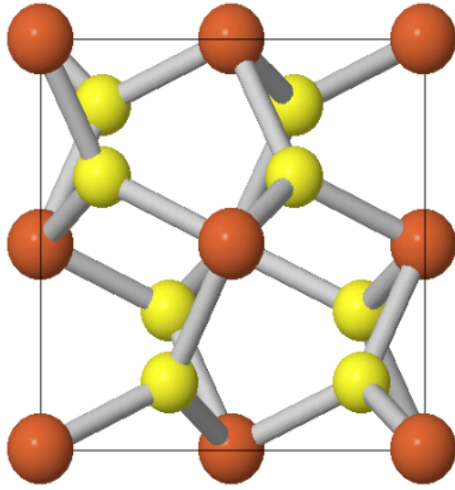


Fig. 9 - Maille élémentaire de la pyrite vue depuis l'axe des x.

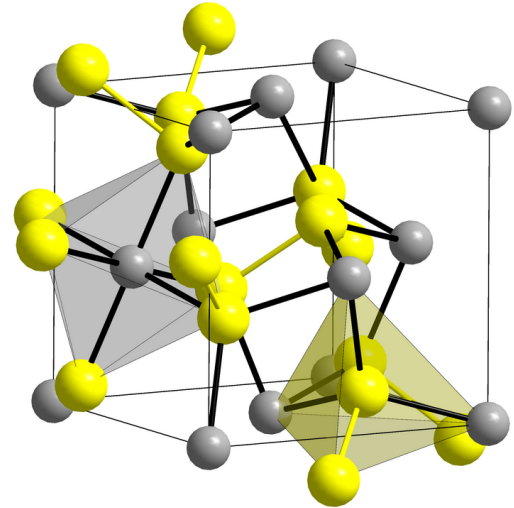


Fig. 10 - Représentation des cations Fe^{2+} en coordination octaédrique (gris) et des ions S^{2-} en coordination tétraédrique (jaune) dans un cristal de pyrite.

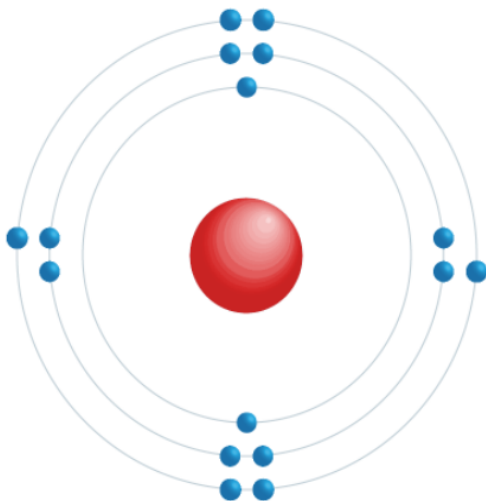


Fig. 11 - Configuration électronique d'un atome de soufre avec ses 16 électrons dont 6 appartiennent à la couche de valence. L'électronégativité du soufre est égale à 2,58.

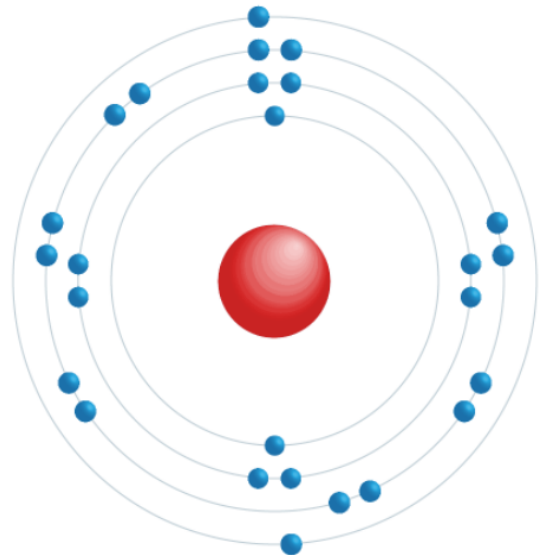


Fig. 12 - Configuration électronique d'un atome de Fer avec ses 26 électrons dont 2 appartiennent à la couche de valence. L'électronégativité du fer est égale à 1,83.

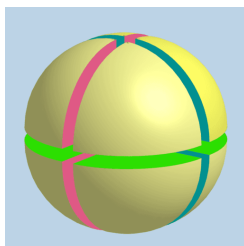


Fig. 13 - Représentation d'un atome occupant le coin d'une maille quelconque avec ses 8 parties. Une portion de cette sphère compte donc pour 1/8.

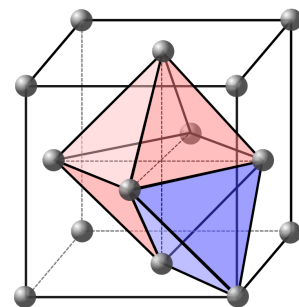


Fig. 14 - Représentation d'un octaèdre (rouge) et d'un tétraèdre (bleu) à l'intérieur d'une maille cubique.