

LES STRUCTURES DE LA MATIÈRE

ORDRE ET SYMÉTRIES DANS LES ASSEMBLAGES ATOMIQUES

Cristaux

Cristaux liquides

Macromolécules

Alain Boudet

Dr en Sciences Physiques

www.spirit-science.fr



2020

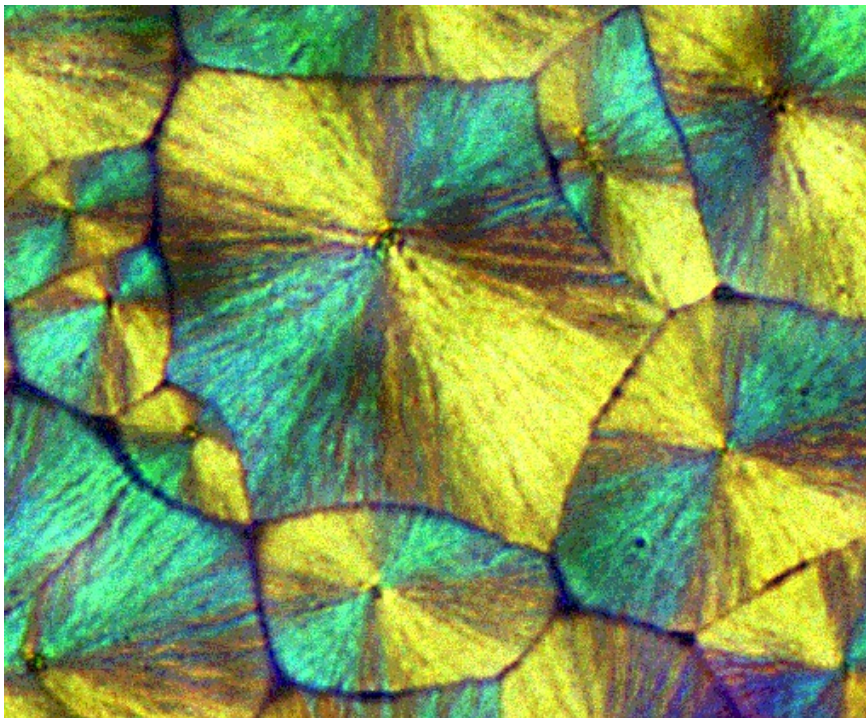


Table des matières

Résumé et introduction

Cristaux et Géométrie cristalline

- Minéraux et pierres précieuses
- Transparence cristalline
- Les formes géométriques des cristaux
- La géométrie des mailles atomiques
- La géométrie des réseaux cristallins
- La cellule polyédrique symétrique
- Les cristaux à symétrie 5 et le nombre d'or
- Cristaux aperiodiques

- Formation des cristaux - la cristallisation
- Agglomération de cristaux
- Structure amorphe et vitreuse
- Ordre et désordre

Compléments

- Diamant et graphite
- Quartz, silice et silicium

Cristaux liquides et cristaux plastiques

- Cristaux et liquides
- Ordre et désordre moléculaire
- Un nouvel état entre amorphe et cristal
- Formes des molécules
- Mobilité des molécules
- Nématique, ordre d'orientation
- Smectiques, structure en couches
- Savons: doubles couches

- Condensation et rupture de symétries
- Structure des molécules
- Cholestériques: disposition en hélice
- Cristaux plastiques

Compléments

- Affichage par cristaux liquides (LCD)

Polymères, structures et propriétés

- Rencontre avec les polymères
- Leurs propriétés
 - Propriétés thermiques
 - Propriétés mécaniques
 - Autres propriétés
- Les molécules des polymères
- Les microstructures des polymères seuls
 - Structures amorphes
 - Structures semi-cristallines
 - Les fibres
 - Les polymères cristaux-liquides

- Les microstructures des polymères associés
 - Les additifs
 - Les mousses de polymères
 - Les composites
 - Les mélanges de polymères
 - Les copolymères

Annexes

- Remplir l'espace en empilant des polyèdres
- Décrire une réalité dans un super-espace
- En savoir plus

Résumé

Géométrie cristalline et quasicristalline:

Le diamant et le quartz sont des cristaux typiques par leur transparence pure et leurs formes géométriques. La géométrie extérieure est la manifestation d'une géométrie intérieure. Les cristaux sont construits par l'empilement ordonné périodique de petites briques atomiques élémentaires, les mailles. Lorsque cet ordre fait défaut, la matière est dite amorphe ou vitreuse.

La cristallisation est une transformation extraordinaire qui fait passer du désordre liquide à l'ordre compact.

Les roches, et toute matière y compris les matériaux industriels (métaux, silicium, polymères), contiennent des domaines cristallins et amorphes.

Récemment on a reconnu l'existence de domaines cristallins aux géométries plus complexes (les quasi-cristaux), dont la périodicité n'est détectable que dans un espace à dimension supérieure.

Cristaux liquides et cristaux plastiques

Les cristaux liquides sont des substances qui lorsqu'on les chauffe, passent par des structures intermédiaires entre le cristal à réseau périodique bien ordonné dans trois directions et le liquide complètement désordonné. Dans ces états, ils tiennent à la fois du liquide et du cristal. Ces structures résultent de la forme non-sphérique de leurs molécules qui s'empilent comme des allumettes, des assiettes, les cartes d'un jeu de cartes ou encore des hélices. Ce sont ces mêmes cristaux liquides qui se cachent dans les écrans numériques sous le sigle LCD.

Les cristaux plastiques ont par contre des molécules quasi-sphériques et ils représentent une autre façon d'inventer un ordre intermédiaire, dû à la mobilité rotationnelle de leurs molécules.

Polymères:

Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturelles, les matières plastiques doivent leur essor à leur large gamme de caractéristiques, dures, molles ou élastiques, transparentes ou opaques, isolantes et quelquefois conductrices, plus ou moins résistantes aux conditions agressives de leur usage, toujours légères. C'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaîne, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui est à l'origine de cette diversité.

Annexe

Les cristaux fournissent des exemples de la façon dont l'espace peut être pavé par des polyèdres tels que cube, octaèdre, dodécaèdre.

La matière !

Elle est omniprésente dans notre vie, que ce soit dans notre environnement naturel ou dans les objets fabriqués que nous utilisons quotidiennement. C'est elle qui donne la forme aux choses.

Meubles et immeubles, ustensiles en métal, en plastique, en bois ou en terre, téléphones et appareils électriques, ingrédients de notre nourriture, farines, pâtes, produits d'entretien, substance des organismes vivants végétaux ou animaux, etc..

Quelle variété de consistance, d'aspect, de sensibilité, de couleurs, d'usage !

Cette variété de caractéristiques de la matière s'explique par sa structure atomique, et ceci à deux niveaux.

D'une part par la nature des atomes et molécules qui la constitue.

D'autre part par la façon dont ces atomes sont assemblés.

C'est ce second aspect que nous étudions dans ce livre numérique. Il est fait de la réunion de 3 articles rédigés entre 2005 (polymères) et 2011 (cristaux liquides).

Nous découvrirons que les cristaux sont caractérisés par un empilement atomique très ordonné, contrairement aux liquides et aux verres. Les cristaux liquides présentent un ordre intermédiaire, semblable au cristal dans un sens, et semblable au liquide dans un autre sens. Cela est dû à la forme de leurs molécules. Quant aux polymères, leurs caractéristiques résultent de la grande longueur de leurs molécules (macromolécules) dont les assemblages prennent des aspects spécifiques.

Nous ne pouvons que nous émerveiller de l'intelligence de la nature, dont les forces fondamentales conduisent à ces étonnants assemblages moléculaires.

Ce livre vise à révéler la beauté, la précision et l'intelligence des formes géométriques des assemblages atomiques de la matière.

Cristaux et Géométrie cristalline

Vous voulez en savoir plus sur les cristaux, mais vous en avez déjà une idée. Alors, à votre avis, qu'est-ce qu'un *cristal*? Au fond, le savez-vous? Que répondriez-vous à un enfant qui vous le demande?

Ce mot vous fait-il penser à la vaisselle de luxe de grand-mère, aux magnifiques minéraux de la terre, ou encore à une construction atomique géométrique? **La notion de cristal renvoie à différents sens.**

Le but de ce chapitre est donc de brosser un **panorama des caractéristiques des cristaux dans leurs différents aspects**. Mais ce panorama n'a de sens que parce qu'il invite à **révéler la beauté, la précision et l'intelligence des constructions cristallines**. Nous constaterons aussi que les cristaux sont omniprésents comme matière ou comme éléments technologiques dans notre environnement, souvent inaperçus.

Minéraux et pierres précieuses

Votre premier contact avec les cristaux a peut-être été d'admirer la vitrine d'un marchand de cristaux, de les observer et de les toucher. Il vend des minéraux, des gemmes, des pierres précieuses et des cristaux, 4 noms qui désignent des objets proches mais pas tout-à-fait identiques.



Wulfénite (Ojuela Mine, Mapimi, Durango, Mexique) en association avec de la mimétite verte
Photo Frédéric Hède ©Alpinisme et minéraux

Le terme **minéral** décrit un **élément de l'écorce terrestre**. Les êtres existant sur cette terre sont classés en 3 règnes principaux dont l'un est le minéral, les 2 autres étant le végétal et l'animal. Donc, ce qui n'est ni végétal, ni animal est minéral.

Toutefois, pour être précis et ne pas enfermer l'esprit dans des idées rigides, il faut noter que certains organismes microscopiques sont à la frontière entre les deux règnes végétal et animal et peuvent être classés soit dans l'un soit dans l'autre selon le critère retenu pour définir un règne (mobilité, capacité à respirer, etc.). Comme pour toute classification décidée par l'esprit, il n'y a pas de critère unique et définitif. Comme les scientifiques sont attachés à des définitions rigoureuses, certains ont inventé d'autres règnes pour classer ces microorganismes (mycètes, bactéries, archées, protistes). Mais cela ne concerne pas les minéraux étudiés ici.

Selon leur composition et leur histoire géologique, les minéraux sont plus ou moins **durs** (de l'argile pâteuse au silex et au diamant), plus ou moins **compacts**, friables ou fragmentés (comme le sable). Le mot **Pierre** désigne un minéral plutôt solide et compact. Certaines de ces pierres sont qualifiées de **gemmes**, de **pierres précieuses** ou de **pierres ornementales**.



Cristaux géants de gypse (sulfate de calcium) dans une grotte de Naica au Mexique. Vous pouvez aussi consulter cette vidéo.

Les **pierres précieuses** sont précieuses à cause de leur beauté, de leur rareté et de leur valeur commerciale. Elles sont **principalement transparentes** et sont au nombre de 4: le **diamant**, le **rubis**, le **saphir** et l'**émeraude**.

Les **pierres fines** sont translucides ou transparentes. On peut citer la topaze, le quartz, l'opale, les grenats, l'aigue-marine, la tourmaline, l'améthyste et bien d'autres encore.

Le terme **Pierre ornementale** s'applique à toutes les pierres qui sont portées comme parure. Il est souvent employé comme synonyme de pierre fine. Les pierres ornementales sont translucides ou opaques. On peut citer l'obsidienne, la moldavite, etc.

Le mot gemme englobe les pierres précieuses, fines ou ornementales. Une pierre gemme doit posséder les trois caractéristiques suivantes: avoir un **aspect** agréable, principalement par sa couleur, avoir une **dureté** élevée (pour éviter d'être abimée par les frottements et rayures) et être **rare**. La pierre doit aussi être peu altérable sur le plan chimique. (*plus de détails dans le site Kasaku*)

Dans l'usage courant, il n'y a pas de frontières précises entre ces différentes catégories. Toutefois, des règles commerciales ont fixé la dénomination de pierres précieuses afin que l'acheteur soit bien informé de ce qu'il achète. La notion d'ornement est subjective et divers objets de matière dure ou colorée ayant l'aspect de pierreries peuvent être nommés pierres ornementales. Des substances d'**origine organique** telles que le corail, l'ambre, les perles sont assimilées aux gemmes.

Enfin, le terme **crystal** inclut la plupart des pierres gemmes. Dans le domaine de la joaillerie, il est difficile de préciser les limites de son emploi et les différences par rapport à celui de gemme. Toutefois, le terme fait plutôt référence à la **forme extérieure géométrique et régulière** de ces pierres. Les scientifiques ont retenu cette caractéristique, transposée sur le plan atomique, pour donner leur propre définition du cristal.

Vertus curatives et protectrices des cristaux

Les pierres fines et précieuses ne tirent pas seulement leur valeur de leur beauté. Beaucoup possèdent des vertus curatives et protectrices qui ont été reconnues de tout temps dans de nombreux pays. En portant ces pierres sur soi, ou en les disposant dans une maison, on ajoute leur action curative à leur effet esthétique et décoratif, à condition de savoir en prendre soin. De nombreux sites donnent des renseignements à ce sujet (*exemple: Énergies et cristaux*).

Leur effet curatif et protecteur n'a pas été scientifiquement expliqué. Deux types de mécanismes sont à l'œuvre dans les cristaux. D'une part ils émettent des rayonnements. Ceux-ci sont en rapport avec la couleur du cristal, mais la couleur n'explique pas tout. D'autre part ils emmagasinent des énergies issues de leur environnement dans leurs structures internes, ils les enregistrent en quelque sorte. Il est fort possible que cette mémorisation se produise à des niveaux sous-atomiques (*voir Codes, information et enregistrement*).

Transparence cristalline

Dans le domaine des pierres ornementales, le terme *crystal* est fréquemment associé à celles qui sont **transparentes**. D'un usage encore plus restrictif, il désigne parfois le **crystal de roche**, autre nom du **quartz** qui frappe par sa **transparence** d'une grande limpidité (*voir en annexe Quartz*).

L'étymologie peut nous éclairer. Le terme *crystal* est dérivé du grec **krystallos** qui signifie la **glace**. A l'origine le mot veut signifier que la roche est transparente et compacte comme la glace.

Par extension, le mot *crystal* désigne ce qui est **limpide comme l'eau pure**. On parle d'**eau cristalline** (*Dans le cristal d'une fontaine, Un cerf se mirant autrefois... Jean de La Fontaine*), et de **voix cristalline**.

Le **papier cristal** est un papier transparent du commerce, utilisé par exemple par les fleuristes pour emballer les bouquets.

Le **verre de cristal** utilisé pour la vaisselle de luxe n'est ni du cristal de roche, ni ne présente aucune structure géométrique. Sa structure est amorphe (ou vitreuse, c'est-à-dire désordonnée - voir [plus loin](#)). Son appellation *crystal* se justifie par la pureté de sa **transparence**, due à sa composition chimique riche en oxyde de plomb. Les



magasins de cristallerie vendent de la verrerie, mais ce ne sont pas des gemmes !!!

Dans son emploi relatif aux verres de cristal, au papier cristal et à l'eau cristalline, le mot *cristal* est en désaccord avec son autre usage en rapport avec la structure géométrique telle que nous allons la définir ci-dessous. En effet, la structure de l'eau et celle du papier cristal sont **amorphes** comme celle du verre, et non cristallines. Toutefois, désaccord ne signifie pas que l'une est fausse et que l'autre doit s'imposer. Cela signifie, comme il arrive souvent dans le dictionnaire, qu'un même mot peut avoir plusieurs sens selon les communautés qui l'emploient.

Les formes géométriques des cristaux

Le terme *cristal* évoque un **minéral aux formes géométriques régulières**. En effet, l'observation de gemmes (calcite, quartz) montre que beaucoup de ces cristaux sont délimités par des facettes planes régulières qui se coupent à angles vifs selon des symétries flagrantes. Elles laissent apparaître des cubes, des pyramides ou des prismes, ou des volumes plus complexes à faces planes appelés **polyèdres** (nous en verrons des exemples).



Fig.1- Cristaux de sel
Photo Claire Köenig, Futura Science

De telles géométries existent aussi dans des cristaux autres que les gemmes. Si l'on dissout en quantité suffisante du gros **sel de cuisine** (chlorure de sodium) dans de l'eau, puis qu'on laisse cette eau s'évaporer lentement, il reste des cristaux de sel de forme cubique (fig.1). On trouve aussi de telles géométries régulières dans les **cristaux de glace** qui se forment lorsque l'eau gèle.

Cette surprenante régularité des formes a incité des scientifiques à les examiner minutieusement à l'œil nu et à la loupe, afin d'en déterminer les règles, bien avant que la notion d'atome soit reconnue et acceptée. C'est l'origine de la **cristallographie**. Afin de comprendre ces règles, nous allons suivre ces savants dans leurs recherches pour établir

les lois de symétrie et l'existence d'un volume élémentaire dès le 17^e siècle.

Notons toutefois que ces formes régulières visibles à l'œil nu ne sont pas systématiquement présentes dans les cristaux. La forme des gemmes est extrêmement variable, elle reflète l'histoire de la pierre, la façon dont elle s'est formée, les conditions de température, d'humidité et de pression et le temps de croissance dans le terrain où elle est située, l'érosion à laquelle elle a été soumise. Celles qui présentent une forme régulière bien développée nous émerveillent et retiennent notre attention. Quant aux autres, elles présentent également un caractère cristallin qui ne peut être établi qu'au microscope (*voir plus loin les matériaux polycristallins*).

La maille élémentaire

Au 17^e siècle, plusieurs savants pressentent que **les faces cristallines font entre elles des angles déterminés et constants**. Dans la deuxième moitié du 18^e siècle, **Jean-Baptiste Louis Romé de L'Isle** le vérifie et le démontre avec l'aide de ses collaborateurs. Ils fabriquent des modèles de cristaux en terre cuite, en carton ou en cuivre, puis mesurent les angles de façon plus précise à l'aide d'un rapporteur.

A la fin du 18^e siècle, **l'abbé René Just Haüy** s'intéresse aux formes polyédriques des cristaux. Il avait fait tomber sans le vouloir un cristal de *calcite* qui s'est brisé. Examinant les fragments, il constata qu'ils n'étaient pas informes comme des morceaux de verre brisés. On y voyait toujours le même type de facettes, semblables à celles du morceau d'origine, quelle que soit leur taille. En brisant à nouveau ces morceaux de calcite, on crée des morceaux plus petits sur lesquels on retrouve la même forme régulière, sorte de parallépipède déformé en losange (nommé aussi *rhomboèdre*).

Haüy imagine que **la division en morceaux de plus en plus petits doit avoir une limite**, une unité

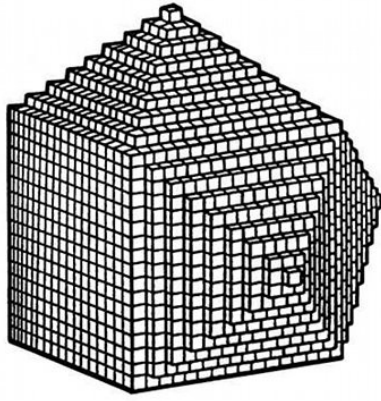


Fig.2- Dessin de Haüy extrait de son ouvrage *Essai d'une théorie de la structure des cristaux*, 1784

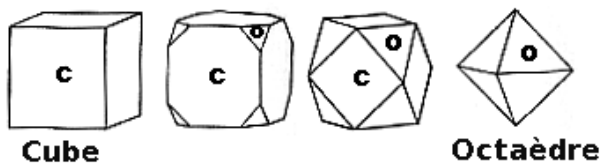


Fig.3- Les formes tronquées du cube

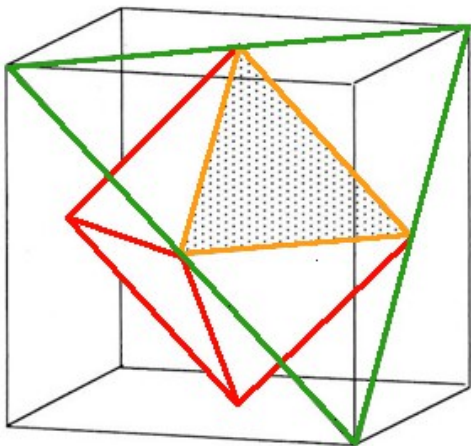


Fig.4- Octaèdre régulier obtenu en tronquant les sommets du cube.
© A. Boudet

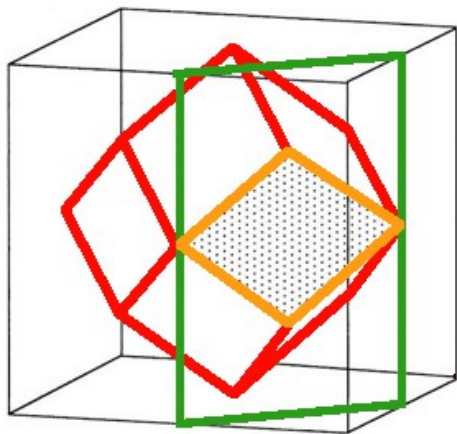


Fig.5- Dodécaèdre rhombique obtenu en tronquant les arêtes du cube.
© A. Boudet

insécable, **un volume élémentaire**, trop petit pour être isolé par nos instruments. Dans le cas de la calcite, ce volume a la forme d'un rhomboèdre. En 1840 son élève, **Gabriel Delafosse**, nomme ce volume **la maille élémentaire**. Ces volumes élémentaires s'empilent parfaitement les uns sur les autres comme des briques pour reconstituer les cristaux naturels (fig.2).

Haüy rechercha les mailles élémentaires de nombreux types de cristaux et découvrit qu'elles se réduisaient à un petit nombre de formes: dodécaèdres, prismes hexagonaux, octaèdres et tétraèdres. Ce n'est qu'avec l'avènement de la théorie atomique et les mesures aux rayons X que ces notions seront complétées et précisées.

Dans cette recherche d'une définition géométrique du cristal, nous arrivons à la conclusion que **la structure d'un cristal est la répétition d'une maille élémentaire dans les trois directions de l'espace.**

Les faces inclinées par excroissance

Comment expliquer que les facettes des cristaux ne restent pas plates et présentent des formes irrégulières, des marches, des terrasses, des pyramides, etc.? Dans son *Essai d'une théorie de la structure des cristaux*, l'abbé René Just Haüy avance une explication ingénieuse. Une face est plane lorsque les mailles élémentaires sont accolées les unes contre les autres à la surface et toutes présentes, comme un pavage uniforme.

Mais en ajoutant ces mailles de façon régulière en dégradé à partir des arêtes, comme des excroissances, on obtient des escaliers à marches régulières qui forment des pentes à inclinaisons bien définies qui créent des formes telles que des pyramides (fig.2 - voir plus loin *Formation des cristaux*).

Les formes tronquées

Bien que ces formes pyramidales se soient créées en tant qu'excroissances, on peut les voir géométriquement comme des formes tronquées.

À partir d'un volume en forme de **cube**, si on le tronque par un plan incliné qui unit les sommets opposés (en vert sur la figure 4), et qu'on le fait dans les 3 orientations, on obtient un polyèdre à 8 faces triangulaires (en rouge). Un polyèdre à 8 faces est nommé **octaèdre**. Il existe de nombreux octaèdres qui diffèrent par la forme de leurs faces. Dans **l'octaèdre régulier, les 8 faces sont des triangles équilatéraux** (leurs 3 côtés sont de longueur égale).

Si on tronque le cube parallèlement au plan qui unit

deux arrêtes opposées (en vert sur la figure 5), et qu'on le refait dans les 6 orientations, on obtient un polyèdre de 12 faces losangiques (en rouge). **Un polyèdre à 12 faces est nommé dodécaèdre**. Il existe de nombreux dodécaèdres qui diffèrent par la forme de leurs faces. Nous avons obtenu un dodécaèdre losangique, mais comme dans ce domaine on emploie les noms grecs, on le nomme **dodécaèdre rhombique** ou **rhombo-dodécaèdre**, *rhombe* signifiant *losange*.

Les autres formes de maille génèrent des formes tronquées plus complexes: pyramides, prismes, rhomboèdres, etc. Les minéralogistes les ont répertoriées au point qu'en regardant la forme macroscopique d'un cristal, ils peuvent deviner la forme de sa maille. De nos jours, la maille est définie au niveau atomique comme nous allons le voir dans la section suivante. Deux excellents exposés sur les formes des minéraux en relation avec leur maille atomique sont disponibles sur le [site de P. Gosse](#) et dans le petit ouvrage détaillé de J. Deferne [Introduction à la cristallographie](#).

La géométrie des mailles atomiques

Les rayons X ont été découverts en 1895 par le physicien allemand **Wilhelm Röntgen**, premier prix Nobel de physique. C'est en 1912 que **Max von Laue** (prix Nobel de physique 1914), constatant que les rayons X sont diffractés en faisceaux séparés par les cristaux, pose les bases d'une méthode qui consiste à recueillir le cliché de diffraction d'un faisceau de rayons X par un cristal pour en déterminer la structure atomique.

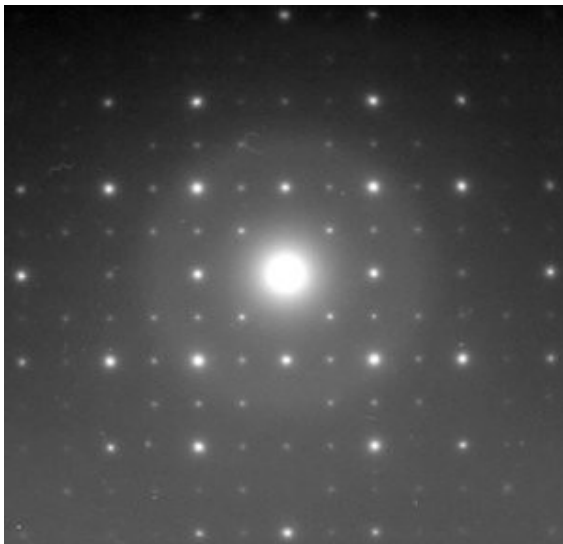


Fig.6- Cliché de diffraction de rayons X par un cristal

Sur les clichés de diffraction des cristaux, on voit des séries de taches disposées en rangées symétriques (fig.6). Leur analyse montre que les atomes sont disposés de façon régulière et alignée dans des plans. Chacune des taches correspond à une famille de **plans parallèles et équidistants**.

La distance entre ces plans est extrêmement petite, inférieure au **nanomètre**. Un nanomètre est un millionième de millimètre. En nous plongeant dans le monde des atomes, nous effectuons un zoom prodigieux de 10 millions de fois. Inutile de dire qu'avec leurs petits marteaux, les minéralogistes ne pouvaient pas cliver les cristaux à cette échelle.

La régularité avec laquelle les atomes sont empilés est une façon d'occuper un volume réduit. En effet, si nous voulons empiler des oranges de tailles identiques en les tassant au maximum sur une surface plane, elles s'arrangent en lignes décalées (fig.7). De même les atomes se touchent, comme par exemple dans un cristal de sel, qui combine atomes de sodium (Na) et atomes de chlore (Cl) (fig.8).

Toutefois, la réalité des atomes comporte une différence majeure avec celle des oranges: **les atomes n'ont pas de surface extérieure bien définie** ni un rayon précis. **Un atome n'est pas un objet en soi que l'on peut toucher, photographier et mesurer. C'est un modèle**, autrement dit une représentation mathématique commode et fructueuse des forces internes de la matière (*voir article Matière et rayonnements*). C'est pourquoi les images des atomes ne sont que des représentations symboliques.

La figure 9 montre une autre façon de représenter les atomes. Ils y sont beaucoup plus petits et reliés par des barres. C'est certainement moins conforme à la réalité, car les barres n'ont pas d'existence physique solide. Elles sont seulement un concept abstrait. Dans le domaine de l'infiniment petit, la notion d'objet solide se perd. **Les barres sont dessinées pour mettre en évidence les symétries de cet empilement**. Toutefois, elles peuvent aussi suggérer les influences électriques entre atomes, leurs liaisons chimiques.



Fig.7- Tassement d'oranges ordonnées en lignes alternativement décalées.
© J. Deferne

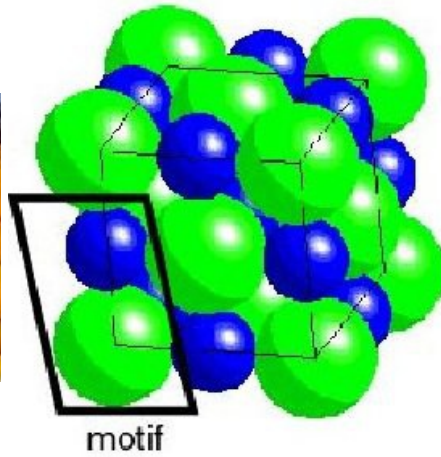


Fig.8- Empilement cubique d'atomes dans une maille de chlorure de sodium. Dans cette représentation, les ions chlore (en vert) occupent les sommets d'un cube, et les ions sodium (en bleu) occupent le centre des arêtes de ce cube. Un motif répétitif est constitué d'un atome de chlore et d'un atome de sodium (cadre noir). Image Wikipedia

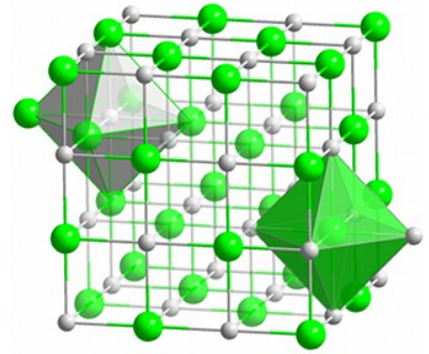


Fig.9- Même réseau cristallin cubique à faces centrées de chlorure de sodium, souligné par des barres. Les ions sodium (en gris) sont répartis en octaèdres autour de chaque ion chlore (en vert) et vice-versa. Image Wikimedia

Le réseau cristallin et son motif répétitif

Les résultats du diagramme de diffraction du sel indiquent que les atomes du chlorure de sodium sont disposés en un **motif** composé d'un atome de chlore et d'un atome de sodium (fig. 8 et 9). Ce motif se répète de façon périodique. C'est pourquoi il n'est pas nécessaire de préciser la position de chaque atome du cristal pour le décrire. On peut se contenter de décrire le motif répétitif et dire où on doit le reproduire. C'est sur l'ensemble des points situés aux sommets et au centre des faces d'un cube élémentaire (le centre de chaque atome vert sur la figure 8), disposition appelée système cubique à faces centrées.

Il en est de même pour tous les cristaux. Il est possible de décrire totalement un cristal en mentionnant d'une part le **motif** répétitif et d'autre part le **réseau** de points sur lequel il est répété.

On peut comparer cette séparation de la position des atomes d'un cristal en deux éléments à la disposition d'un carrelage sur le sol. Le motif répétitif est analogue à un seul carreau. Si on marque sur le sol l'emplacement de chaque carreau, disons en repérant le coin inférieur gauche du carreau par un point rouge, alors on dessine un réseau de points rouges sur lesquels on dépose le motif élémentaire (fig.10).

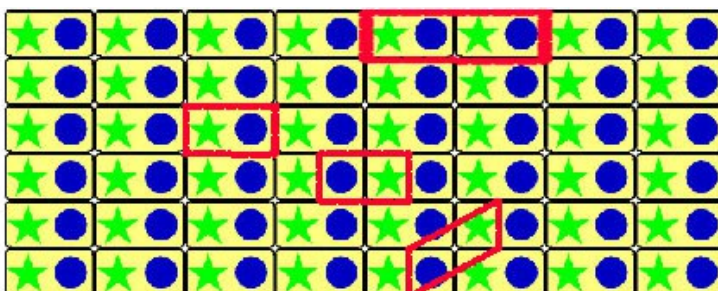
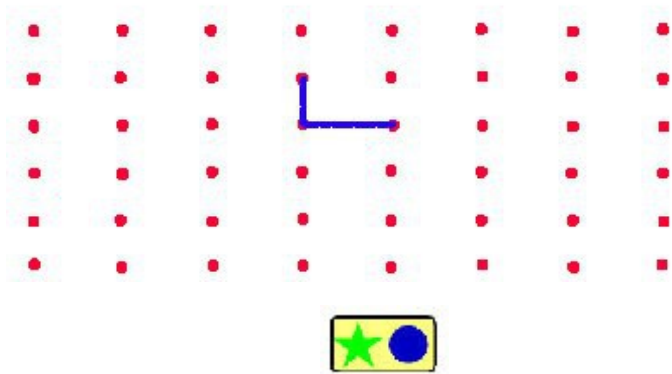


Fig.10- Un carrelage peut être décrit ...

Un même carrelage peut être décrit de plusieurs façons. Plusieurs motifs sont possibles: 3 exemples de mailles simples (comportant un seul motif) sont donnés (cadres rouges). Une maille double est représentée dans le haut.



... comme un réseau de points dessinés sur le sol, sur lesquels on dépose ...

Les traits bleus sont les arêtes du carreau, les 2 vecteurs de répétition du réseau.

... un carreau orné de son motif répétitif.

Tandis que la structure du pavage du sol se déroule sur une surface à deux dimensions, la répétition de la maille cristalline se produit dans l'espace à trois dimensions. La maille est comme une boîte dans laquelle est placé le motif, constitué d'atomes et de molécules disposées à des places fixes de la boîte. Cette boîte peut avoir une forme rectangulaire, droite comme une boîte de chaussures. Mais la maille peut avoir d'autres formes avec des angles entre les arêtes différents de l'angle droit. Ce sont des prismes et des formes parallélépipédiques.

De cette description, les scientifiques ont tiré une définition d'un cristal: **Un cristal est un solide à structure polyédrique périodique, formée d'un empilement ordonné d'atomes, de molécules ou d'ions.**

La multiplicité des mailles

La décomposition abstraite des ensembles atomiques cristallins réels en 2 éléments n'est pas unique. Pour un même cristal, il y a différentes façons de définir sa maille. La figure 10 de l'assemblage de carreaux en montre 4 (cadres rouges).

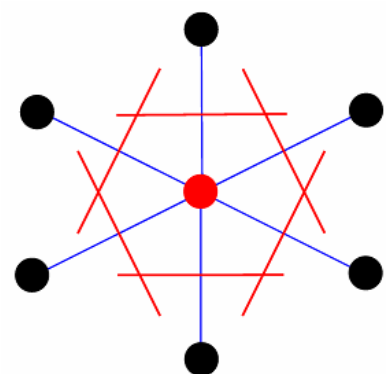
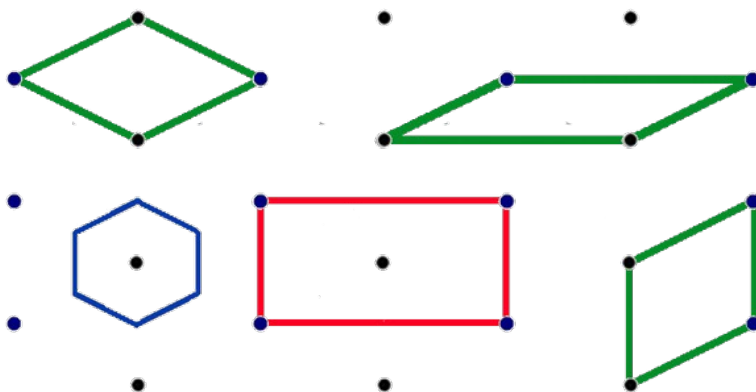


Fig.11- Différents types de mailles dans un réseau rectangulaire centré en 2 dimensions. La maille conventionnelle du réseau (en rouge dans la figure) possède des côtés parallèles aux axes de symétrie du réseau et englobe deux motifs. Les mailles vertes sont des exemples de mailles primitives. En bleu, la maille de Wigner-Seitz. © A. Boudet

Fig.12- Méthode de détermination d'une cellule de Wigner-Seitz. Image Wikipedia

Par exemple, on aurait pu définir un carreau (maille) avec le rond bleu positionné à gauche. Ou bien un carreau qui soit non pas un rectangle, mais un parallélogramme. Examinons cette question sur la figure 11 où chaque point représente un motif sur une surface en deux dimensions. Les mailles vertes sont des exemples possibles de mailles simples comportant un seul motif. On les appelle **mailles primitives**. On remarque qu'il n'y a pas un choix unique de maille primitive, mais des choix qui nous sont plus ou moins commodes, plus ou moins parlant par leur simplicité. Simplicité signifie peut-être

que nous leur trouvons plus de symétrie.

La maille rouge nous parle encore plus, car elle montre bien les éléments de symétrie. On la retient comme **maille conventionnelle**. Mais on remarque qu'elle comporte deux motifs identiques (l'un à un coin représenté en bleu, l'autre au centre représenté en noir). Les motifs des autres coins sont associées aux mailles contigües. C'est une **maille multiple**.

Il existe toutefois une maille primitive tout-à-fait particulière qui représente parfaitement les symétries internes, c'est la **maille de Wigner-Seitz**. On la construit autour d'un point du réseau (fig.12, point rouge) en traçant les lignes qui le joignent aux points voisins (lignes bleues). On les coupe en leur milieu par un plan perpendiculaire (lignes rouges). La maille ou cellule de Wigner-Seitz est la figure qui en résulte (en rouge). Si on effectue cette construction dans le cas de la maille rectangulaire centrée de la figure 11, on obtient un hexagone (en bleu).

Ces exemples à deux dimensions nous ont permis de comprendre ce que sont les mailles. Dans le cas des cristaux, il nous faut maintenant les imaginer en 3 dimensions. Nous ferons connaissance avec les différentes géométries des réseaux cristallins, puis nous observerons quelques belles cellules polyédriques de Wigner-Seitz dans l'espace.

La géométrie des réseaux cristallins

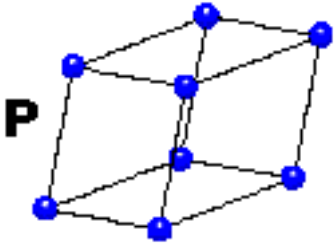
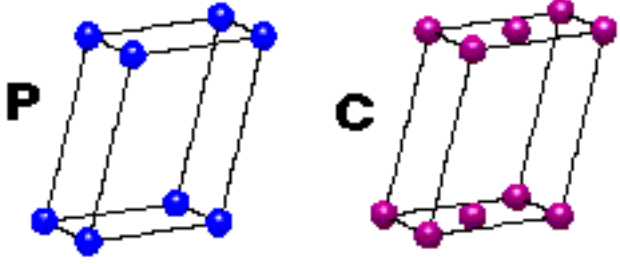
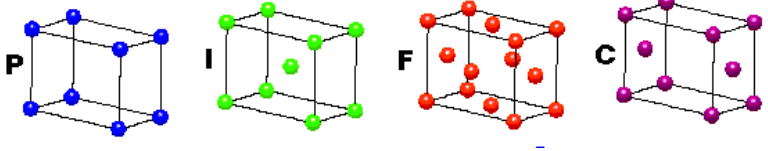
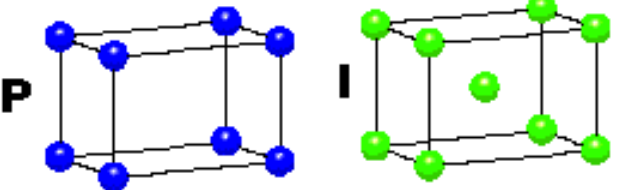
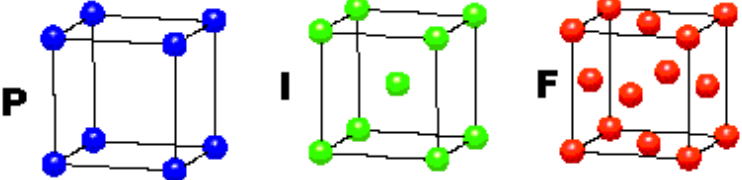
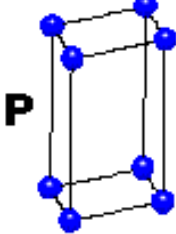
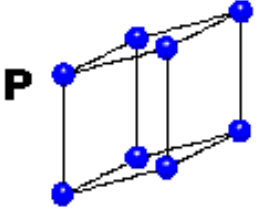
Nous laissons maintenant de côté les motifs de la maille primitive pour nous occuper uniquement des points où ils sont disposés, les réseaux. Quels types de réseaux pouvons-nous découvrir dans l'immense variété des cristaux connus. Mon but n'est pas de faire un catalogue, mais de comprendre comment **la nature se construit sur des bases géométriques et de nous en émerveiller**.

Bien avant la description atomique des cristaux, en recherchant mathématiquement les structures qui sont compatibles avec une périodicité dans les trois directions de l'espace, **Auguste Bravais** (1848) a montré que le nombre de systèmes cristallins possibles était très limité. Il a répertorié **14 types de réseaux** qui sont des variantes de seulement **7 systèmes cristallins**.

Ainsi dans la nature, seulement 7 formes polyédriques de base, **7 briques élémentaires, permettent de construire l'infinité structurale des minéraux**. Toutefois, si leurs formes sont semblables d'un minéral à l'autre, elles varient par leurs **dimensions**. Longueur, largeur, hauteur d'une maille sont spécifiques à chaque forme chimique cristalline.

Voici ces 14 types de réseaux (fig.13). Leur maille est parfois primitive (**P**, en **bleu**) avec un seul site par maille. Si un deuxième site existe au centre de la maille, c'est une maille centrée (**I**, en **vert**). Lorsque chacune des 6 faces comportent un site (**F**, en **rouge**), ce site étant commun à deux mailles contigües, cela fait 4 sites par maille. On rencontre parfois aussi des mailles avec seulement deux faces centrées (**C**, en **violet**), soit 2 sites par maille.

Fig.13- Les 7 systèmes cristallins et les 14 réseaux

	<p>Le système triclinique est le système le plus général car il englobe tous les autres comme des cas particuliers. Les côtés de la maille (appelés axes) sont obliques. Leurs dimensions (largeur, longueur et hauteur) sont toutes inégales. On peut le décrire comme un prisme incliné dont les 6 faces sont des parallélogrammes.</p>
	<p>Si nous prenons deux de ces axes (ici ceux du plan horizontal) et que nous les écartons pour ajuster l'angle à 90°, nous obtenons le système monoclinique. C'est un parallélépipède incliné avec 4 faces rectangulaires. Les 2 autres sont des parallélogrammes.</p>
	<p>Redressons le 3e axe à la verticale afin qu'il soit à angle droit avec les deux autres et nous obtenons le système orthorhombique. C'est un prisme droit avec 6 faces rectangulaires.</p>
	<p>Continuons nos ajustements en modifiant la longueur des axes. Lorsque deux de ces axes ont une longueur égale, une face devient carrée. Nous obtenons le système quadratique ou tétragonal avec 2 faces carrées et 4 faces rectangulaires.</p>
	<p>Enfin, si le troisième axe a la même longueur que les deux autres, cela devient un cube. C'est le système cubique.</p>
	<p>Le système hexagonal dérive du système orthorhombique en ajustant l'angle de deux axes à 120°. On obtient un prisme droit dont la base est un losange.</p>
	<p>Dans le système rhomboédrique, les trois axes sont de même longueur et les trois angles sont égaux, mais non droits. Les faces sont toutes des losanges (des rhombes).</p>

Il existe un lien entre la géométrie de ces réseaux à l'échelle atomique et la géométrie des cristaux visibles à l'œil nu. En effet, lorsqu'on le clive, le cristal se fractionne le long des plans atomiques qui contiennent les atomes en plus grande quantité, autrement dit les plans simples de la maille (fig.14). **Les facettes extérieures sont donc la manifestation macroscopique des plans atomiques microscopiques.**

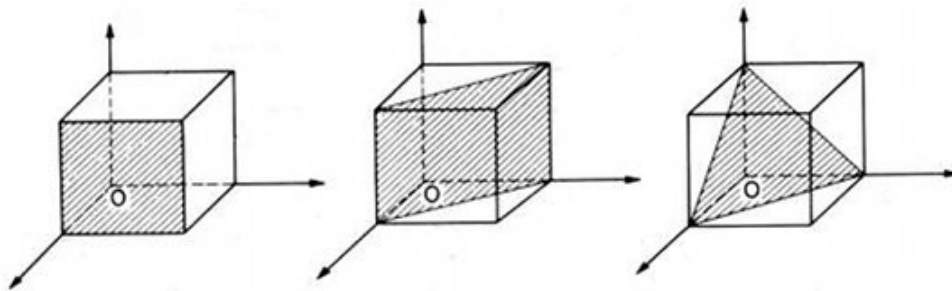


Fig.14- Plans de clivage (hachurés) du système cubique

La cellule polyédrique symétrique de Wigner-Seitz

La maille de Wigner-Seitz (WS) est découpée dans l'espace à trois dimensions selon le procédé exposé plus haut en deux dimensions. Elle est très intéressante du point de vue géométrique.

En effet, puisque pour le dessiner on trace un plan entre deux sites du réseau, cela délimite le territoire de chacun des sites. La cellule étant limitée par des plans, c'est par définition un polyèdre. **On a ainsi découpé l'espace en polyèdres identiques.** Ces polyèdres se touchent et leur empilement remplit donc complètement l'espace, sans aucun vide (voir en annexe Remplir l'espace).

Puisqu'on construit le polyèdre autour d'un site et qu'on tient compte de tous les sites voisins, **il reflète parfaitement les symétries du réseau.**

Illustrons cette géométrie dans le cas du système cubique.

Le cube du réseau cubique simple

La maille WS du réseau cubique simple est un **cube** qui reflète le cube de la maille conventionnelle (fig.15). Les cubes s'empilent parfaitement les uns avec les autres.

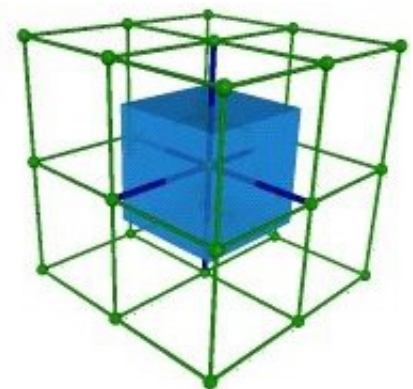


Fig.15- Maille de Wigner-Seitz du réseau cubique simple: un **cube**
Merci à Laura Malcolm

L'octaèdre tronqué du réseau cubique centré

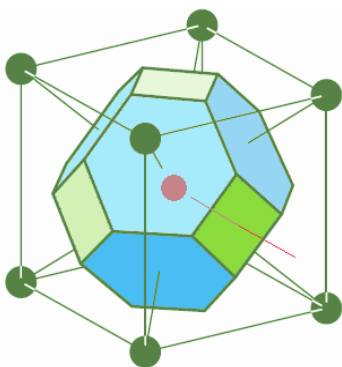


Fig.16- Maille de Wigner-Seitz du réseau cubique centré: un **octaèdre tronqué**. © A. Boudet

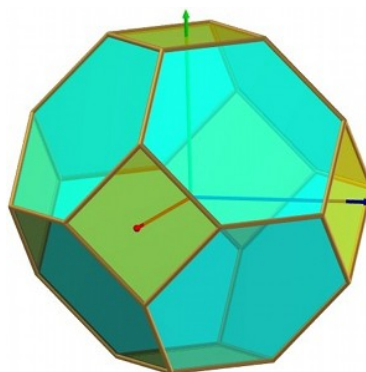


Fig.17- Belle représentation d'un **octaèdre tronqué**.
Merci à Mathcurve

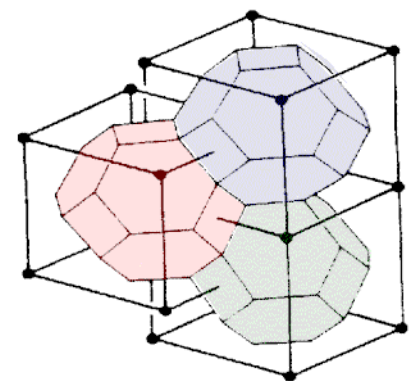


Fig.18- Empilement d'octaèdres tronqués dans le réseau cubique centré. Merci à Laura Malcolm

Pour dessiner la maille WS du réseau cubique centré (fig.16), partons du site central (en rouge), et imaginons la ligne (en rouge) qui le relie au site central du cube voisin. Le plan qui les sépare à mi-distance est la face du cube (en vert). Les 6 faces du cube conventionnel appartiennent donc à ce polyèdre. Elles sont tronquées par les plans qui séparent le site central des sommets, soit 8 autres faces (en bleu).

Au total, on a un cube à 6 faces carrées tronqué par 8 faces hexagonales, soit 14 faces au total (fig. 16). Il peut être considéré comme un octaèdre (les 8 faces bleues - voir fig.4) dont les sommets sont tronqués par les 6 autres (vertes) (fig.17).

Comme prévu, lorsqu'on les empilent, ils s'ajustent parfaitement pour remplir l'espace sans vide (fig. 18).

Le dodécaèdre rhombique du réseau cubique à faces centrées

Dans le réseau cubique à faces centrées, le centre n'est pas occupé par un site. Pour dessiner la maille, on part d'un site au centre d'une face du cube conventionnel (en rouge, fig.19). Ses plus proches voisins sont situés sur les centres des faces de ce cube et à ses sommets. Ils dessinent un autre cube décalé par rapport au premier (en vert) et sont situés au milieu des 12 arêtes de ce nouveau cube. Ils sont au nombre de 12.

Si nous traçons les plans perpendiculaires aux lignes qui joignent le point central à ces 12 proches voisins, nous obtenons 12 faces losanges. C'est un dodécaèdre (12 faces) rhombique (losanges).

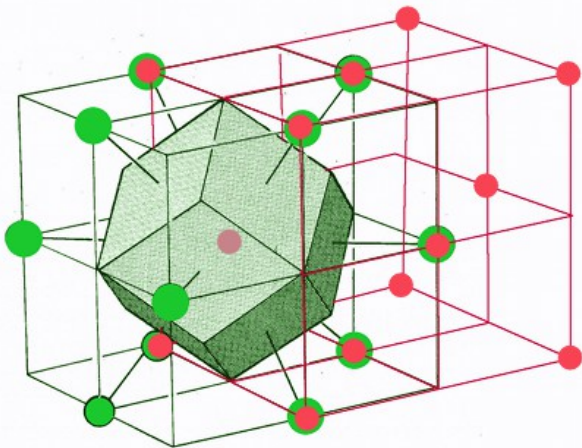


Fig.19- Maille WS du réseau cubique à faces centrées: le **dodécaèdre rhombique**

© A. Boudet

Voir aussi [Mathcurve](#)

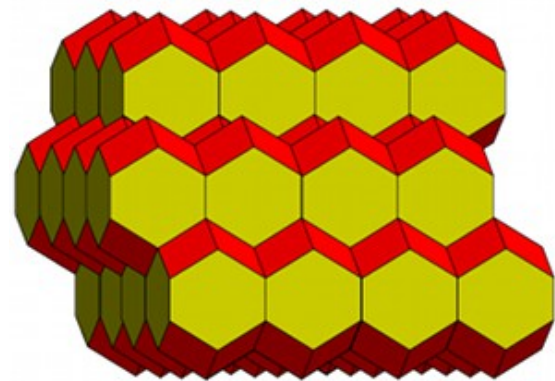


Fig.20- Maille WS du système tétragonal centré: le **dodécaèdre rhombo-hexagonal**. Empilement de dodécaèdres rhombo-hexagonaux en "nid d'abeille"

Merci à [Wikipedia](#)

Nous avons déjà rencontré le **dodécaèdre rhombique** plus haut (fig.5) comme cube dont on a tronqué les arêtes. Il n'est pas régulier car ses sommets ne sont pas tous identiques. 8 sommets sont d'ordre 3 (3 arêtes en partent) et 6 sommets sont d'ordre 4. Leur empilement est bien entendu parfaitement ajusté dans l'espace à 3 dimensions.

Le dodécaèdre rhombo-hexagonal du réseau tétragonal centré

Les autres réseaux résultent du cube en l'étirant dans un sens ou dans l'autre. Par exemple, si on tire sur deux faces opposées, le cube devient un parallélépipède rectangle, donc on a le système tétragonal.

En conséquence, la maille WS du système tétragonal résulte d'un étirement de la maille WS du système cubique. Ainsi, la cellule WS du système tétragonal centré est un dodécaèdre rhombique

étiré. Certaines des faces losangiques s'étirent en hexagone. On obtient le **dodécaèdre allongé** ou **dodécaèdre rhombo-hexagonal**.

Le dodécaèdre rhombo-hexagonal comporte toujours 12 faces, dont 8 sont des losanges et 4 des hexagones équilatéraux.

Nous vérifions (fig.20) que leur empilement est parfaitement ajusté dans l'espace à 3 dimensions.

Autres réseaux

La figure 21 montre les polyèdres obtenus pour les autres systèmes à partir du cube par déformation globale, soit en l'étirant, soit en l'inclinant.

Fig.21- Merci à Laura Malcolm

Les cristaux à symétrie 5 et le nombre d'or

Les formes polyédriques des mailles cristallines existantes sont en nombre limité. On peut montrer géométriquement que les polyèdres capables de s'empiler par translation périodique pour remplir tout l'espace doivent obéir à certaines règles simples de symétrie (voir en annexe *Remplir l'espace*). **Certaines formes de polyèdres ne conviennent pas pour un tel empilement** parce qu'elles laissent des vides entre elles, comme les oranges de la fig.7. C'est par exemple le cas des prismes à 5 faces (pentagonaux) et des polyèdres à symétrie d'ordre 5.

On dit qu'une forme possède une **symétrie d'ordre 5** autour d'un axe si, lorsque vous la tournez d' $1/5$ de tour, vous retombez sur la même forme. Par exemple, un cube possède la symétrie d'ordre 4 par rapport à un axe qui traverse le centre de 2 faces opposées.

Or au début des années 1980, malgré cette impossibilité théorique, on a obtenu par trempe rapide des alliages d'aluminium et de manganèse dont le diagramme de diffraction aux rayons X est bien net et montre bel et bien la symétrie 5. Au début, cela a beaucoup intrigué (fig.22). Cette découverte et son analyse ont élargi le concept géométrique du cristal.

Pour expliquer l'existence de cette symétrie, il faut associer deux polyèdres différents et non un seul dans la construction. Pour se représenter cette association de façon plus claire, examinons comment c'est possible à deux dimensions, donc sur une surface plane. Cela a été étudié par des mathématiciens sous le terme de **pavage de l'espace**.

Voici un exemple de pavage étudié par Roger Penrose utilisant deux types de losanges (fig.23, les verts et les jaunes). Il est à remarquer qu'ils ne sont pas pas orientés dans la même position. Il n'y a donc pas de régularité de translation. De plus, aucune périodicité n'est visible, même avec des motifs géants. Et pourtant, c'est un assemblage compact construit selon un ordre rigoureux. La symétrie qui en résulte est d'ordre 5.

Ces constructions géométriques en 3 dimensions qui ont une régularité précise, mais ne présentent pas de périodicité de translation sont appelées des **quasi-cristaux**. Comme le montre le diagramme de diffraction faits de points disposés selon de belles symétries (fig.22), un ordre γ est à l'œuvre. Mais quel est cet ordre?

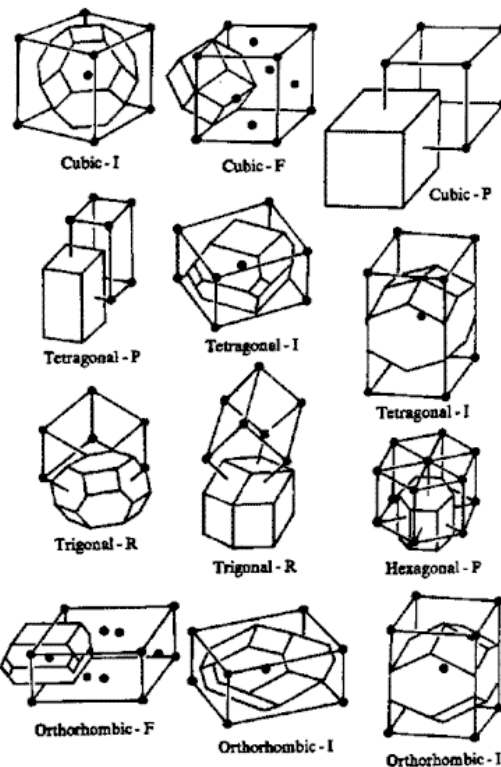




Fig.22- Diagramme de diffraction d'un quasi-cristal de symétrie 5. Merci aux chimistes de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg

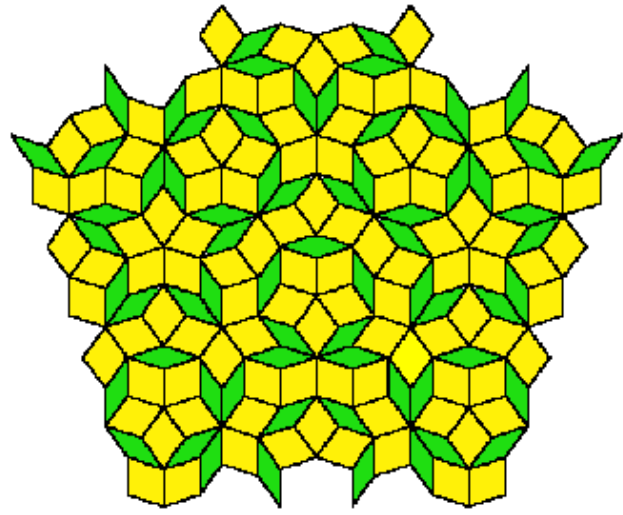


Fig.23- Un pavage du plan avec deux types de losanges inventé par R. Penrose. Pour plus de détails, voir Pavage de Penrose

Il existe plusieurs façons de répondre à cette question. Si nous prenons comme exemple le pavage de Penrose, la première façon est de donner le mode de réalisation du dessin (voir *Pavage de Penrose*). La deuxième est de décrire le pavage, non dans son espace réel de dimension 2 (la surface) mais dans un espace plus vaste de dimension 4. Dans celui-ci, le pavage peut être décrit comme périodique, donc de façon bien plus simple (voir en annexe *Décrire une réalité dans un super-espace*). De la même manière, **un quasi-cristal devient périodique quand il est décrit dans un super-espace de dimension 6.**

Au passage, je signale pour les amateurs que dans ce pavage, on rencontre le **nombre d'or**. C'est tout-à-fait logique car ce nombre est associé à la symétrie 5. Il vaut $(1+\sqrt{5})/2$. On le désigne habituellement par la lettre ϕ (phi). Si on dessine un pentagone régulier (tous les côtés et les angles ont la même valeur) dont le côté mesure 1, on trouve le nombre ϕ sur la diagonale (fig.24). Les triangles qui sont construits sur cette diagonale sont appelés triangles d'or. Il en existe 2 sortes, l'une dont l'angle est aigu (en bleu) et l'autre dont l'angle est obtus (en jaune). Et bien (ce n'est pas un hasard), les losanges du pavage de Penrose sont constitués de l'assemblage de ces 2 triangles (voir les détails dans *Pavage de Penrose*).

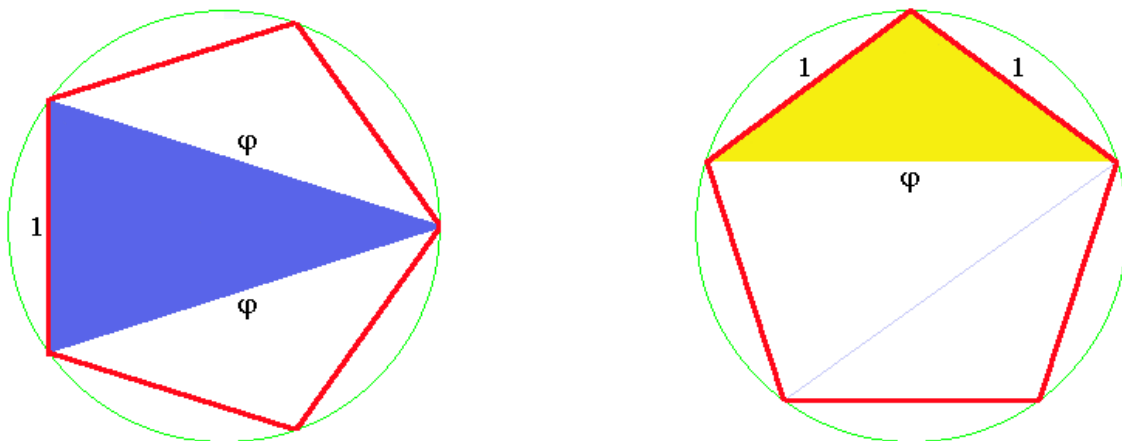


Fig.24- Les triangles d'or sont inscrits dans un pentagone régulier. La diagonale a pour longueur $\phi = (1+\sqrt{5})/2$

Après la découverte historique d'un quasi-cristal à symétrie 5, d'autres structures quasi-cristallines ont été reconnues. En conséquence, en 1992 l'Union internationale de cristallographie a modifié sa définition d'un cristal pour englober celle d'un quasi-cristal. Dorénavant, **un cristal est un échafaudage atomique dont la diffraction est faite de points qui traduisent un ordre précis de construction**. Mais cet ordre peut être une périodicité ou non.

Cristaux aperiodiques - cristaux incommensurables

A la même époque, on commençait à étudier d'autres types de cristaux aperiodiques, les **cristaux incommensurables**. Pour comprendre de quoi il s'agit, imaginons une périodicité sur une seule ligne, une sorte de cristal à une seule dimension (fig.25). Un cristal classique périodique est représenté par les points bleus, placés selon une périodicité a . Imaginons maintenant que les points du réseau sont décalés par rapport aux points bleus (d'une distance u_n). Leur position réelle est le point rouge. On remarque que le décalage varie de façon périodique, selon une périodicité λ . Il existe donc 2 périodicités, la bleue (a) et la rouge (λ). Si ces deux sont en rapport, elles vont coïncider régulièrement et on aura une périodicité globale qui sera un multiple des deux. On dit qu'elles sont commensurables. Si les deux n'ont pas de rapport entre elles, ne sont pas multiples l'une de l'autre, ou n'ont pas un multiple commun, elles sont incommensurables. Le décalage ne tombera jamais à la même valeur.

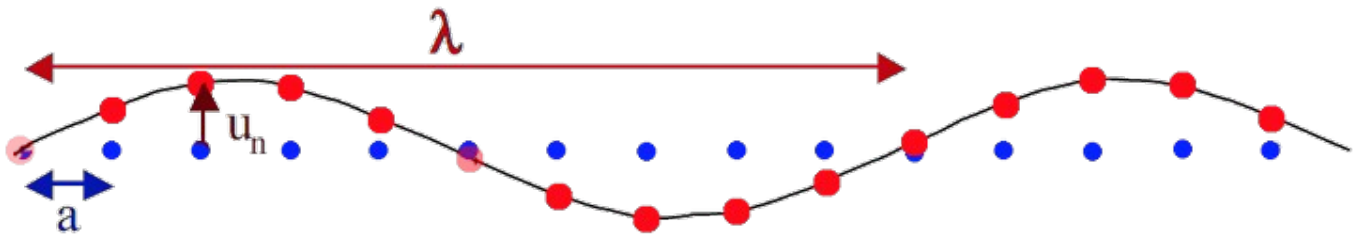


Fig.25- Représentation d'un cristal incommensurable sur une ligne. Les sites existants (en rouge) peuvent être décrits comme un site théorique (en bleu) qu'on déplace d'une quantité u_n . La position des sites bleus est un multiple de a , et la longueur de u_n varie selon une périodicité λ . D'après S.

Ravy

Un cristal incommensurable est donc aperiodique, mais dans cette aperiodicité se cachent deux périodicités qui se combinent. Pour le décrire mathématiquement, comme les quasi-cristaux, il est beaucoup plus simple de le faire dans un espace de dimension supérieure (4 à 6 dimensions) (voir en annexe *Décrire une réalité dans un super-espace*).

En 1972, **De Wolf** et **Van Aalst** ont mis en évidence des domaines incommensurables à 3 dimensions dans des cristaux de carbonate de soude. D'autres ont été reconnus par la suite.

Formation des cristaux - la cristallisation

Changeons de paysage. Après avoir observé les étonnants arrangements géométriques des cristaux à l'échelle atomique, nous pouvons nous poser certaines questions: comment la matière minérale peut-elle ainsi s'organiser de façon aussi ordonnée? Par quel processus, entraînés par quelle forces, les atomes sont-ils ainsi disposés?

Rigidification et fluidification

Dans le liquide, les atomes (ou les molécules constitutives qui sont des petits groupements d'atomes) sont libres de se déplacer les uns par rapport aux autres, tandis qu'en devenant un corps solide comme un cristal, ils sont immobilisés dans un réseau.

Notre expérience la plus familière d'une cristallisation est celle de l'eau dans laquelle apparaissent des glaçons lorsqu'on la refroidit en-dessous de 0 degrés C. **On passe d'un état fluide léger à un état**

rigide et dur.

Dans le langage courant, on parle de *cristallisation* de façon plus générale pour évoquer quelque chose qui au départ est fluide, puis se fixe et durcit. Des **idées** se cristallisent dans l'esprit, ce qui signifie que l'esprit devient rigide sur certains points. En ce qui concerne le corps, des **cuirasses** (ou **armures**) **musculaires** se forment lorsque des énergies cessent de circuler dans les tissus et s'y cristallisent, provoquant des contractures et la rigidification des tissus (*voir Psychologie biodynamique*). On parle également de cristallisation pour décrire quelque chose qui, d'abord flottant et indéterminé, se matérialise et prend une forme tangible.

La transformation existe dans l'autre sens, du cristal au liquide. Lorsqu'on les chauffe, les cristaux fondent et deviennent liquides. La plupart des matières minérales, y compris les roches et les métaux, peuvent **fondre** lorsqu'on les chauffe. En ce qui concerne les **métaux**, on les fond en un liquide visqueux pour les verser dans des moules où ils prennent les formes voulues. Mais cette température de fusion peut parfois être très élevée: environ 1500 °C pour le fer, 1000 °C pour le cuivre et l'or, 960 °C pour l'argent. L'aluminium fond à une température plus basse (660 °C). Ce sont le plomb (327 °C) et l'étain (230 °C) qui sont les plus faciles à fondre. En refroidissant, les métaux cristallisent dans des structures et configurations qui dépendent à la fois de leur nature chimique, mais aussi beaucoup du processus de refroidissement, en particulier de la vitesse de refroidissement.

Les **roches** fondent lorsqu'on les chauffe suffisamment. La nature nous le démontre avec la **lave** qui sort liquide de dessous la croûte terrestre, se refroidit en surface et cristallise. Mais ce refroidissement rapide ne favorise pas la formation de beaux cristaux. Les pierres d'ornement se forment par d'autres processus dans la profondeur de la terre, où la pression est associée à la chaleur et le refroidissement lent. En surface, dans les grottes, elles résultent du lent dépôt par l'eau de substances minérales sur un petit bout de cristal existant (un germe).

Mise en ordre

Comment passe-t-on d'un état liquide où les molécules sont mobiles et dispersées en désordre, à un cristal ordonné? Dans les liquides tels que l'eau, l'huile ou un métal en fusion, les molécules se déplacent librement les unes par rapport aux autres. Si on les représente par des boules, on peut les imaginer glissant et roulant les unes sur les autres. Et puis, au signal d'une température suffisamment basse, les voilà qui se rangent en ordre impeccable selon des lignes, des plans et des mailles. Quel en est le ressort?

Pour en donner une idée, imaginons que les molécules sont comme des personnes, nous. Nous assistons à un cours de gymnastique ou de danse où les personnes sont dispersées dans toute la salle, en désordre, pour remplir l'espace au maximum. Du point de vue d'une molécule, nous sommes "dans l'état liquide", car nous avons la liberté de nous mouvoir, de nous retourner (si notre attention n'est pas dirigée vers le professeur), de changer de place, d'échanger notre place avec une autre personne, etc.



Puis, le professeur nous demande de nous disposer en ligne. Comment nous y prenons-nous? Quelques personnes au fond de la salle commencent à se mettre en ligne parallèlement au mur. Il est nécessaire que quelqu'un prenne l'initiative, donne la première impulsion afin que les autres, progressivement, s'ordonnent par rapport à cet embryon de ligne. La ligne se prolonge sur toute la longueur de la salle. En même temps, une autre ligne se crée devant la première et parallèlement à elle. Et une troisième, même si la première et la deuxième ne sont pas achevées.

Naissance et croissance des cristaux

Il en est de même pour un cristal. Dans le liquide, un cristal se forme à partir d'un germe qui naît et

grossit (**crystallogénèse**). On distingue donc deux étapes. La **germination** correspond à l'apparition d'un germe cristallin dans le liquide, sorte de semence ou d'embryon cristallin. Si aucun germe n'est présent, la cristallisation a du mal à démarrer et le liquide peut être refroidi sans cristalliser. C'est un liquide surfondu. Et puis, peut-être à cause d'une petite secousse, le refroidissement devient intolérable pour les molécules et brusquement, un germe se forme.

Refroidir, c'est serrer les molécules encore plus les unes contre les autres. Imaginez que la salle se remplit de monde et que vous deveniez serrés. Vous devrez vous rapprocher et si vous êtes en contact, il y aura une sorte d'ordre local qui va se créer automatiquement pour quelques personnes, à la façon des oranges de la fig.7. En même temps, il sera plus difficile de se déplacer.

La **croissance** est l'augmentation de la taille du germe pour devenir un cristal. Oui, un cristal naît et se développe un peu comme un être vivant. Il grossit en incorporant d'autres molécules qui passent à sa proximité dans le liquide ambiant et se collent à la surface au contact les unes des autres (fig.26).

Pour obtenir un cristal d'une substance donnée, on peut, comme on l'a dit, la fondre puis la refroidir. Il y a aussi la possibilité de la **dissoudre** dans un solvant, puis de laisser évaporer ce solvant. C'est ce qui se produit avec du sel. Si vous dissolvez du sel dans de l'eau en quantité suffisante (eau saturée de sel) et que vous laissez l'eau s'évaporer lentement, vous obtenez des cristaux de sel.

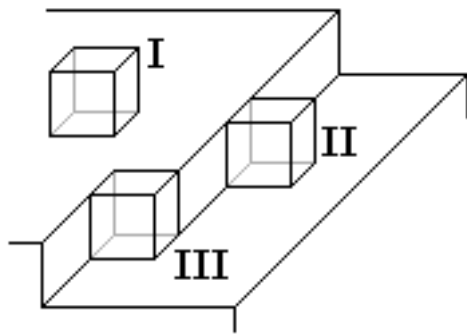


Fig.26- Schéma de déposition de nouvelles molécules ou atomes (représentés par des cubes) à la surface d'un germe cristallin en terrasse. D'après Raphaël, Aude et Benoît

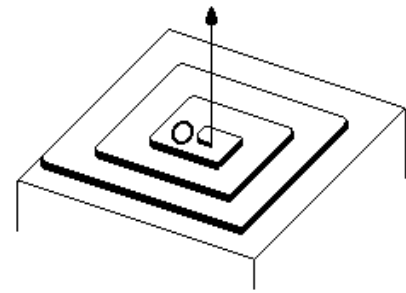


Fig.27- Croissance en spirale à la faveur d'une dislocation qui émerge en surface au point O.

Défauts d'ordre

On a donné des cristaux l'image d'un ordre parfait, mais ce n'est pas exact. En réalité, cet ordre comporte des exceptions, qu'on appelle des **défauts**.

Il se peut que des atomes étrangers s'insèrent dans l'arrangement. Quelquefois un atome est manquant. C'est comme si, d'une rangée à l'autre, l'ajustement ne se fait pas correctement. Imaginons que notre ligne de danse ne se soit pas correctement positionnée par rapport à la précédente, qu'elle ne soit pas vraiment calée. C'est ce qui arrive souvent dans un cristal. Ce défaut est appelé une **dislocation**.

Ce ne sont des défauts qu'au sens d'un ordre parfait, d'une vision idéale. Car ces soi-disant défauts ont toute leur raison d'être dans l'organisation, les caractéristiques et la croissance des cristaux. Ils y participent pleinement. C'est grâce à la présence de dislocations que les métaux peuvent être déformés et travaillés. C'est aussi la présence des dislocations qui donne à la croissance cristalline la possibilité de se faire plus aisément, du point de vue énergétique, sous forme de **spirales** (fig.27 - voir article *Spirale, mouvement primordial de vie*).

Agglomération de cristaux

Revenons à notre salle de danse. Imaginez maintenant que le professeur n'ait pas une place attirée dans la salle, donc qu'on n'impose pas à la ligne de s'orienter dans une direction précise pour le

regarder. Imaginez alors que le début d'une première ligne se forme dans une certaine direction, mais qu'ailleurs dans la salle, un autre embryon de ligne n'ayant pas vu le premier, se forme dans une orientation différente. Les personnes qui sont proches de la première ligne viennent la compléter, s'ordonnent par rapport à elle, constituent d'autres lignes parallèles. Un domaine ordonné se forme dans un coin. De même pour la deuxième ligne. Les domaines respectifs issus de ces deux lignes s'agrandissent jusqu'à se rencontrer. Le raccord entre les deux ne peut pas se faire en ordre et il y a une frontière désordonnée entre les deux domaines. Imaginons qu'une troisième ligne se soit formée de façon indépendante. Trois domaines d'orientations différentes se sont ainsi formés, comme si on avait trois cristaux distincts qui sont accolés.

Matériaux polycristallins

C'est ce qui se produit dans la structure cristalline de beaucoup de roches et de matériaux céramiques, métalliques et polymères. Ces matériaux sont polycristallins. Dans certains matériaux, les domaines cristallins sont de la même nature, mais dans d'autres ils peuvent être de nature différente. Ainsi, le **granite** est fait d'une multitude de petits grains cristallins de quartz, de feldspath et de mica (fig.28).



Fig.28- Surface de granite. Son nom vient de sa structure en grains, bien visibles à l'œil nu: quartz, mica et feldspaths. Merci à Wikimedia

Ces matériaux faits de grains agglomérés ont des **formes indéterminées**. La forme extérieure ne laisse pas deviner l'arrangement cristallin intérieur.

Autre exemple, le **quartz**. Alors que sous la forme populaire de prisme transparent, il est monocristallin, il existe également sous la forme multicristalline de la **calcédoine** (voir en annexe Quartz). Elle est translucide ou opaque car faite d'une multitude de petits cristaux orientés dans tous les sens.

Taille des cristaux

La structure polycristalline résulte de la présence d'une **multitude de germes** dans le liquide ou le magma initial. Au refroidissement, chaque germe grandit en un domaine cristallin jusqu'à toucher le domaine voisin. La taille d'un domaine est limitée par le territoire occupé par les germes voisins. C'est pourquoi **plus les germes sont nombreux, plus les domaines cristallins sont petits**.



Obsidienne. Merci à Wikipedia

Dans certains cas, les cristaux d'un minéral polycristallin sont microscopiques et invisibles à l'oeil nu ou même à la loupe. C'est le cas des métaux dans certaines conditions de cristallisation, et des polymères cristallins, dont les formes externes, qui épousent n'importe quel moule, ne laissent pas deviner leur nature cristalline. Seules les **diffractions des rayons X ou des électrons**, qui donnent accès à l'information au niveau atomique, sont capables de révéler leur nature cristalline.

Structure amorphe et vitreuse

Lorsqu'on refroidit le liquide, les molécules constitutives de ce liquide perdent leur liberté de mouvement. Quelquefois, en l'absence de germes cristallins, le liquide "oublie" de cristalliser

et se fige dans son état du moment. C'est un peu comme si nos lignes de danseurs ne sont plus dans une salle mais dans un bain visqueux qui entrave leurs mouvements. Alors, ils ne peuvent que rester sur place, en désordre.

Cette structure désordonnée est appelée **structure amorphe**. Les liquides visqueux ont également cette structure amorphe. Avec le froid, une huile se fige sans cristalliser. Toutefois, dans l'état visqueux, la structure amorphe reste un peu mouvante. Lorsque les mouvements moléculaires s'arrêtent, on la nomme **structure vitreuse**.

Vitreuse signifie de la nature du **verre**. En effet, les verres présentent cette structure vitreuse. Ce sont des pâtes de silice refroidies rapidement (*voir en annexe Silice*). On les obtient en fondant ensemble du sable et des fondants (chaux, potasse ou soude). Le refroidissement rapide ou trempe favorise la formation de cette structure, car les molécules sont immobilisées avant d'avoir eu le temps de s'organiser.

Pour donner une image plus correcte de l'état vitreux, notons toutefois que la matière n'est jamais figée complètement. Si les molécules ne bougent plus, par contre les atomes dont elles sont composées conservent un intense mouvement vibratoire sur place. Ils rayonnent. **La matière est en constante vibration** et détient une formidable énergie interne.

Parmi les pierres gemmes, certaines sont à l'état vitreux. C'est le cas de l'**obsidienne**, une roche volcanique à base de silice. C'est le cas de l'**ambre**, une résine fossilisée secrétée par des conifères.

Ordre et désordre, un changement spectaculaire

Le passage **de l'état de liquide à celui de cristal** est un changement radical. Le liquide est fluide et s'adapte au récipient dans lequel on le met, il n'a pas de forme en lui-même. Le cristal est compact et dur et conserve la forme dans laquelle il a été taillé. On passe d'une qualité à son opposé et c'est étonnant.

Pourtant, le changement le plus spectaculaire dans ce passage est celui **de l'ordre atomique et moléculaire**. De ce point de vue, il y a peu de changement entre un liquide et un verre (état amorphe) qui n'est qu'un liquide figé, alors qu'il y a un changement radical entre un liquide et un cristal. Si l'on y réfléchit, c'est une métamorphose fantastique. Il suffit d'un déclencheur, d'une pichenette, un petit refroidissement, et la mise en ordre s'effectue.

Dans cette métamorphose, certaines substances passent par des étapes intermédiaires entre liquide et cristal. Ce sont les **cristaux liquides**. Dans les états intermédiaires, on détecte un ordre partiel, de telle sorte qu'ils sont liquides par certains aspects, mais ordonnés selon d'autres (*voir le chapitre suivant*).

Qu'est-ce qui induit la géométrie de l'ordre cristallin au moment du changement? **Comment le cristal choisit-il son orientation** dans un espace qu'on peut supposer **isotrope**, c'est-à-dire sans aucune direction privilégiée? L'espace ressemble à une vaste mer, et soudainement, une orientation cristalline se fait jour. Pourquoi celle-ci?

C'est un mystère profond de la nature dont on connaît peu de choses. Le phénomène obéit aux forces fondamentales et aux symétries internes de la nature. **Il se peut que l'univers soit sous-tendu par des structures géométriques**, y compris notre corps et le corps de la Terre. Je décris scientifiquement cette possibilité dans d'autres articles (*La grille planétaire; Aspects géométriques et sonores de l'Univers*).

COMPLÉMENTS

Diamant et graphite, deux variétés de carbone

Cristaux de diamant

Le diamant est très apprécié en joaillerie comme pierre précieuse, mais tout autant dans l'industrie et l'artisanat mécanique pour sa dureté. Il y est employé pour découper et percer des matériaux durs. Le mot *diamant* vient du latin *adamus*, qui signifie *inaltérable*.

Les diamants, tout comme comme le quartz, présentent un double caractère cristallin par leur **transparence** et par leur **géométrie atomique ordonnée**. Ce sont donc des cristaux typiques.



Diamant

Merci à Rob Lavinsky, iRocks.com CC-BY-SA-3.0

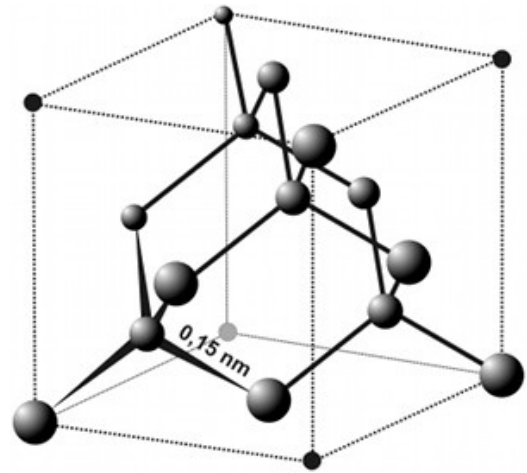


Fig. 29- Structure atomique cubique du diamant. Les atomes représentés sont des atomes de carbone.

Merci à Wikipedia

Le diamant est composé uniquement d'atomes de **carbone**. C'est assez exceptionnel car généralement, les minéraux sont faits d'un assemblage de plusieurs types d'atomes. Ainsi, le quartz est composé d'atomes de silicium et d'oxygène. Seuls le diamant et les métaux sont composés d'un seul type d'atomes. Par exemple, l'or est composé uniquement d'atomes d'or.

Chaque atome de carbone est lié à 4 atomes de carbone voisins par des liaisons qui forment un **tétraèdre** régulier (fig.29). Ces liaisons très solides confèrent au diamant une structure tridimensionnelle extrêmement rigide. Le diamant cristallise dans le système cubique.

Graphite

Le graphite est une substance grise et tendre que l'on peut facilement réduire en poudre. C'est grâce à cette facilité qu'il est utilisé dans les crayons ordinaires à papier avec une mine en graphite. Il sert aussi de lubrifiant sec, à la manière du talc. Il est conducteur de l'électricité à tel point qu'on s'en sert comme électrode. On l'emploie aussi comme charge minérale dans les matières plastiques et les caoutchoucs. Pour fabriquer un **composite à particules de carbone**, on disperse les microparticules de graphite dans la résine afin d'augmenter ses qualités mécaniques et électriques. Elles lui donnent sa teinte grise ou noire. Ils sont employés dans la fabrication des skis, cannes à pêche, raquettes de tennis, ailes d'avion, pièces de carrosserie.

Or le graphite est composé uniquement de carbone tout comme le diamant. Bien que graphite et diamant soient composés des mêmes atomes, leurs propriétés sont opposées (mou / dur, conducteur / isolant, opaque / transparent). Comment est-ce possible?

Ce qui diffère est la façon dont ces atomes sont reliés, leur système cristallin. Le graphite se forme en **couches** planes dans lesquelles les atomes sont liés fortement et ordonnés en réseau hexagonal (fig.30). Par contre, les couches sont très faiblement liées les unes aux autres, ce qui explique qu'elles peuvent facilement glisser les unes sur les autres et se défaire.

Ce sont les conditions de cristallisation qui conduisent à l'une ou l'autre forme. Le diamant se forme sous une grande **pression**, et le graphite à faible pression.



Morceau de graphite
Merci à Wikipedia

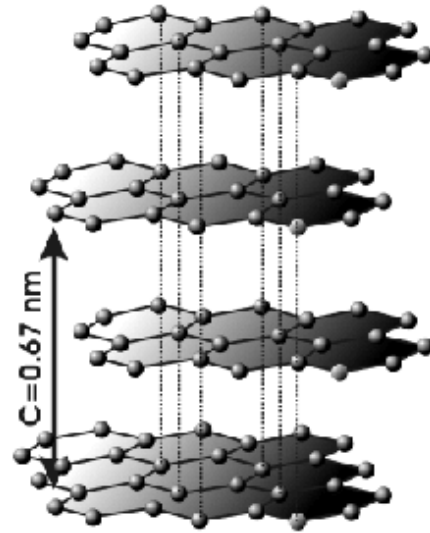


Fig. 30- Structure atomique en couches du graphite
Merci à Wikipedia

Quartz, silice et silicium

Cristaux de quartz

Le quartz est bien connu en tant que pierre d'ornement dans sa forme de prismes transparents et bien développés. Or il est également un abondant constituant des roches de la croûte terrestre. Il est constitué de **silice** de formule chimique SiO_2 , soit un atome de **silicium** (Si) pour 2 atomes d'oxygène (O).

Le cristal de quartz mérite ce qualificatif de cristal à la fois par son ordre atomique et par sa transparence. Comme le diamant, il est le type même du cristal, au point qu'on le nomme **cristal de roche**, ou parfois même tout simplement cristal. Ces cristaux magnifiques se développent dans les fissures des roches dans la chaleur de l'intérieur de la terre. Des eaux très chaudes y déposent de la silice qui refroidit lentement, ce qui favorise sa croissance régulière.

Certaines gemmes sont des variétés de **quartz coloré** par des atomes étrangers insérés en faible quantité parmi les atomes de silicium et d'oxygène. Par exemple l'**améthyste** est du quartz teinté d'oxyde de fer (Fe_2O_3). Sa couleur varie du mauve au violet. Il existe aussi du **quartz rose**, de la **citrine** jaune, et d'autres...

Le **jaspé** contient de 80 à 95 % de silice et de l'argile. Le jaspé rouge est coloré par des argiles ferrugineuses. L'**œil-de-tigre** marron rayé est formé de crocidolite (famille de l'amiante) enrobée dans du quartz.

Variétés moins bien cristallisées du quartz

Il faut que la température de la solution de silice soit assez élevée pour que le quartz cristallise en de beaux cristaux transparents. Lorsque la température est plus basse, il se forme un **quartz polycristallin blanc laiteux** constitué de nombreux petits cristaux orientés dans tous les sens. A plus basse température encore, la silice forme des encroûtements de calcédoine ou d'opale.

La **calcédoine** est microcristalline, translucide avec une coloration uniforme grise, bleuâtre ou



Gerbe de quartz, La Gardette,
France (Muséum de Genève)
Merci à J. Deferne



Jaspe. Merci à Wikipedia

verdâtre, ou encore rouge (**cornaline**) ou verte (**chrysoprase**). Le **silex** est une roche siliceuse très dure constituée de calcédoine presque pure et d'impuretés telles que de l'eau ou des oxydes, ces derniers influant sur sa couleur. L'**agate** est constituée de fines couches concentriques de calcédoine diversement colorées. L'**opale** n'est pas cristalline, mais constituée de minuscules sphères de silice amorphe.

Le quartz forme près de 13 % de la croûte terrestre sous la forme de petits cristaux translucides et grisâtres dans les roches granitiques. Sous l'effet de l'érosion, le **granite** se désagrège, les grains de quartz sont libérés et contribuent à former le **sable** des rivières, des lacs et des océans. Selon les conditions environnementales, ces grains peuvent s'agglomérer pour participer à la formation de **grès**, de **quartzite**, de **gneiss** et de **schiste**.

La silice

Le quartz est l'une des variétés de silice qui existe aussi sous d'autres formes dans la nature. On désigne sous le nom de silice la **combinaison chimique du silicium et de l'oxygène, SiO_2** . Elle est soit cristalline (quartz, tridymite, cristobalite), soit amorphe. Le quartz est la forme la plus abondante de façon naturelle.

La silice est le principal constituant des **silicates**, une combinaison de silice et d'atomes d'autres éléments (aluminium, fer, magnésium, calcium, sodium, potassium). Les silicates sont les constituants majoritaires de l'écorce terrestre.

Le **sable** résulte de la désagrégation naturelle des roches sous l'effet des agents atmosphériques. Les termes sable et gravier se réfèrent à la taille des grains plus qu'à sa composition chimique. Il existe des sables de quartz et de feldspath.

La silice cristallise sous **plusieurs formes minérales** en fonction de la température et de la pression. Outre le quartz, on la trouve sous forme de **cristobalite**, présente dans les roches volcaniques. Elle coexiste avec la **tridymite**, une autre forme de silice cristalline, rare à l'état naturel, qu'on rencontre dans les

matériaux réfractaires industriels, où elle s'est formée sous l'effet de la chaleur.

La silice est largement utilisée dans le domaine industriel. Comme **matière première** pour la verrerie, la cristallerie, la céramique; à cause de sa transparence, pour l'optique; comme isolant électrique, elle est employée en électronique. Elle est utilisée comme **charge minérale** dans les plastiques et caoutchoucs où elle améliore leurs propriétés physiques. Enfin, à cause de sa dureté, le quartz est employé comme moyen de sablage, d'abrasion, de sciage, de ponçage, etc.

Les hélices de tétraèdres SiO_4

Dans la silice, les atomes se regroupent en **tétraèdres SiO_4** dans lesquels l'atome de silicium est situé au centre, relié à 4 atomes d'oxygène placés aux sommets du tétraèdre. Ces tétraèdres sont chimiquement solides et forment les unités stables de la construction atomique. Ils s'assemblent par leurs sommets de sorte que chaque atome d'oxygène est l'articulation entre deux tétraèdres. C'est le type d'assemblage des tétraèdres qui varie et donne diverses formes cristallines de la silice.

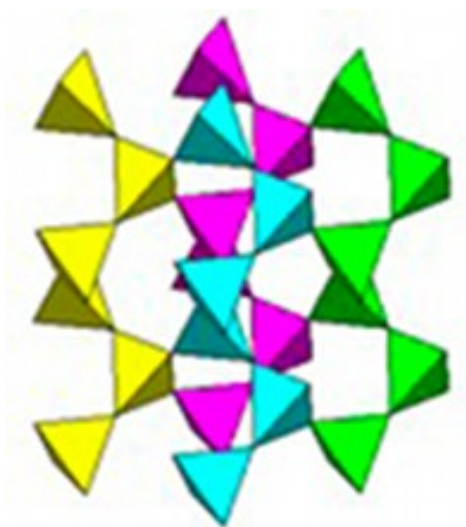


Fig. 31- La silice est faite d'un assemblage de tétraèdres. Chaque tétraèdre est constitué d'un atome de silicium entouré de 4 atomes d'oxygène. Dans le quartz, ils s'assemblent en spires hélicoïdales.

Merci à J. Deferne

Dans la silice vitreuse, les tétraèdres sont empilés de façon désordonnée, tandis que dans le quartz et la cristobalite l'empilement est régulier.

Dans le quartz, les tétraèdres s'articulent en **spires hélicoïdales** parallèles à l'axe de symétrie vertical du cristal (fig. 31). Selon les variétés de quartz, ces spires s'enroulent soit vers la droite, soit vers la gauche, et on a donc du quartz droit et du quartz gauche, qui se trouvent en quantités équivalentes dans la nature.

Selon les conditions de cristallisation du quartz synthétique, on obtient la forme \square trigonale à basse température et la forme \square hexagonale à haute température. Entre les deux, il existe une **phase incommensurable** à 573 °C, stable sur un intervalle d'environ 1,5 °C.

Le quartz qui vibre électriquement

Les cristaux de quartz et quelques autres matériaux ont une propriété électrique étonnante. Lorsqu'on exerce une pression mécanique, ou une autre déformation telle que flexion ou torsion, sur un cristal de quartz, une charge électrique (une tension électrique) apparaît sur ses faces. Ce phénomène est nommé **effet piézo-électrique** (grec *piezein*, presser). Il est utilisé dans des applications courantes comme l'allume-gaz piézo-électrique et le microphone. Dans le **microphone**, le son, qui se manifeste comme des variations de la pression de l'air (*voir article Nature du son*), excite un cristal de quartz qui le transforme en un courant électrique qui est ensuite amplifié.

L'effet inverse a également lieu. Lorsqu'on applique une tension électrique sur les faces d'un cristal de quartz, il se déforme faiblement (quelques millièmes de mm). De cette façon on peut produire des **ultrasons**.

L'application la plus courante du quartz, l'**oscillateur électronique**, combine les deux effets pour créer une oscillation mécanique du cristal à une fréquence précise qui dépend essentiellement de sa forme et de ses dimensions. Les quartz sont des composants électroniques très répandus conçus pour vibrer à des fréquences allant de la dizaine de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Le plus souvent en quartz synthétique, ils sont destinés aux montres à quartz, et aux circuits électroniques en tant que **générateurs de fréquences**.

Cristaux de silicium pour l'électronique



Fig.32- Barreau de silicium polycristallin, destiné à la production de silicium monocristallin (longueur 10,3 cm, diamètre 4 cm). Merci à Wikipedia



Fig.33- Microprocesseur inséré dans son circuit électronique. Merci à Wikipedia

Le silicium n'existe pas naturellement à l'état pur. Il est un constituant de la silice, très abondante dans la nature. On peut donc en extraire le silicium chimiquement et le produire sous forme de cristaux (fig.32).

Les cristaux de silicium sont largement répandus dans notre environnement technologique. Dans les panneaux solaires, ce sont des cristaux de silicium qui transforment la lumière en courant électrique (**effet photo-électrique**) et les **puces** de nos appareils électroniques sont fabriquées sur un support de silicium cristallin.

Pour la microélectronique, le silicium polycristallin doit être converti en **silicium monocristallin**. On fond le matériau juste au-dessus de sa température de fusion, prêt à recristalliser si on abaisse la température. Plusieurs procédés existent. L'un d'eux consiste à introduire un germe, petit cristal monocristallin. La **croissance cristalline** se produit à partir de ce germe, au fur et à mesure que l'on retire le germe vers le haut tout en le faisant tourner à vitesse très lente.

Le barreau obtenu est ensuite tranché en rondelles fines (les galettes ou **wafers**). C'est sur ces galettes que sont gravés tous les composants d'un circuit intégré (puce) en petits carrés (**die**), par injection d'éléments chimiques sur des endroits précisément délimités par des masques. On peut ainsi graver jusqu'à mille puces sur une même galette. Elles sont séparées par découpage et enveloppées d'une protection (fig.33).

Cristaux liquides et Cristaux plastiques

Symétries et brisure de symétrie

Cristal... liquide... Deux mots qu'il semble étrange d'associer. Comme leur nom l'indique, les cristaux liquides tiennent à la fois du cristal et du liquide. Mais comment peuvent-ils être l'un et l'autre, sans être ni l'un ni l'autre? Quelles images ou pensées ces mots évoquent-ils pour vous?

Peut-être imaginez-vous une substance qui présente la transparence cristalline, et qui est également dotée de la faculté de se mouvoir comme un liquide. Un **cristal fluide**.

À moins que, familier de la technologie, vous ne pensiez aux **écrans à cristaux liquides**, connus, au moins de nom, par un public intéressé par les procédés en matière d'affichages lumineux. Les cristaux liquides sont abondamment utilisés dans la fabrication des cadrans de montres, écrans d'ordinateurs portables, téléphones portables, télévision et jeux électroniques.



Cristaux et liquides

Pour comprendre les cristaux liquides, nous devons d'abord savoir ce que signifient les notions de cristal et de liquide.

On les définit par la façon dont sont arrangés leurs atomes ou molécules. La **structure cristalline** se caractérise par un empilement géométrique régulier et répétitif d'un petit motif de quelques atomes. Le quartz et le diamant sont des cristaux typiques.

Un cristal bien dur peut devenir liquide quand on le chauffe à une température suffisante. Par exemple, un métal est une substance cristallisée qui devient liquide et apte à être coulée et moulée dans un récipient. Inversement, en refroidissant un liquide, il peut **cristalliser** comme le fait l'eau. Des petits cristaux naissent dans le liquide et se mettent à grossir.

Les notions de **cristal** et de **liquide** ont été examinées de façon approfondie dans la section précédente.

Ordre et désordre moléculaire

Le passage de l'état de liquide à celui de cristal est un changement physique brusque. Le liquide est fluide. Il n'a pas de forme en lui-même, il adopte celle du récipient dans lequel on le verse. Le cristal est compact et dur et conserve la forme dans laquelle il a été façonné.

Cette transformation observable à l'œil nu ou au microscope est la manifestation visible d'un processus atomique. Le plus spectaculaire est la modification **de l'ordre atomique et moléculaire**. Dans le liquide, les atomes se meuvent librement dans tous les sens et sont distribués un peu partout en désordre. Au moment de la cristallisation, ils viennent se ranger en ordre compact. C'est cet ordre serré et ordonné qui caractérise un cristal.

Remarquons qu'il existe des matières solides qui présentent aussi le désordre moléculaire du liquide. Ce sont les verres ou matière vitreuse. Le **verre** est un liquide figé, un "arrêt sur image" du liquide. Ses atomes restent en désordre, même s'ils se sont immobilisés. De ce point de vue, le changement entre un liquide et un verre est minime. Verre et liquide sont tous les deux dans l'état qualifié d'**amorphe**, qui indique l'état de désordre, ou de distribution aléatoire de la position des atomes. Il arrive que des verres cristallisent quand on abaisse la température ou dans d'autres circonstances favorables. La transformation entre le désordre moléculaire amorphe et l'ordre cristallin est radicale.

Et les **cristaux liquides**? C'est dans le passage subtil entre liquide et cristal lors du refroidissement qu'ils vont se révéler. En effet, dans cette métamorphose, certaines substances particulières ne passent pas directement de l'état liquide à l'état cristallin. Pendant le refroidissement, elles passent par des **états intermédiaires**. Elles sont encore liquides, mais ont perdu de la fluidité et ont une apparence trouble. Au niveau moléculaire, on détecte un ordre partiel, de telle sorte qu'elles sont liquides par certains aspects, mais ordonnées comme un cristal selon d'autres. Ce sont ces substances qui sont nommées cristaux liquides.

Un nouvel état entre amorphe et cristal

Le premier à mentionner l'existence de telles substances dans le monde scientifique a été le botaniste autrichien [Friedrich Reinitzer](#) en 1888. C'est donc relativement récent. Il est probable que d'autres avant lui avaient vu de telles substances, sans en comprendre la singularité. En effet, il ne suffit pas d'être en face d'un phénomène pour le comprendre, il faut que l'attention soit captée et amenée à l'interpréter d'une façon nouvelle. Ainsi, l'observation d'un liquide trouble ne fait pas immédiatement penser à une nouvelle structure. Ou même, on n'y prête aucune attention car cela ne fait pas partie des références connues.

C'est à ces doutes qu'a été confronté Reinitzer. Il étudiait des cristaux de benzoate de cholestérol et leur transformation sous l'effet de la chaleur. La température de fusion d'une substance dépend de sa pureté. Or, une substance n'est jamais pure à 100%. Elle contient toujours une petite quantité de molécules ou atomes étrangers qui proviennent de la matière dont elle est extraite à l'origine ou des produits de réaction ou de synthèse. Selon le procédé de purification, on a des puretés de 1%, ou de 0,1%, ou encore une part pour mille ou un million pour les plus élaborés.

En chauffant le benzoate, Reinitzer a constaté qu'il fondait à 145,5 °C et devenait un liquide visqueux et laiteux. Éclairé en lumière blanche, ce liquide renvoie des reflets colorés qui indiquent qu'il est structuré à la manière d'un cristal. Puis ce liquide subit une seconde transformation en un liquide clair à 178,5°C.

À cette époque, l'existence de deux températures de fusion était difficilement concevable. Les scientifiques avaient identifié 3 états possibles de la matière, solide, liquide et gaz. On détectait un point de transition entre le solide et liquide, la fusion, et un autre entre liquide et gaz, l'ébullition. Ainsi l'eau fond à 0°C à la pression atmosphérique normale et bout à 100°C. Alors comment expliquer l'existence de 2 points de fusion?

Tout d'abord, Reinitzer pense que c'est l'indication de la présence d'impuretés, mais une purification poussée aboutit au même résultat. Avec le recul et les applications techniques actuelles, l'existence des cristaux liquides est devenue une évidence. Pourtant au moment de leur découverte, ils ont fait débat. L'équipe de recherche a été soupçonnée de ne pas avoir pris toutes les précautions de propreté dans ses expériences. Un exemple parmi bien d'autres qui montre que **la communauté scientifique est généralement peu encline à accepter des trouvailles qui sortent du cadre établi** (*voir Controverses dans l'article Matière et rayonnements*)

Pour l'aider à comprendre l'origine de cette transition intermédiaire, Reinitzer sollicite un spécialiste de l'optique cristalline, le physicien allemand [Otto Lehmann](#). Celui-ci établit que le liquide visqueux, comme le cristal, présente des particularités optiques qui dépendent de l'orientation dans laquelle on le regarde ou l'analyse. En 1905, il démontre que le liquide laiteux est un état de la matière à part entière qui n'a ni la symétrie du cristal, ni celle du liquide.

Il s'agit d'une structure ordonnée particulière intermédiaire entre le cristal solide et le liquide clair, que Lehmann nomme cristal liquide. Ce nom s'est imposé dans la pratique, même si par la suite, on s'est aperçu que les cristaux liquides n'étaient ni cristallins, ni vraiment liquides. Pour cette raison, on les nomme aussi **états mésomorphes** (*meso* en grec = intermédiaire).

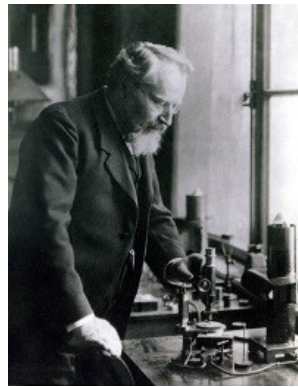
Vers 1920, le français [Georges Friedel](#) s'attaque à la détermination des symétries des arrangements moléculaires. Diplômé de l'École Polytechnique et de l'École des Mines, il a la charge de nombreuses

activités liées à ses compétences, et il est passionné par la minéralogie et la cristallographie. Il décrit les structures atomiques des cristaux liquides dans leurs différents états (on dit aussi leurs **phases**) intermédiaires et il établit une classification. Il insiste sur le caractère discontinu des transformations: une substance passe d'une structure moléculaire à une autre sans transition.

Les pères des cristaux liquides



Friedrich Reinitzer (1857 - 1927)
Merci à Wikipédia



Otto Lehmann (1855 - 1922)
Merci à Wikipédia



Georges Friedel (1865 - 1933)
Merci aux Annales des Mines

Formes des molécules

Qu'est-ce qui est nouveau dans la nature des cristaux liquides, qui est absent dans les autres types de matière, et qui entraîne leurs caractéristiques particulières? La réponse tient dans la forme particulière de leurs molécules.

Les cristaux minéraux habituels sont faits d'atomes qu'on considère comme sphériques, et qui s'empilent selon des schémas simples, tels que des carrés, des losanges ou des hexagones. Les cristaux liquides sont des **empilements de molécules**, non d'atomes. Certes, les molécules sont elles-mêmes des assemblages d'atomes, mais ces atomes sont fortement reliés entre eux, de telle sorte qu'on peut considérer les molécules comme des objets solides en soi. Or ces objets n'ont pas forcément des formes sphériques.

Certaines molécules peuvent s'empiler en **cristaux moléculaires**. Si elles sont à peu près sphériques, elles s'arrangent en structures semblables à celles des **cristaux atomiques**, en plus dilaté (*voir plus bas, Cristaux plastiques*).

Si les molécules ont des formes allongées ou boursoufflées, cela va entraîner d'autres types d'empilement. C'est le cas des cristaux liquides, dont les molécules peuvent avoir des formes variées: bâtonnets, disques, étoiles, pyramides, virgules, etc.

Prenons à titre d'exemple une forme que l'on rencontre abondamment dans les cristaux liquides: la forme allongée en **bâtonnet** ou en aiguille. Vous ne pouvez pas assembler des bâtons d'allumettes comme vous assemblez des balles. Vous n'arrangez pas des bananes dans un panier comme des oranges. Lorsqu'on empile des bâtonnets, une tendance naturelle est de les positionner dans la même orientation, comme dans une boîte d'allumettes. On obtient quelque chose qui n'existe pas dans un empilement de sphères, c'est **un ordre d'orientation**.

Mobilité des molécules

Une autre caractéristique importante est la mobilité qui reste entre les molécules. Oui, les molécules en bâtonnets ont une tendance à s'aligner et se rapprocher, mais leurs attirances réciproques sont faibles. De même que des allumettes peuvent bouger dans leur boîte si vous secouez un peu, de même les molécules peuvent facilement glisser les unes par rapport aux autres. **C'est cette mobilité qui les apparente aux liquides.** Les cristaux liquides dans leur phase intermédiaire sont généralement

visqueux ou pâteux, sans atteindre la fluidité d'un liquide.

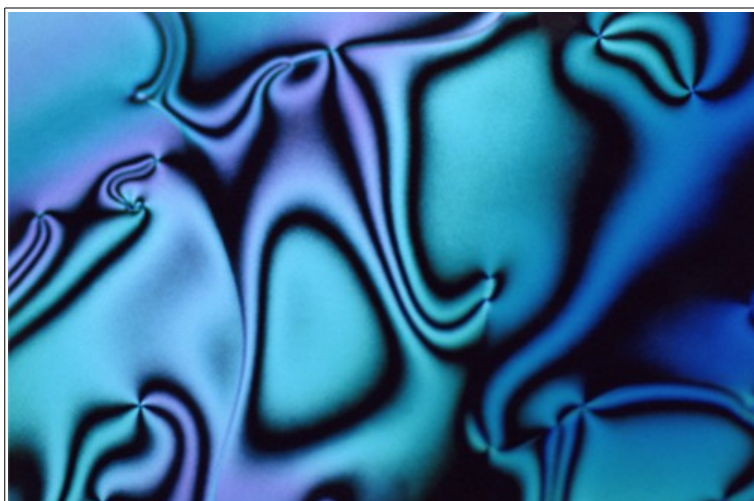
Lorsqu'on chauffe, l'espace entre bâtonnets augmente jusqu'à ce qu'ils puissent tourner dans tous les sens. L'ordre d'orientation se perd, la mobilité augmente. On est dans la **phase liquide**.

Examinons en détail les structures produites par ces bâtonnets, dont les deux plus connues et les plus étudiées sont l'ordre nématique et l'ordre smectique.

Nématique, ordre d'orientation

Observons une de ces substances au microscope. Nous en déposons une goutte sur une lame de verre que nous plaçons sur la platine chauffante et refroidissante du microscope à lumière. Nous réglons la température pour être dans cette phase intermédiaire, le liquide trouble et visqueux.

Nous voyons des plages homogènes séparées par des lignes noires courbes très flexibles qui rappellent des fils. Ce sont ces figures qui leur ont valu leur nom de **nématique** (grec ancien *nematos* = fil).



*Texture de fils dans un nématique
observé au microscope à lumière
© A. Boudet, CNRS éditions*

*In memoriam, je remercie vivement le professeur Yves
Bouligand (EPHE, Paris, France) pour le don de cette
photo et pour les discussions simples et chaleureuses
que nous avons partagées il y a quelques années*



*Microscope dit "à lumière" ou
"photonique", pour le distinguer des
microscopes électroniques
(voir [La molécule d'ADN](#))
Merci à Olympus*

Si nous concentrons notre regard sur un endroit, par exemple le centre de l'une des plages uniformément claires, et que nous faisons tourner la lame pour modifier l'angle d'observation, nous voyons les fils se déplacer, l'aspect global restant le même. Des expériences de cette sorte, ainsi que les **diffractions des rayons X** ont conduit aux résultats suivants.

Dans l'état nématique, **les molécules sont approximativement orientées dans le même sens** et assemblées comme nos allumettes évoquées plus haut. Elles ont la possibilité de glisser les unes sur les autres comme des troncs de bois flottant sur une rivière. Aussi, les centres des molécules sont placés de façon aléatoire, en désordre. Il n'apparaît donc aucun ordre de position, tout comme dans un amorphe. L'ordre de leur assemblage est un **ordre d'orientation** et uniquement cela.



En réalité, les molécules en bâtonnet n'obéissent pas de façon stricte à cet ordre. Leur parallélisme est approximatif. Leurs orientations se dispersent légèrement les unes par rapport aux autres autour d'une direction moyenne. De même que les allumettes ont du jeu dans leur boîte, de même **l'orientation des molécules du cristal liquide est moyenne**. Les écarts sont plus ou moins importants et peuvent varier en fonction des conditions.

Comment cette structure schématique de molécules parallèles s'accorde-t-elle avec notre observation des textures de fils? Nous devons pour cela élargir notre vision. La structure décrite est vraie localement, comme si nous regardions uniquement quelques troncs proches qui flottent. Si nous prenons du recul, nous voyons des groupes de troncs dans des orientations différentes. De même pour les molécules, on constate que différents domaines avec des orientations différentes sont juxtaposés. L'image des troncs a ses limites, car en ce qui concerne les molécules, on peut passer d'un domaine à l'autre par un changement d'orientation progressif, quoique avec une forte courbure. Les fils sont les traces de ces courbures.

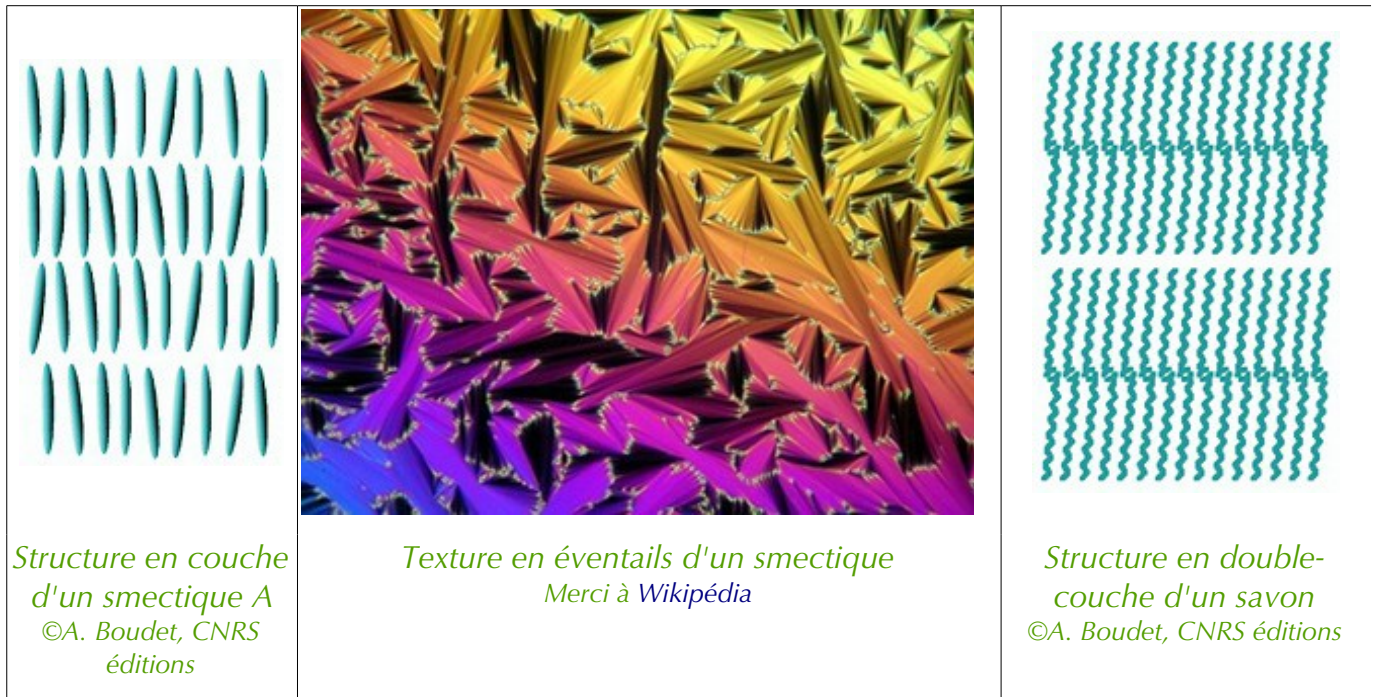
Smectiques, structure en couches

Si nous refroidissons le nématique, il est fréquent qu'il passe par une ou plusieurs autres phases intermédiaires avant de prendre la structure cristalline. Ce sont des phases smectiques.

Au microscope, en refroidissant, la goutte de nématique se réorganise. Les textures de fils s'évanouissent pour laisser place à une autre texture, typique des smectiques. On y découvre des **formes en éventails** plus ou moins orientées et imbriquées. Elles donnent une impression de formes plus géométriques, rectilignes, anguleuses, plus rigides ou cristallisées. Tout en restant relativement mobile en tant que cristal liquide, le smectique a moins de flexibilité que le nématique.

L'analyse aux rayons X montre que les molécules sont disposées en **couches superposées**. Dans ces couches, elles restent parallèles à une même direction, comme un nématique réduit à deux dimensions. La structure smectique a donc en commun avec les nématiques l'ordre d'orientation des molécules. Ce qui est nouveau, c'est la répétition en couches les unes au-dessus des autres.

Il apparaît une longueur caractéristique dans les smectiques, c'est l'**épaisseur de la couche**. C'est donc la distance de répétition dans la direction perpendiculaire aux couches. Elle est liée à la longueur des molécules, environ 3 nanomètres, donc bien au-delà de la capacité de voir les couches au microscope.



De la même façon que dans les nématiques, l'orientation des molécules est une orientation moyenne, autour de laquelle leurs axes se dispersent plus ou moins. Comme pour les nématiques, des domaines d'orientations différentes sont juxtaposés. À l'intérieur de domaines étendus, les couches se courbent et se disloquent, ce qui crée les textures en éventails.

Savons: doubles couches

C'est Georges Friedel, lors de ses classifications structurales, qui a donné leur nom aux smectiques. *Smectique* vient du nom grec ancien *smectos* qui signifie savon. Pourquoi savon, puisque nous n'avons pas affaire à des savons? Parce qu'avec son microscope, Friedel n'avait pas des données aussi précises que celles que nous fournissent les rayons X, et qu'il existe des analogies structurales fortes entre les smectiques et les savons. Comme les smectiques, **les savons ont une structure en couches qui contiennent des molécules parallèles.**

Toutefois, la structure des savons diffère de celle des smectiques. Elle se caractérise par un élément supplémentaire essentiel, qui n'est pas retenu dans la définition de la structure smectique: **Les molécules des savons sont polarisées**, autrement dit leurs deux extrémités sont très différentes.

Dans les nématiques et dans les smectiques, nous avons été en présence de molécules qui ont des extrémités équivalentes, quoique différentes. On peut dire qu'elles ont deux queues, et les molécules peuvent être orientées indifféremment vers le "haut" ou vers le "bas". Elles se mélangent allègrement dans les deux sens.

Dans le cas des savons, les molécules ont deux extrémités bien différenciées. On peut dire qu'elles ont une tête et une queue et on peut repérer leur sens. La tête supporte difficilement la présence de la queue d'une autre molécule. Les têtes s'arrangent pour se trouver toutes du même côté, côte à côte. À cause de sa structure chimique, donc électrique (*voir sur ce sujet l'ADN électrique*), la tête a une affinité pour l'eau (elle est hydrophile). La queue a horreur de l'eau (elle est hydrophobe). À cause de cela, les couches sont doubles, les queues d'une couche se protègent en se rassemblant avec les queues de la suivante. Ainsi, les deux couches sont en miroir, les molécules de l'une pointent vers le haut, celles de l'autre vers le bas.

Les têtes de deux couches adjacentes se font également face. Lorsqu'on met le savon dans l'eau, les queues refusent l'eau et restent accrochées. Par contre, les têtes accueillent cette eau qui se glisse entre elles et les désolidarise de la double couche suivante. Les doubles couches deviennent mobiles, autrement dit solubles dans l'eau.

Condensation et rupture de symétries

Le passage du liquide au nématique, puis du nématique au smectique s'effectue avec un changement structural brusque et une augmentation de la densité. Chaque phase a ses propres caractéristiques physiques. On les nomme **phases mésomorphes**. Le passage d'une phase à une autre a lieu à une température de transition caractéristique de la substance.

Prenons un cristal liquide en bâtonnets et chauffons-le jusqu'à l'état liquide. Dans la **phase liquide**, les bâtonnets sont en mouvement perpétuel, tournent dans tous les sens et se déplacent. Si on repère leur position par un point au centre de la molécule, leur centre de gravité par exemple, les centres sont distribués de façon désordonnée. Si on fige la situation dans le temps, on a la structure amorphe: aucun élément d'ordre.

Lorsqu'on refroidit ce cristal liquide, les molécules se resserrent. C'est une condensation. On passe de la phase liquide à la **phase nématique**. Là, apparaît un nouvel ordre: l'orientation des molécules. Alors qu'elles étaient dans tous les sens, elles se rapprochent, et choisissent une direction commune localement. Les molécules perdent en liberté individuelle et **l'ensemble gagne un élément d'ordre**.

Alors que toutes les orientations étaient équivalentes, voilà qu'une direction est privilégiée. Il y a un **changement de symétrie**. Les scientifiques disent une **rupture ou brisure de symétrie**. Car comment les molécules choisissent-elles leur orientation parmi toutes les directions possibles? Il faut s'engager dans une seule voie.

En continuant à refroidir, la substance passe à la **phase smectique**. Les centres des molécules sont maintenant alignées en couches. Ces couches sont disposées selon une périodicité le long d'une dimension. La substance y gagne un élément d'ordre de position.

On peut aussi décrire cette structure smectique à partir d'un réseau cristallin tridimensionnel en introduisant un élément de désordre. Alors que dans les cristaux, tout est en place de façon fixe, dans les smectiques, **les couches peuvent glisser les unes par rapport aux autres et tourner, tout en restant en contact**, comme les cartes d'un jeu de cartes. Cela entraîne par exemple que l'orientation des molécules dans une couche est indifférente à celle de la couche adjacente.

Si nous refroidissons encore plus, nous n'obtenons généralement pas immédiatement le cristal. Entre le smectique que nous avons décrit et le cristal, il existe d'autres phases intermédiaires dans lesquelles les couches acquièrent plus d'ordre et moins de symétrie. Comme ces phases restent en couches, on les nomme également des phases smectiques et on précise son type par une lettre.

Le smectique que nous avons étudié plus haut est le **smectique A**. Ses molécules s'orientent en moyenne perpendiculairement aux couches. Lorsque la température est abaissée, un smectique A peut passer à une structure dont les molécules sont inclinées (**smectique C**).



Structure d'un smectique C

©A. Boudet, CNRS éditions

Même si les bâtonnets sont contraints d'être parallèles et de s'organiser en couches, il leur reste une grande liberté de compactages possibles à l'intérieur des couches. Les couches des smectiques A et C ne présentent aucun ordre de position, comme dans les nématiques. C'est une sorte de nématique à deux dimensions.

Si la température diminue, l'ordre se fait plus pressant. Dans la couche, les bâtonnets se resserrent et s'ordonnent en arrangements réguliers plus ou moins étendus, selon un réseau périodique souvent rectangulaire ou hexagonal. Une couche est devenue une sorte de **cristal à deux dimensions**. Le cristal liquide est un empilement de ces cristaux à deux dimensions. Mais alors, en quoi diffère-t-il d'un vrai cristal? Par l'absence de corrélation d'une couche à l'autre.

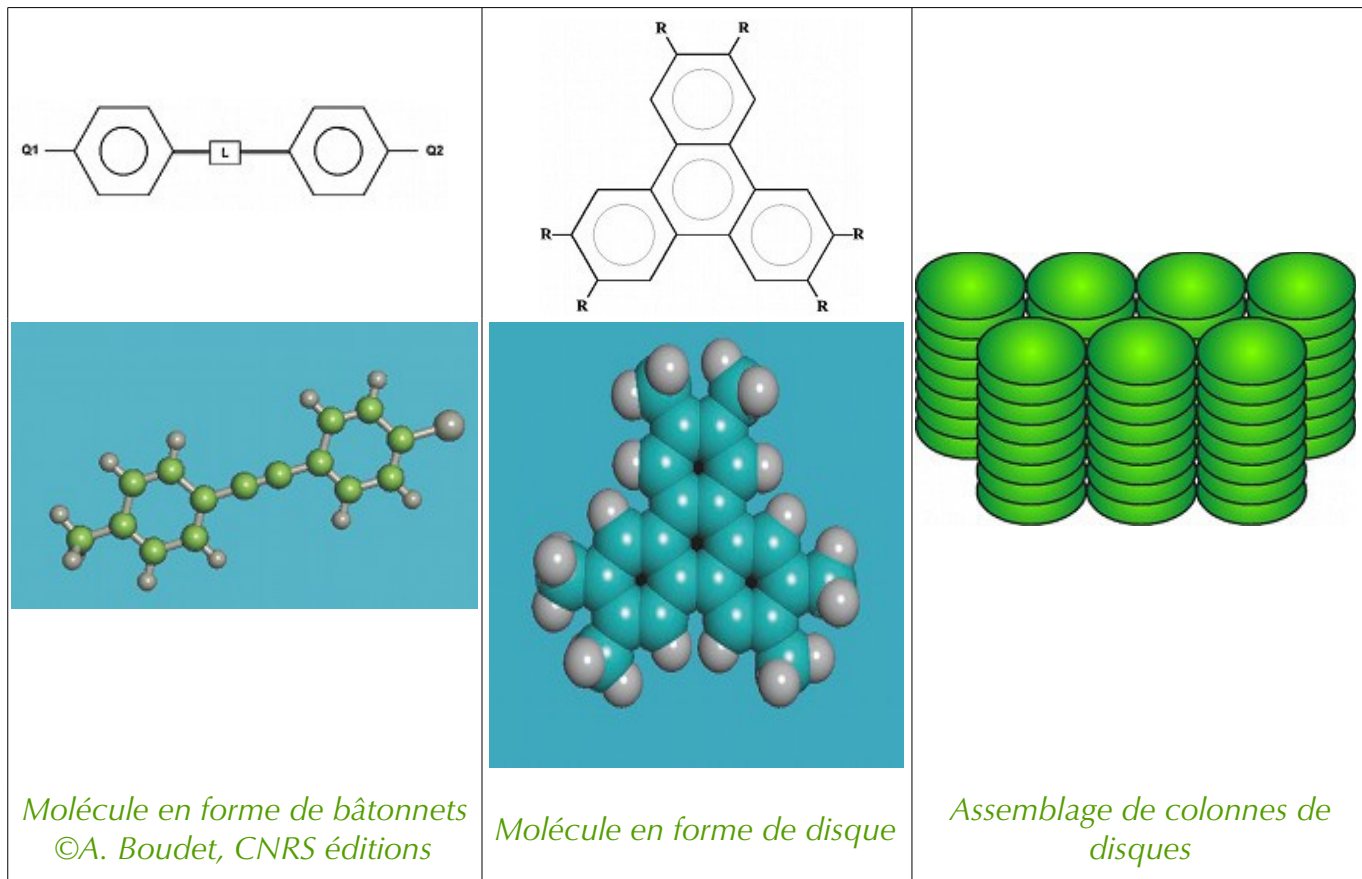
Enfin, tout en bas de l'échelle de température, on arrive à la **phase cristalline**. Les couches se sont calées les unes par rapport aux autres.

Au final, les cristaux liquides peuvent compter 1, 2 et jusqu'à 5 phases mésomorphes entre le solide et le liquide.

Structure des molécules

Arrêtons-nous un peu plus sur l'emploi du mot *bâtonnet* quand cela concerne une molécule. Est-il possible de définir la forme d'une molécule?

Une molécule est un assemblage d'atomes qui sont reliés entre eux par des liens solides, mais généralement souples. Ces liens sont souvent articulés. Des groupements d'atomes peuvent tourner les uns par rapport aux autres comme les segments articulés d'un squelette.



L'atome de **carbone** est un composant majoritaire des molécules de cristaux liquides. Les atomes de carbone peuvent s'assembler en chaînes articulées souples. Toutefois, leur rotation peut être bloquée à certains endroits. Ils ont aussi la possibilité de s'assembler en un cercle rigide de 6 atomes. Cette configuration est l'élément de base du benzène et pour cette raison, on la nomme **noyau benzénique**. Selon la flexibilité et l'amplitude des articulations du carbone, la molécule est souple et déformable, ou elle a une forme définie rigide. Elle peut aussi avoir des parties souples et d'autres rigides. Ce sont les parties rigides qui lui confèrent sa forme.

Les **bâtonnets** sont constitués d'un assemblage de noyaux benzéniques reliés par des liens rigides. L'ensemble constitue la partie rigide de la molécule. Cette partie est prolongée aux deux extrémités par des queues flexibles et mobiles (Q1 et Q2). La

Terminologie grecque

Dans certains textes scientifiques, les substances dont les molécules ont la forme de bâtons sont appelées *calamitiques*, mais ce terme est malvenu, et plutôt "calamiteux". Le terme *calamitique* vient en effet du grec *calamos* qui signifie roseau et non bâton. En français, il a donné des noms comme **calame**, **chalumeau**, qui désignent des tubes **creux**, qui est la caractéristique du roseau, mais qui n'est pas le cas de nos molécules. Les scientifiques aiment donner des noms grecs à leurs découvertes, sans être des connaisseurs de la linguistique. Si l'on voulait absolument donner un nom grec (mais pourquoi?), ce serait *bactérique*, du grec qui veut dire bâton. Ça vous dit quelque chose? Eh oui, les bactéries ont été d'abord découvertes au microscope comme des corpuscules à la forme de bâton.

taille des molécules est microscopique, quelques nanomètres de longueur et quelques dixièmes de nanomètre de section. Les différents cristaux liquides diffèrent par la composition et l'emplacement de la partie rigide et des queues.

Des molécules ayant d'autres formes s'empilent en d'autres types de structures mésomorphes. En inventant de nouvelles molécules, on peut créer des structures étranges et exotiques. Les chimistes savent parfaitement construire des molécules avec des formes déterminées, comme un jeu de construction: par exemple rubans ou disques. Ils greffent des queues flexibles à des noyaux rigides. Si on prolonge un noyau dans plusieurs directions coplanaires, on a des molécules plates.

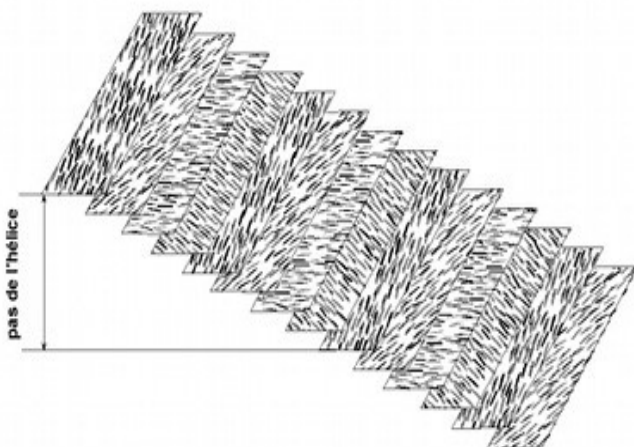
Des molécules en forme de **disques** s'empilent comme des piles d'assiettes. Elles forment des colonnes qui se disposent côte à côte selon un ordre périodique. Cette structure est appelée **discotique**.

Enfin d'autres molécules sont **torsadées**. Leurs empilements reflètent alors ce caractère de torsion, ce sont les **cholestériques**.

Cholestériques: disposition en hélice



*Texture cholestérique en empreintes digitales, observées au microscope à lumière
Merci à ,Ingo Dierking Chalmers University*



*Schéma de la structure cholestérique
©Dessin A. Boudet, CNRS éditions*

Imaginez que vous disposez des bananes dans un cageot. Si elles sont à peu près identiques, vous pouvez les arranger en rangées. Quand le fond est rempli, vous faites une deuxième couche. La première banane de la deuxième couche a tendance à se caler dans le trou entre deux bananes de la couche inférieure. Il y a donc un décalage de position entre les deux couches, mais elles sont orientées de la même façon.

Imaginez maintenant que les bananes sont d'une espèce spéciale: elles rebiquent à une extrémité. Au lieu d'être posées bien à plat au fond du cageot, il y a un bout qui se dresse, mais pas vraiment verticalement, plutôt en oblique. L'empilement de la deuxième couche ne se fera pas aussi simplement. Les bananes du dessus devront être légèrement tournées par rapport à celles du dessous. La troisième couche sera également tournée par rapport à la deuxième. La forme avec un bout relevé imprime une torsion à l'empilement.

C'est ce qui se passe pour les cholestériques. La première substance étudiée par Reinitzer était un dérivé du cholestérol, et c'est ce qui a donné son nom à cette classe de cristaux liquides.

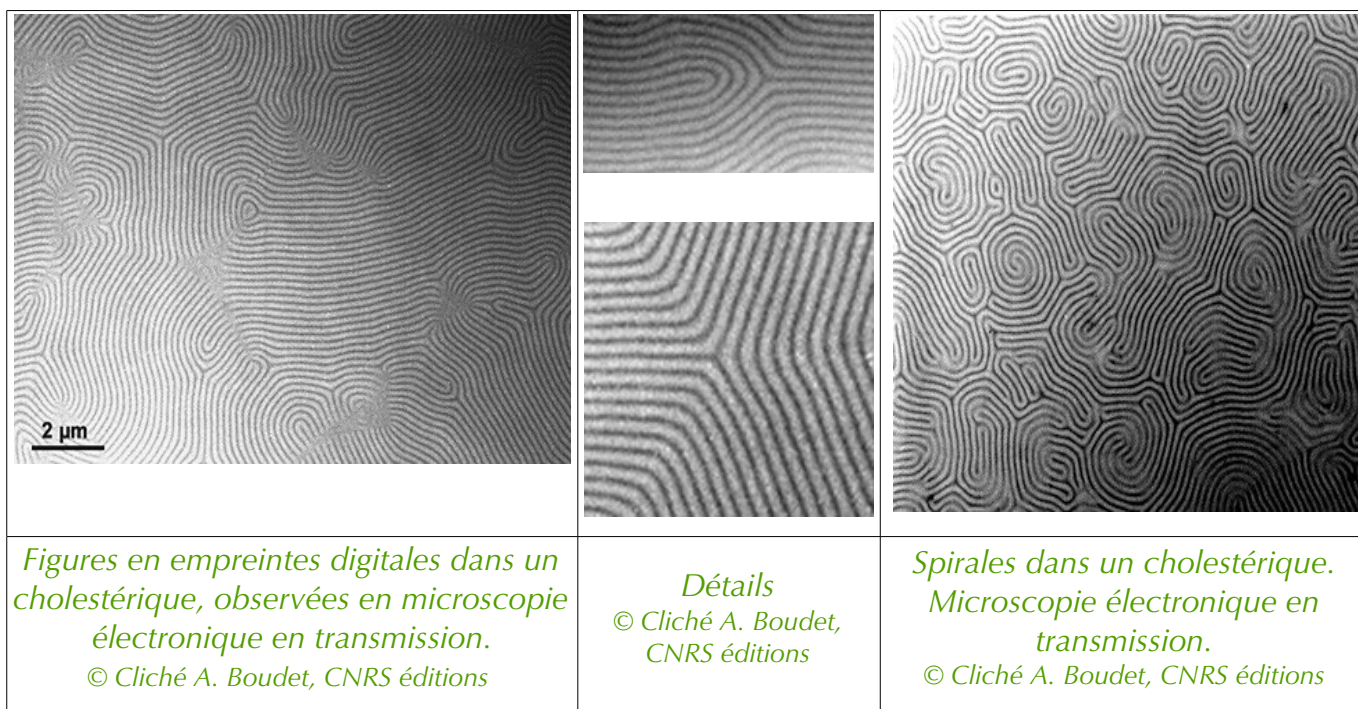
Au microscope, on découvre des lignes courbes équidistantes et parallèles qui dessinent des figures caractéristiques en **empreintes digitales**. La distance entre deux lignes voisines est de l'ordre du micromètre, donc suffisamment grande pour être bien visible au microscope. **Cette distance entre deux lignes voisines est unique et répétitive**. C'est une signature caractéristique du cholestérique observé.

Cette périodicité est la conséquence directe de l'assemblage torsadé. Dans les cholestériques, il n'y a pas vraiment de couches comme je l'ai décrit avec les bananes, ce qui est seulement une image approximative. Ce sont plutôt des plans qui se chevauchent. Si nous conservons l'image d'un empilement du fond vers le haut, l'orientation des molécules se modifie de façon continue du fond jusque sur le dessus. Arrivés à une certaine épaisseur, on retrouve l'orientation initiale, on a tourné de 360° . C'est cette épaisseur qui est la distance entre deux lignes, la périodicité.

Dans un cholestérique, les molécules sont parallèles entre elles dans un plan - celui qui correspond au fond du cageot par exemple (voir la figure ci-dessus). Dans ce plan, comme dans les nématiques, elles n'ont pas de position déterminée. Seule leur orientation est imposée, avec quelques écarts possibles. **Dans un tel plan, le cholestérique est identique à un nématique**. On passe progressivement aux autres plans parallèles et d'un plan à l'autre, l'orientation commune subit une rotation progressive.

Cette disposition est par définition une **disposition en hélice**. L'orientation d'un élément tel qu'une molécule tourne régulièrement au fur et à mesure qu'on avance le long d'une direction. C'est le principe d'un boulon et du filet qui est gravé dessus. Lorsqu'on tourne le boulon, il avance dans l'écrou. Chaque fois qu'on fait un tour complet, il avance d'une distance qui est la longueur entre les deux filets, c'est le **pas de l'hélice**. Il y a des boulons avec des pas fins, qui avancent doucement, et des boulons avec des pas larges, qui avancent très vite. La direction de progression, c'est l'**axe de l'hélice** (voir article *Spirales et Hélices*).

Comme on le voit sur les figures, les lignes périodiques ne restent pas droites sur toute l'étendue de la goutte de cholestérique. Elles s'incurvent, quelquefois brusquement, et donnent naissance aux figures en empreintes digitales. Ailleurs, elle forment de belles spirales.



Formes chirales

L'hélicité de la structure cholestérique est induite par la forme particulière asymétrique des molécules. Le mot **symétrie** peut rester imprécis, aussi je donne quelques explications. Il existe de nombreux types de symétries et lorsqu'on parle d'un objet qui est symétrique, il est nécessaire de préciser selon quel mode. Le corps humain est à peu près symétrique **selon un plan** qui le traverse en séparant sa moitié gauche et sa moitié droite, un plan vertical avant-arrière (plan médian ou sagittal). Cela signifie qu'une moitié (on ignore ici les détails) est identique au reflet de l'autre dans un miroir. Une forme est dite **symétrique par rapport à un plan** si on peut trouver un tel plan de référence. Un point sur une moitié a sa correspondance dans son symétrique de l'autre moitié. On peut aussi décrire des symétries par rapport à une ligne ou un point.

Les cylindres comme nos bâtonnets ont un axe de symétrie, et même plusieurs. De même les disques. Ils peuvent tourner autour de l'axe sans que leur apparence en soit changée.

Considérons maintenant nos mains. Une main seule ne présente pas d'élément de symétrie. Si on la partage en deux, on aura le pouce d'un côté, mais pas de l'autre. La main, comme les molécules cholestériques, est **asymétrique**. Mais, si l'on considère nos deux mains, elles sont **symétriques l'une de l'autre**. Il y a une main gauche qui est le reflet en miroir de la main droite. On peut définir un sens à la main: gauche ou droite, car elles ne sont pas identiques. Ce n'est pas le cas d'un objet symétrique comme un bâton. Lorsqu'on peut définir un sens à un objet, il a sa correspondance dans l'objet de sens opposé, identique à son reflet dans un miroir. C'est une **symétrie chirale** (prononcez *kiral*, c'est le chi □ grec!). Le mot **chiralité** est forgé d'après un mot grec ancien qui signifie justement la main (il a donné aussi chiromancie, chiropractor).



Autre exemple d'objet chiral: une petite cuillère normale est symétrique puisque sa moitié gauche est identique à sa moitié droite en reflet. Si on tord et vrille la cuillère sur un côté, on lui donne un sens droit ou gauche. Dans le monde des cuillères, il existe des cuillères tordues à gauche et d'autres à droite. Dans le monde des molécules, il existe des molécules de gauche et des molécules de droite.

Chaque fois qu'apparaît une **spirale** ou une **hélice**, on a un objet chiral. Les hélices et les spirales sont de deux types, celles qui s'enroulent dans un sens et celles qui s'enroulent dans l'autre. Les tire-bouchons en sont un exemple familier. Ils sont ordinairement à droite, ce qui nous oblige à tourner à droite pour qu'ils s'enfoncent dans le bouchon. Mais dans les magasins de farces et attrapes, on trouve des tire-bouchons gauches qui s'enfoncent en tournant à gauche.

Le caractère chiral apparaît de façon fréquente dans la nature, aussi bien dans les formes spiralées des coquillages et des végétaux qu'au niveau des galaxies (*voir Spirales et hélices*), et dans les molécules torsadées de l'ADN (*voir ADN et code génétique*). La chiralité, c'est donner un sens de rotation.

Les cholestériques sont des nématiques auxquels la chiralité des molécules a donné un caractère hélicoïdal. Notons qu'il existe également des **smectiques chiraux**. Ils possèdent à la fois la structure en couches des smectiques et l'arrangement hélicoïdal des molécules chirales.

Cristaux plastiques

Les cristaux liquides ne sont pas les seules substances à présenter une phase mésomorphe. La nature a inventé d'autres façons d'introduire un ordre partiel entre liquide et cristal. C'est le cas des cristaux plastiques.

On s'est aperçu de l'existence des cristaux plastiques en constatant leur comportement lorsqu'on les chauffe à partir de l'état cristallin. C'est J. Timmermans qui les a découverts en 1938. Il cherchait à comprendre comment la chaleur nécessaire pour faire fondre des composés organiques (des molécules à base d'atomes de carbone) dépendait de leur constitution chimique. Il s'aperçut que certains composés organiques de structure relativement simple présentaient une température de fusion anormalement élevée. Les molécules de tous ces composés étaient à peu près sphériques.

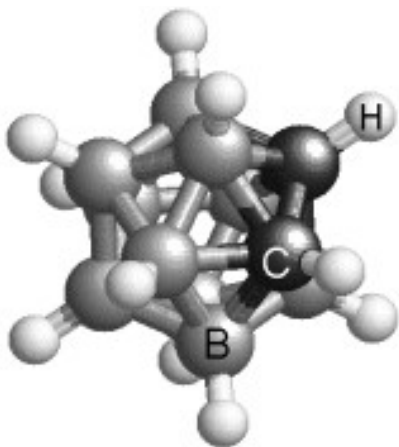
Un cristal plastique présente une phase intermédiaire entre le solide et le liquide. En le chauffant à partir de l'état cristallin, on observe une transition vers une phase plus plastique, déformable, d'où leur nom. Elle a un aspect doux et cireux. Elle se maintient jusqu'à une autre transition vers la phase liquide. Par exemple, l'**adamantane** présente une transition à -64 °C et devient liquide à 269 °C.

Les cristaux plastiques sont des cristaux moléculaires, donc constitués d'un empilement de molécules. Les molécules sont plus grosses que des atomes puisque faites d'un groupement d'atomes liés. Les

réseaux moléculaires sont semblables à ceux des cristaux atomiques ordinaires, cubiques, tétragonaux ou hexagonaux, mais en plus dilaté. Au moment du changement d'état à la phase plastique, les centres de gravité des molécules conservent ou non la position qu'ils occupaient à l'état solide. Ainsi, le réseau de l'adamantane est tétragonal dans sa phase cristalline au-dessous de $-64\text{ }^{\circ}\text{C}$ et devient cubique à faces centrées dans sa phase plastique.

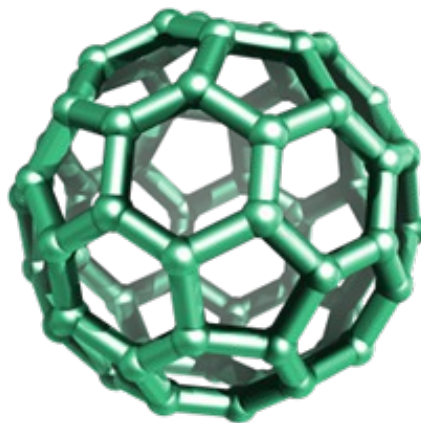
Ce n'est pas dans ce changement de symétrie du réseau - qui n'a pas forcément lieu - que réside la caractéristique de la phase plastique, mais dans le changement de mobilité des molécules. Dans la phase plastique comme dans la phase cristalline, elles restent bien en place aux nœuds du réseau. Mais **les molécules prennent la liberté de tourner sur elles-mêmes**. Leur forme globulaire leur facilite cette rotation. C'est cet élément de liberté qui en fait une phase mésomorphe.

Voici quelques substances qui donnent des phases de cristaux plastiques: adamantanone, pentachloronitrobenzène, éthanol, carborane, camphre ou bornéol, dichlorobenzène, cyclohexane, cyclohexanol, fullerène.

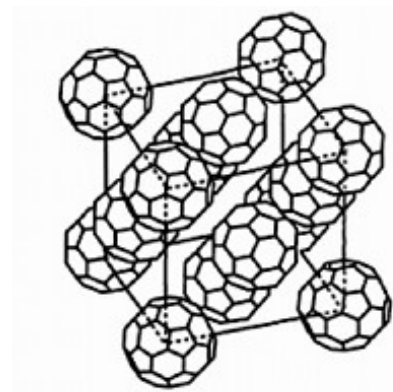


Carborane: La molécule $B_{10}C_2H_{12}$ est un icosaèdre (20 triangles et 12 sommets). C'est presque une sphère.

Merci à Peter Lunkenheimer, Université d'Augsburg, Allemagne



Molécule de fullerène ou C60
Merci à Wikipédia



Empilement cristallin du C60
Merci à Henri Alloul. Schéma original dans *Physique des électrons dans les solides*, tome I

Fullerène ou C60

Le fullerène est fait de molécules d'au moins 60 atomes de carbone (d'où son nom de C60). Ils sont répartis en hexagones et en pentagones dessinant un polyèdre semi-régulier, une forme proche d'une sphère. Son diamètre est de 0,7 nm, vraiment très petit. Il existe toute une famille de ces molécules. Le C60 a la capacité de s'empiler en une structure cubique à faces centrées.

Le C60 a été synthétisé et étudié en 1985 par Harry Kroto de l'Université de Sussex (Angleterre) en collaboration avec l'équipe du professeur Smalley et Bob Curl à Houston (U.S.A.). On l'a baptisé plus tard du nom de fullerène en hommage à l'architecte Buckminster Fuller surtout réputé pour la conception des dômes géodésiques (voir *Réseaux planétaires et polyèdres*).

COMPLÉMENTS

Affichage par cristaux liquides (LCD)

Si vous êtes familier avec les documentations techniques des écrans de télévision, d'ordinateurs ou de téléphones, vous savez que beaucoup d'entre eux sont construits selon la technologie des cristaux liquides ou LCD (Liquid Crystal Display). Ce livre, pas plus que les autres articles du site spirit-science.fr, n'a la vocation d'exposer des informations technologiques. Je rappelle que le but de mes articles est de **décrire les forces de la matière et les forces de la vie et de mieux faire comprendre**

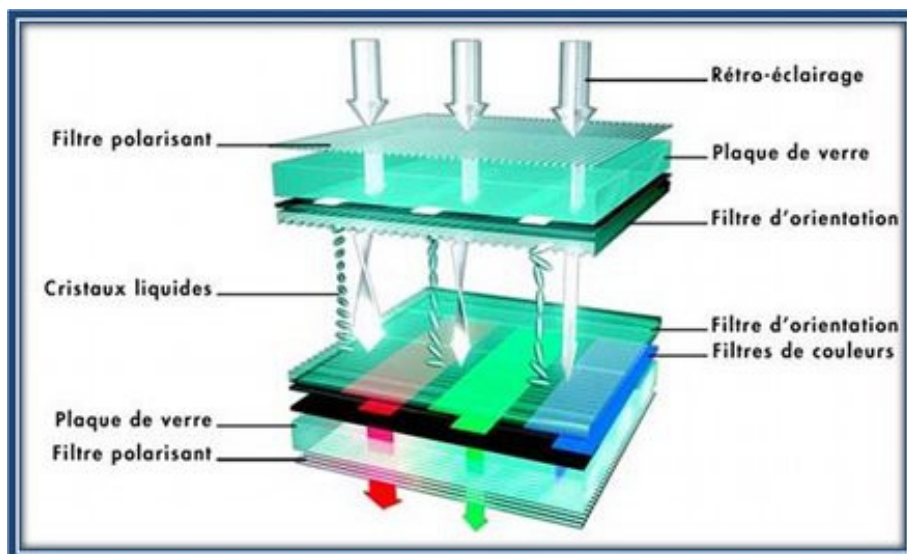
comment elles interagissent avec nous. Toutefois, après ces explications sur les molécules des cristaux liquides et les changements de symétrie de leurs structures, une question peut venir naturellement à l'esprit, à laquelle je vais donner des éléments de réponse: *Quel rapport ces structures ont-elles avec l'affichage? Qu'est-ce qui les rend appropriées à un tel usage?*

Réponse: Les cristaux liquides ont des caractéristiques **optiques** singulières. Les propriétés de diffusion, de transparence ou de réflexion de la lumière à travers une couche de cristal liquide peuvent être modifiées et contrôlées lorsque la couche est soumise à un **champ électrique**.

Prenons le cas d'un nématique. Il est caractérisé par l'orientation des molécules. Prenons un film qui couvre une très petite surface, une **cellule** qui est soit un petit segment, soit un petit point à l'échelle de notre vision. Ce sera un point d'une image (**pixel**) ou le segment d'un chiffre. Toutefois, la surface de ce film à l'échelle microscopique est suffisamment importante pour contenir de nombreux domaines avec des orientations moléculaires différentes. **S'il est éclairé par devant ou par transparence, la lumière est diffuse**, le film est laiteux, non transparent. Or **sous l'effet du champ électrique, ces molécules s'orientent plus ou moins fortement dans le sens du champ**, en fonction de la force de celui-ci et toutes deviennent alignées. Le film devient transparent.

Le fonctionnement des **écrans à cristaux liquides** repose sur ces changements d'orientation en présence d'un champ électrique. Quand le champ électrique est activé, la structure est par exemple transparente et on ne voit pas le pixel. Quand le champ est coupé, la structure revient dans son état désordonné d'origine, diffuse la lumière et devient visible. On peut ainsi allumer et éteindre le pixel.

La technologie réelle est plus sophistiquée pour gagner en contraste et faire en sorte que la vision ne soit pas trop affectée par l'angle de vue. Il existe plusieurs procédés. L'un d'eux est l'effet de **nématique torsadé** (TN). Voici son principe:



Merci à Sébastien Dalmasso

Le nématique est déposé entre les deux surfaces de verre d'une cellule. Or il est possible de préparer la surface de verre de telle sorte que les bâtonnets soient posés à plat et forcés d'adopter une orientation. Tous les bâtonnets sont orientés de la même façon à la surface de la plaque inférieure et de la même façon à la surface de la plaque supérieure. Mais on s'arrange pour que ces deux orientations soient décalées de 90°. Le nématique est donc torsadé de l'une à l'autre.

On accole un **polariseur** à l'extérieur de chaque surface de verre, eux-mêmes tournés à 90°. On éclaire la surface. Le rôle d'un polariseur est de filtrer la lumière afin de ne conserver que celle qui vibre dans une direction précise. En l'absence de nématique, la direction imposée par le premier polariseur est arrêtée par le deuxième, aucune lumière ne passe. Mais lorsque le nématique torsadé est présent, il fait lui-même tourner la lumière de 90° qui n'est plus arrêtée. La cellule est allumée.

Chacune des deux surfaces de verre est recouverte d'un **film conducteur** pour appliquer un champ électrique. Lorsque l'on applique le champ, les molécules s'alignent progressivement suivant la direction du champ. La lumière n'est plus déviée par les molécules, elle est donc arrêtée par le deuxième polariseur. La cellule est éteinte.

Si on coupe le champ électrique, la structure torsadée se reforme, et la cellule se rallume.

Polymères

Leurs structures et leurs propriétés

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités, des plus visibles aux plus cachés, des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires. Que sont-elles au juste? Qu'ont-elles de particulier qui les rend différentes des métaux, des roches, des céramiques? Quelles qualités sont à l'origine de leur succès prodigieux? A quoi ressemblent-elles au niveau microscopique?

Avant de répondre, je voudrais d'abord proposer une attitude d'esprit pour aborder cette étude. Lorsqu'on nous enseigne des connaissances en physique, il arrive souvent qu'on en sorte désabusé, car un phénomène qui nous semble merveilleux devient explicable par une loi de la physique, et tombe dans la banalité. On peut se sentir ému par le reflet d'une bougie sur une table vernie, en percevoir la beauté et la magie, et sentir cette émotion s'éteindre en apprenant qu'il s'agit simplement de la réflexion de la lumière sur un plan obéissant aux lois de Descartes. Cependant, l'inverse est vrai également: **connaître les mécanismes et les forces à l'œuvre dans la matière peut renforcer notre émerveillement en mettant en lumière combien ces structures et ces forces sont ingénieuses et étonnantes.**

Je vais donc tenter de vous faire partager mon admiration sur **les structures étonnamment variées des polymères** et vous en faire entrevoir la beauté. Vous ferez connaissance avec les molécules des polymères (appelées macromolécules), et vous comprendrez comment elles s'assemblent en microstructures qui leur confèrent des caractéristiques, des propriétés et des comportements remarquables, qui sont à l'origine de leurs multiples applications pratiques. Je vous convie à découvrir ce monde intime des polymères.

Rencontre avec les polymères

En gros, les polymères, ce sont les **matières plastiques**. Contentons-nous de cette définition pour le moment, qui est suffisante pour comprendre la suite.

Utilisation des polymères

On rencontre les polymères dans les petits objets usuels de la maison, les appareils électroménagers, et aussi en tant que matériaux de construction, en revêtements et peintures, dans les emballages, les pneus, les fibres textiles, les produits médicaux, chirurgicaux, prothèses, produits d'hygiène, articles de loisirs, pièces de structures dans les véhicules de transport, les équipements électriques, les circuits électroniques, les matelas-mousses, les colles. Ils s'infiltrent aussi dans l'alimentation, les produits cosmétiques, le ciment, etc.

Polymères naturels et polymères de synthèse

Les polymères qui servent à la fabrication de ces produits et articles sont synthétisés chimiquement à partir du pétrole, mais également du charbon, du gaz naturel et du bois ou d'autres substances végétales.

La nature elle aussi produit des polymères depuis toujours puisqu'on les trouve dans le bois et les végétaux sous forme de cellulose et d'amidon, dans les cheveux, les ongles, etc. L'ADN (*voir [L'ADN et le code génétique](#)*), les protéines, le collagène, la soie sont des exemples de polymères constitutifs du monde vivant.

Leurs propriétés

Lorsqu'on parle de propriété d'un matériau, on se réfère à la façon dont il réagit à une sollicitation. On pourrait aussi la nommer une sensibilité à cette stimulation, ou bien son inverse, la stabilité et la résistance. Ainsi, les propriétés thermiques décrivent le comportement du matériau vis-à-vis de la chaleur.

Propriétés thermiques, les thermodurcissables et les thermoplastiques

On peut classer les polymères en deux types, en fonction de leur réaction à la chaleur: les thermodurcissables et les thermoplastiques.

Les thermoplastiques fondent lorsqu'on les chauffe, tout comme la glace ou le beurre. C'est le cas du polyéthylène, du polypropylène, des polyamides, de certains polyesters. C'est pourquoi il n'est pas recommandé d'oublier le panier à salade en plastique sur la plaque chaude de la cuisinière. En revanche, l'avantage est que dans l'état fondu, on peut les **mouler** dans la forme que l'on veut. C'est un procédé industriel employé pour fabriquer des objets à la pièce, en discontinu. Ce procédé est bien connu également pour les métaux, mais les températures de fusion des polymères sont bien plus basses, de l'ordre de 80°C à 300°C. Un autre procédé répandu de mise en forme est l'**extrusion** qui consiste à faire passer la matière chaude dans une vis qui l'entraîne dans une filière dont le profil permet de produire des fils, des films, des plaques, des tubes, des enrobages de câbles.

Les thermodurcissables durcissent quand on les chauffe. Un exemple connu est celui des **colles** ou des **peintures**. Ils sont également très employés comme pièces de structure thermostables, par exemple les résines polyépoxydes, certains polyuréthanes, certains polyesters. On les met en forme lorsqu'ils sont encore dans leur état mou, de la même manière que les thermoplastiques, avant qu'ils ne durcissent sous l'effet de la chaleur et d'additifs chimiques qui induisent la réaction de polymérisation.

Propriétés mécaniques, transition vitreuse

Le succès des polymères provient en partie de la facilité avec laquelle on peut leur donner des formes voulues (d'autant plus à l'état fondu). Ils sont très malléables, très **plastiques**, d'où leur nom. En fait, cette plasticité varie dans une large gamme, des plus rigides, durs et cassants, aux plus mous (pâtes) ou élastiques (élastomères).

Les propriétés mécaniques décrivent leur comportement vis à vis à des sollicitations mécaniques telles que pressions, étirements, torsions, frottements, chocs et sous l'effet de la pesanteur. Autrement dit est-ce que la structure et la forme du polymère sont stables dans le temps, même s'il est un peu bousculé? Certains polymères seront appréciés pour leur bonne stabilité dimensionnelle (par exemple les polyesters aromatiques). D'autres, les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs. On les emploie dans les pneus, les semelles de chaussures, les matelas, les fibres textiles élasthane (polyuréthane) ...

Thermoplastiques et thermodurcissables sont soumis au phénomène de **vitrification**. Au-dessous de leur température de vitrification, ou transition vitreuse, ils deviennent durs et cassants comme du verre. Au-dessus, ils sont plus souples, plus plastiques. A l'extrême, ils deviennent élastiques.

Autres propriétés

D'autres caractéristiques des polymères sont largement exploitées dans leurs applications:

Leurs propriétés optiques

Transparence (étuis de CD, bouteilles d'eau), translucidité, opacité, coloration.

Leurs propriétés électriques et électro-optiques

Les polymères sont largement utilisés comme **isolants électriques**, en particulier dans les circuits électroniques et les gaines de câbles électriques. Il existe aussi des **polymères conducteurs**, soit à l'état intrinsèque, soit parce qu'ils sont chargés de particules de carbone conductrices (*voir plus loin les composites*).

Certaines molécules de polymères, rigides et allongées, sont susceptibles de **s'orienter sous l'effet d'un champ électrique**. Cet effet est utilisé dans des dispositifs d'affichage comportant des polymères de structure cristal-liquide (*voir plus loin*). Lorsque le champ n'est pas appliqué, les molécules sont en désordre local, le matériau est opaque et d'apparence laiteuse. Lorsque le champ est appliqué, les molécules s'orientent dans la même direction et laissent passer la lumière. Le matériau devient transparent.

Leurs propriétés de protection physique et chimique

Ces propriétés englobent des caractéristiques diverses:

Imperméabilité aux liquides et aux gaz, **résistance chimique** aux solvants, résistance aux rayons ultraviolets.

Les polymères sont employés pour la fabrication d'imperméables, d'emballages, de boîtes de conservation, de flacons pour les laboratoires, de citernes, de gaines de câbles, pour l'enduction de tissus, etc.

Toutes les propriétés décrites sont directement reliées à la nature chimique des molécules (voir ci-dessous) et à la **microstructure du matériau**.

Les molécules des polymères

Même quand on ne sait pas très bien ce que sont les polymères, leurs noms nous sont assez familiers par les **fibres textiles** (polyamide, polyester) ou les **matériaux de construction** (polychlorure de vinyle ou PVC). En somme un polymère, c'est un poly-quelque chose. Les molécules des polymères sont constituées de la **répétition d'un motif générique**, le *-mère* (cela signifie *qui engendre*), appelé **monomère**.

Par exemple, la molécule de polyéthylène est formée de l'association en chaînes du motif $-CH_2-$ provenant de l'éthylène. Le nombre de motifs peut être extrêmement élevé, jusqu'à 100 000. Ce sont donc des molécules géantes, d'où leur nom de **macromolécules**. Si elles sont géantes à l'échelle atomique, il n'en reste pas moins que nous sommes dans le domaine de l'infiniment petit: **les plus longues mesurent quelques micromètres**.

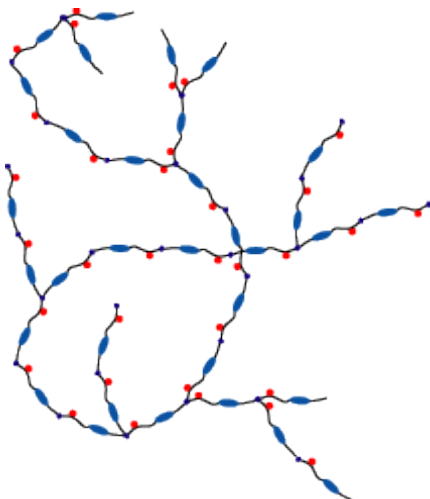


Fig.1- Schéma d'une macromolécule ramifiée

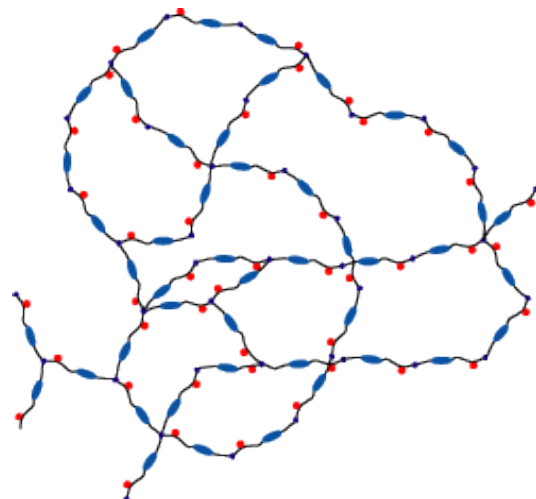


Fig.2- Schéma d'une macromolécule en réseau ou réticulée

Dans une **molécule linéaire**, les monomères sont enchainés en ligne. En réalité, la molécule est rarement parfaitement linéaire. Elle peut être branchue ou **ramifiée** (figure 1). Enfin, les chaînes moléculaires peuvent être **interconnectées en réseau** (réticulées) et constituent alors une seule supermolécule (figure 2).

Les molécules des thermoplastiques sont linéaires (plus ou moins branchues ou ramifiées). Les molécules des thermodurcissables sont réticulées.

En-dessous de la transition vitreuse, les molécules sont figées dans le matériau. Au-dessus de cette température, des segments de molécules sont mobiles. Par exemple, il vibrent entre deux points d'attache de façon analogue à une corde de guitare.

La nature chimique des macromolécules détermine en partie les propriétés des polymères. Le téflon (polytétrafluoroéthylène, PTFE) doit ses propriétés d'**antiadhérence** et de résistance à la chaleur à la présence d'atomes de fluor dans sa molécule: d'où son utilisation dans les ustensiles de cuisine. Il est aussi retenu comme constituant du gore-tex, une membrane parsemée de trous, sur laquelle les gouttelettes d'eau roulent sans mouiller.

Les propriétés dépendent aussi largement de la façon dont s'assemblent les macromolécules. Dans la suite de cette présentation, nous verrons qu'elles sont parfois en désordre, parfois plus ou moins ordonnées: empilées, alignées, étirées, repliées, mélangées, nouées, etc., ce qui donne lieu à différentes microstructures.

Les microstructures des polymères seuls (homopolymères)

Structures amorphes

Polymères thermoplastiques

Beaucoup de polymères thermoplastiques ont une structure amorphe: polyéthylène basse densité (PEBD), polystyrène (PS), polyméthacrylate de méthyle (PMMA).

Les macromolécules linéaires y sont entremêlées en pelote comme des nouilles (cuites!) dans un plat. On dit qu'elles sont en **désordre**, mais c'est là un point de vue qui dépend de la définition de l'ordre. On prendra comme définition générale de l'**ordre**, le fait de **pouvoir attribuer une règle d'arrangement, ou une organisation**. Dans la structure amorphe, les macromolécules sont flexibles et disposées sans aucune règle, de façon aléatoire. Mais cela donne quelque chose d'assez homogène.

En général, les polymères amorphes employés sans adjonction d'autres substances sont **transparents**. C'est le cas, par exemple des films de polyéthylène basse densité, des boîtiers en polyméthacrylate de méthyle, des bouteilles d'eau en polytéréphtalate d'éthylène (PET). Mais le caractère de transparence n'est pas systématique, et inversement, il n'est pas systématiquement relié au caractère amorphe dans la matière. Il suffit de citer l'exemple d'un **crystal de quartz**.

Polymères thermodurcissables

Les thermodurcissables sont généralement amorphes, par exemple les résines polyépoxydes. En effet, les réticulations et pontages ont lieu dans toutes les directions empêchant tout ordre d'orientation, provoquant l'isotropie du matériau. Cela ressemble à un enchevêtrement de lianes s'accrochant les unes aux autres par des tentacules en de multiples points.

Élastomères

Une autre catégorie d'amorphes est constituée par les élastomères. Ce sont des **caoutchoucs** tels que le polyisoprène (caoutchouc naturel et synthétique) et le polybutadiène. Leur température de vitrification est en-dessous de la température ambiante de sorte qu'ils restent souples.

Les macromolécules sont emmêlées en pelote, et de plus elles sont reliées de façon assez lâche par

des nœuds dont la nature varie selon les types d'élastomères. Lorsqu'on tire sur un élastomère, les molécules se déplient et s'allongent. Le rôle des nœuds est de les empêcher de glisser et de les ramener dans leur position initiale lorsqu'on relâche la tension.

Structures semi-cristallines

La structure cristalline n'est pas réservée au monde minéral. Elle est largement présente dans les **polymères thermoplastiques**, mais elle se révèle sous des aspects spécifiques aux polymères à cause de leurs longues molécules: **les cristallites et les sphérolites**.

Le polyéthylène en est un bon exemple. Dans une cristallite de polyéthylène, les chaînes macromoléculaires linéaires non ramifiées sont repliées en accordéon. Les parties rectilignes des repliements s'ajustent les unes contre les autres en empilements réguliers (figure 3). C'est la définition même d'un cristal. Sa particularité est que l'une des directions d'empilement (ici celle qui est représentée verticalement) est concrétisée par la chaîne elle-même.

Cependant, ces cristaux ne sont pas parfaits. Cela ne veut pas dire qu'ils sont mauvais, mais qu'au regard de notre définition de l'ordre, ils souffrent de défauts aux règles.

Par exemple, les chaînes ne sont pas parfaitement alignées et parallèles, ou bien pas vraiment calées les unes contre les autres. Il s'ensuit que **les cristaux ne se développent qu'à des tailles très limitées**, inférieures au micromètre. C'est ce qu'on nomme **cristallites**. Les matériaux en polyéthylène et autres thermoplastiques sont constitués de cristallites enrobés de matière amorphe (figure 4). Ils sont dits **semi-cristallins**.

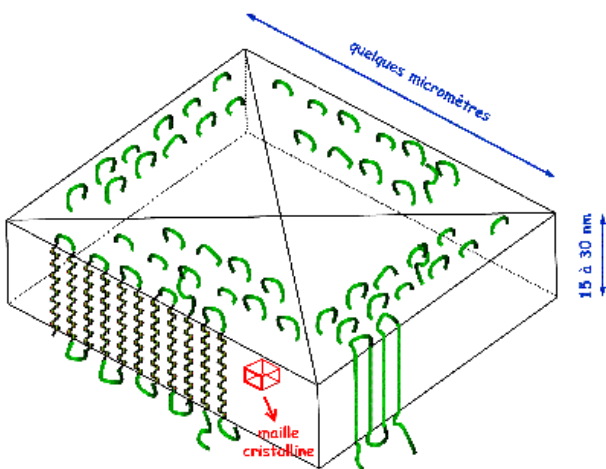


Fig.3- Schéma d'un cristal de polyéthylène © A. Boudet



Fig.4- Cristallites dans du polyéther-éther-cétone (microscopie électronique en transmission, © cliché A. Boudet)

Les sphérolites

Dans certaines conditions favorables de cristallisation, les cristaux ont la liberté de se développer à des tailles beaucoup plus grandes, plusieurs micromètres, et sont visibles au microscope optique (figure 5). On découvre que leur croissance s'est effectuée de façon radiale. Pour cette raison, on les nomme des **sphérolites**. La structure en sphérolites est particulièrement belle. Cependant, dans les matériaux industriels, il est préférable que les sphérolites restent petits, sinon le matériau est fragile.

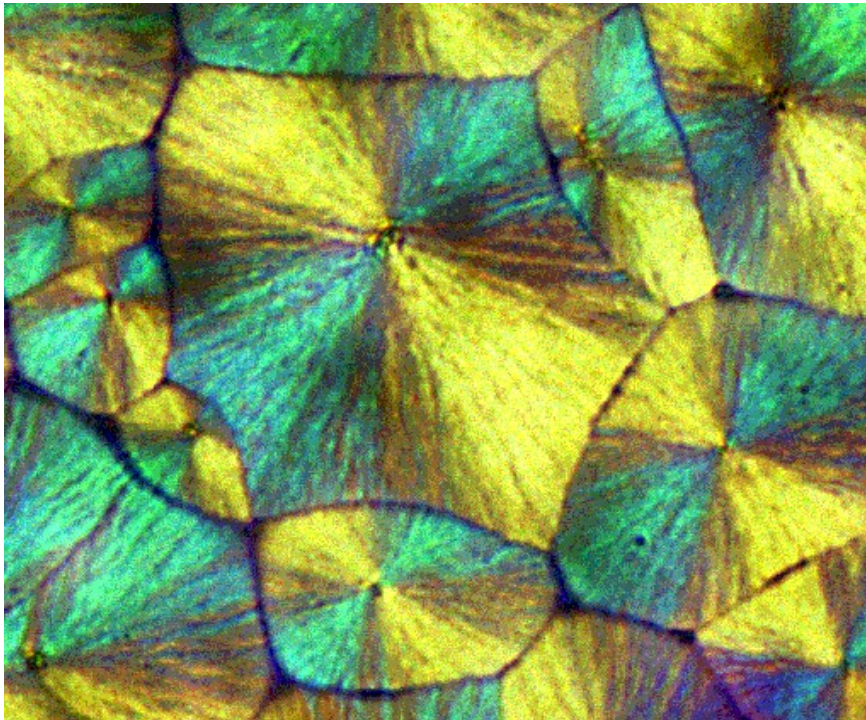


Fig.5- Sphérolites dans du polysulfure de phénylène (microscopie optique, © cliché A. Boudet)

Les conditions de la cristallisation

Le polyéthylène cristallin dont il a été question ci-dessus est un polyéthylène haute densité (PEHD) dont les molécules sont parfaitement linéaires. Si par contre les chaînes sont ramifiées, elle ne s'empilent pas en cristallites. On a affaire à un polyéthylène basse densité (PEBD) amorphe.

Certains matériaux comme le polytéréphtalate d'éthylène (PET) sont amorphes ou partiellement cristallins selon le mode de fabrication. Même s'il a une bonne tendance à cristalliser lorsqu'on le refroidit à partir de son état fondu, il a besoin de temps pour s'organiser. Un brusque refroidissement (une trempe) le solidifie à l'état amorphe.

Les fibres

Les fibres naturelles sont connues et employées depuis longtemps en tant que fils textiles et cordages, par exemple le coton, le lin et le chanvre. Leur caractéristique est d'avoir une forme extrêmement allongée dans un sens, et une section toute petite. Elles sont exploitées pour leur teneur mécanique dans le sens de la longueur. Cette propriété provient d'un constituant, la **cellulose**, polymère naturel du glucose. La **soie**, la **laine** sont d'autres exemples de fibres naturelles.

Les polymères synthétiques ont également conquis le domaine des fibres. Le **nylon** (un polyamide) a été l'un des premiers polymères synthétiques. Les fibres synthétiques ont une longueur pratiquement aussi grande que l'on veut, et sont appelées des filaments. Leur diamètre est très petit, environ 50 à 10 μm , et même moins de 10 μm dans le cas des microfibrilles. Les filaments sont assemblés en fils (figure 6).

Les microstructures des fibres sont de toutes sortes. Elles peuvent être amorphes (fibres transparentes en polyméthacrylate de méthyle pour l'optique, fil de pêche en polyamide), quelquefois semi-cristallines. Mais souvent, les molécules s'étirent parallèlement à l'axe de fibre. C'est dans cette configuration que la fibre possède la meilleure résistance à la traction. De cette façon, on peut fabriquer des fibres ultra-résistantes. A condition toutefois que ces molécules soient solidaires. Cela est réalisé par des enchevêtrements ou par des liaisons hydrogène comme dans le cas du Kevlar, un polyamide (figure 7).



Fig.6- Dans une toile, les fils de coton entrecroisés sont faits de faisceaux de fibres (microscopie électronique, © cliché A. Boudet)

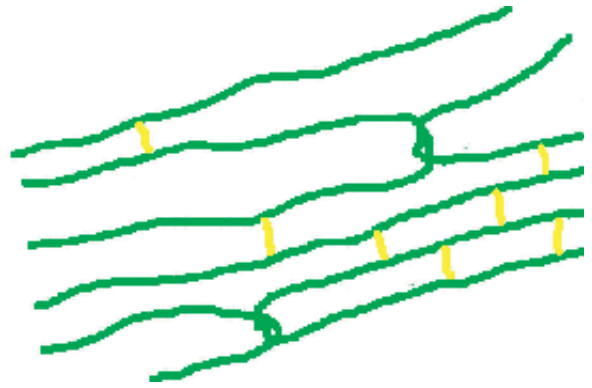


Fig.7- Dans une fibre à haute résistance, les molécules (en vert) sont parallèles et sont reliées par des nœuds ou par des liaisons hydrogène (en jaune)

Les polymères cristaux-liquides ou mésomorphes

La notion de cristal-liquide est exposée dans le chapitre précédent. Rappelons-en l'essentiel:

Les molécules des cristaux-liquides ne sont pas isotropes. Elles ont une forme rigide qui possède une **orientation privilégiée**. Elles sont par exemple allongées sous forme de bâtonnets. Ces bâtonnets ont tendance à s'empiler côte à côte, parallèlement les uns aux autres. Par rapport aux structures amorphe et cristalline, **un ordre d'orientation** a été introduit, une anisotropie dans la structure.

En ce qui concerne les polymères, un exemple d'anisotropie a été donné dans la section précédente avec les fibres à haute résistance. Dans ce cas, les bâtonnets rigides sont les monomères reliés de façon linéaire dans une même chaîne (figure 8).

Une autre façon d'introduire les bâtonnets rigides dans une macromolécule est de les attacher comme pendentifs le long d'une chaîne flexible (figure 9). On obtient des polymères cristaux-liquides en peigne. Ils adoptent naturellement une structure en couches constituées par les "dents" du peigne.



Fig.8- Macromolécule de polymère cristal-liquide linéaire

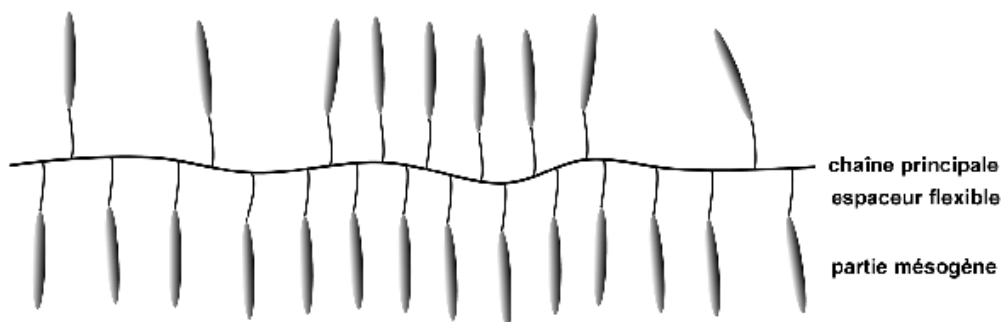


Fig.9- Macromolécule de polymère cristal-liquide en peigne ©A. Boudet

Les microstructures des polymères associés

Afin d'améliorer ou d'adapter les caractéristiques des polymères, on leur ajoute ou on leur associe d'autres substances: additifs chimiques, minéraux, gaz, fibres de renforts, autres polymères.

Les additifs

Dans les polymères, on ajoute systématiquement des substances chimiques appelées additifs destinées à modifier leurs caractéristiques: dureté, aspect (agents gonflants), couleur (pigments), résistance chimique (agents antioxydants).

Les **plastifiants** favorisent leur mise en forme en les rendant plus souples, ou plus coulants lorsqu'ils sont chauffés.

Le **polychlorure de vinyle** (PVC) est un produit rigide et dur employé par exemple pour la fabrication de tuyaux. Si on lui ajoute un plastifiant, il devient souple et sert à la fabrication de toiles cirées.

Les mousses de polymères

Les mousses sont obtenues en incorporant des **microbulles** de gaz à l'intérieur du polymère. Deux exemples connus de mousses de polymères sont les matelas-mousses en polyuréthane et le polystyrène expansé. Le premier est intéressant pour sa souplesse (ameublement) et le second pour ses propriétés d'isolation (bâtiment) ou sa capacité à amortir les chocs (emballages).

Les polymères renforcés ou composites

Afin de renforcer un polymère, on peut le parsemer de diverses substances soit sous forme de **particules**, soit sous forme de **fibres**. On dit que le polymère constitue la **matrice** et qu'il est chargé ou renforcé de particules ou de fibres.

Le **polypropylène** dont sont faites les tables et chaises de jardin contient des **particules de talc** qui augmentent sa rigidité, sa résistance à la chaleur, sa tenue à la lumière, et diminuent le coût des matières premières. Dans les **composites dentaires**, les charges sont des **particules de silice**, dont l'intérêt est de diminuer le retrait lors de la polymérisation et d'augmenter la compatibilité du matériau avec les tissus vivants. Les **élastomères** des pneus sont chargés de **noir de carbone**.

Pour obtenir de hautes performances mécaniques, il vaut mieux renforcer les matrices par des **fibres longues** disposées de façon régulière et ordonnée. Ce sont des fibres minérales telles que **fibres de verre ou de carbone**, **fibres polymères** (polyaramides, polyesters aromatiques, polyéthylène) ou **fibres végétales** (lin, chanvre). Elles sont disposées en **tissus** orientés à une ou deux dimensions, ou tressées en trois dimensions.

Les matrices sont choisies en fonction de leur tenue à la chaleur. Les plus résistantes sont les thermodurcissables comme les polyesters insaturés et les polyépoxydes, mais les thermoplastiques ont l'avantage d'être stockés et mis en œuvre plus facilement, d'être recyclables, et certains peuvent résister à de hautes températures de l'ordre de 250°C (polytéréphtalate d'éthylène, polyparaphénylène). La qualité d'un composite dépend de la qualité de l'imprégnation des fibres par la matrice.

Les mélanges de polymères

Le polystyrène est un polymère très employé, transparent et rigide, mais cassant. Un bon moyen de remédier à cette faiblesse vis-à-vis des chocs est de lui incorporer un autre polymère absorbant les chocs, un élastomère appelé polybutadiène. On aboutit à un matériau différent, opaque, macroscopiquement homogène, le **polystyrène-choc**. Le polybutadiène, en proportion de quelques pour cent, est **dispersé sous forme de gouttelettes** de quelques micromètres de diamètre.

On fait souvent appel aux mélanges pour associer diverses sortes de polymères, quoiqu'**il ne soit pas facile de mélanger deux polymères différents**. Ils ont tendance à vouloir se séparer. Il faut leur

appliquer un brassage énergétique et leur ajouter des émulsifiants pour obtenir un mélange homogène. Cependant au niveau microscopique, les deux polymères restent distincts, ainsi qu'on peut le constater en microscopie électronique (figure 10).

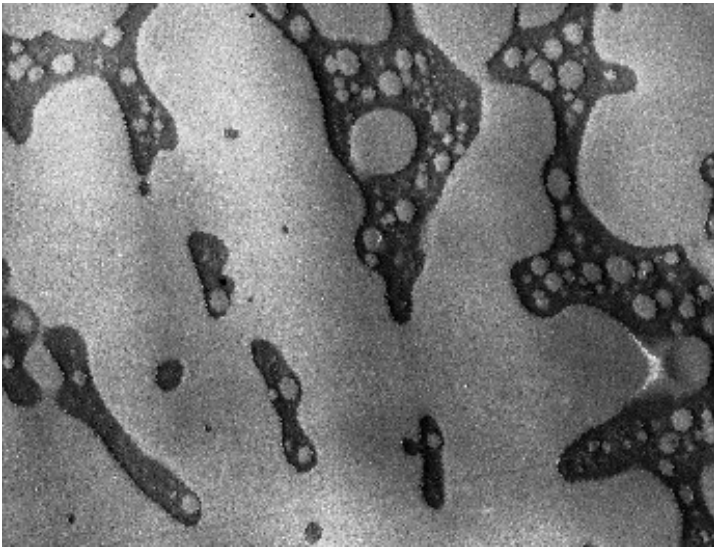


Fig.10- Mélange d'un thermoplastique et d'une résine polyépoxyde (microscopie électronique, © cliché A. Boudet)

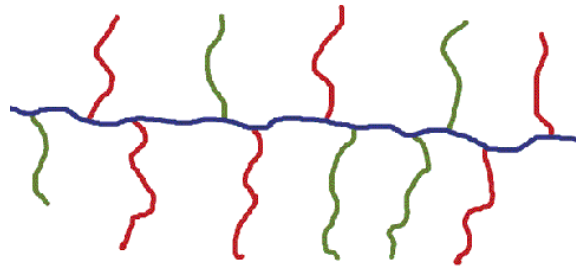


Fig.11- Molécule de copolymère en peigne à trois composants.

Les copolymères

Pour éviter que deux polymères différents ne se séparent trop fortement comme dans un mélange, on peut **associer chimiquement leurs monomères au sein d'une même molécule**. Le procédé est plus élaboré qu'un mélange et les produits obtenus sont employés dans des applications plus techniques.

Par exemple, la molécule peut comporter à la fois de l'éthylène et du propylène. On a un copolymère éthylène - propylène. Il y a plusieurs types d'assemblages possibles dans une molécule:

- si les monomères sont disposés en blocs, chaque bloc étant composé d'un seul type de monomères (**copolymère à blocs**), le copolymère présente les qualités de ses deux composants: l'éthylène apporte au polypropylène une meilleure tenue au froid. En général, le nombre de blocs est limité à deux ou trois. Les blocs sont associés en ligne, en étoile ou en peigne (figure 11)
- si les monomères sont disposés au hasard (**copolymère statistique**), la molécule perd sa régularité et sa capacité à cristalliser. Le copolymère statistique d'éthylène - propylène est amorphe et plus souple que le polypropylène.

Les élastomères thermoplastiques

Les élastomères thermoplastiques sont à la fois une classe particulière d'élastomères et une classe particulière de copolymères à blocs. Dans un copolymère à blocs linéaire, si l'un des monomères est **rigide** (exemple le styrène), et l'autre **souple** (exemple isoprène ou butadiène), les blocs rigides des différentes chaînes moléculaires ont tendance à s'assembler en nœuds d'ancrage. Si l'on tire sur cette molécule, les nœuds agissent comme points de rappel. On a un élastomère. Mais comme les molécules sont linéaires, elles ont la faculté de se séparer sous l'effet de la chaleur. Le copolymère est donc thermoplastique, avec les avantages que cela représente.

ANNEXES

- Remplir l'espace en empilant des polyèdres
- Décrire notre réalité dans un espace de dimension supérieure

Comment remplir l'espace en empilant des polyèdres

L'exemple des réseaux cristallins nous a montré qu'il est possible de remplir l'espace par des polyèdres identiques posés dans la même orientation les uns contre les autres. Ils s'ajustent les uns aux autres comme des briques et ne laissent aucun vide entre eux. Nous l'avons vérifié pour **le cube**, **l'octaèdre tronqué**, **les dodécaèdres rhombique et rhombo-hexagonal**.

Les mathématiciens ont recherché quelles étaient les formes possibles qui sont capables de remplir l'espace par empilement. Ce questionnement existe au moins depuis Aristote et n'a pas encore reçu de réponse exhaustive.

Nous pouvons par exemple nous demander s'il est possible de remplir l'espace avec des **boules**. La pratique montre que si nous serrons les boules les unes contre les autres, elles laissent entre elles de petits vides. Elles sont donc incapables de remplir l'espace complètement (fig.7). Si ces boules sont des oranges un peu molles et que nous les pressons assez fort pour les obliger à remplir les vides, nous les déformons. Leurs faces s'aplatissent contre celles de l'orange voisine. Finalement elles deviennent des polyèdres, volumes dont les faces sont plates.



Fig.7

On pourrait imaginer une sorte de boule qui serait bombée d'un côté et en creux de l'autre pour s'adapter à la boule voisine. Il y a donc des creux ou volumes **concaves** (mot de la famille de cave qui est un trou dans la terre), et des volumes **convexes** sans creux. Nous nous limitons ici aux **polyèdres convexes**, les volumes les plus simples.

Polyèdres convexes réguliers

Examinons tout d'abord les **polyèdres réguliers**. Un polyèdre est régulier s'il est constitué de faces toutes identiques et régulières (tous leurs côtés identiques), et que tous ses sommets sont identiques. Il n'existe que **5 polyèdres réguliers convexes**: **le tétraèdre** (4 faces), **le cube (ou hexaèdre)** (6 faces), **l'octaèdre** (8 faces), **le dodécaèdre** (12 faces) et **l'icosaèdre** (20 faces). On les désigne sous le nom de **solides de Platon**.

Seul le **cube** a la propriété de remplir l'espace. Les autres laissent des vides entre eux. Toutefois, on pourra combler ces vides avec un autre type de polyèdre (voir plus loin).

Polyèdres convexes à faces régulières

D'autres polyèdres ont également des faces régulières, mais leur assemblage ne l'est pas. Ils sont composés de plusieurs types de faces associés, par exemple des losanges avec des carrés, ou, comme les ballons de football, des hexagones et des pentagones. Dans cette catégorie, on trouve les 13 **solides d'Archimède**.

Le mathématicien russe Fedorov a démontré qu'il n'existait que 5 polyèdres réguliers ou semi-réguliers (dont les sommets sont équivalents) capables de paver l'espace: **le cube**, **l'octaèdre tronqué**, **le dodécaèdre rhombique**, **le dodécaèdre rhombo-hexagonal** et **le prisme hexagonal**. On retrouve donc les polyèdres que nous connaissons déjà dans les cristaux, plus le prisme hexagonal. On peut ajouter le **prisme triangulaire** et le **gyrobifastigium** (deux prismes triangulaires accolés), moins réguliers (fig.34).

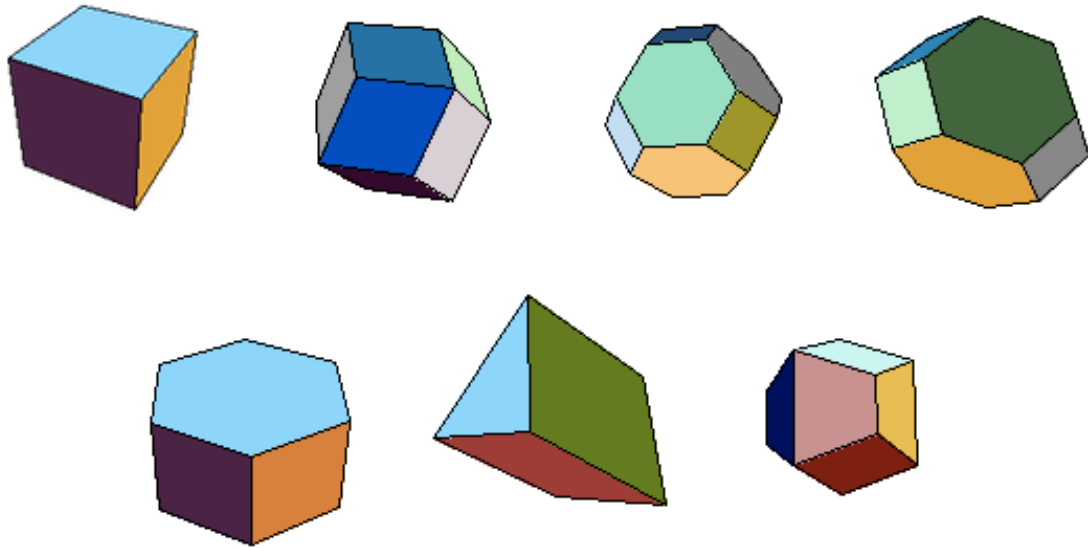


Fig.34- Les polyèdres les plus simples qui remplissent l'espace: cube, dodécaèdre rhombique, octaèdre tronqué, dodécaèdre rhombo-hexagonal, prisme hexagonal, prisme triangulaire, gyrobifastigium. D'après Mathworld

Beaucoup d'autres polyèdres non réguliers

À partir de ces polyèdres de base, beaucoup d'autres existent, obtenus par des déformations globales, par exemple le parallélépipède rectangle qui est un allongement du cube. On peut trouver des possibilités d'empilement multiples si on s'autorise à les placer dans des orientations différentes pour qu'ils s'emboitent.

Certains mathématiciens s'emploient à en faire le catalogue: sachant que d'autres polyèdres et méthodes d'assemblage peuvent toujours être découverts, ils ont répertorié 27 polyèdres à 6 faces, 16 à 7 faces, l'octaèdre, 26 à 10, 40 à 11, 16 à 12, 4 à 13, 8 à 14, 1 à 16, 2 à 17, 1 à 18, 6 à 20 (isocaèdre), 2 à 21, 5 à 22, 2 à 23, 1 à 24...

Combinaisons de polyèdres

Enfin, on peut associer 2 types de polyèdres et même plus afin de combler avec l'un les trous laissés par l'autre, comme cela a été fait dans le chapitre sur les quasicristaux avec le pavage de Penrose à deux dimensions où sont associés deux types de losanges.

Voici des combinaisons qui marchent:

tétraèdres + octaèdres

tétraèdres + tétraèdres tronqués

octaèdres + octaèdres tronqués + cubes, en proportions 1/1/3

Décrire une réalité dans un espace de dimension supérieure

Dans certains cas, la description de structures complexes de notre espace à 3 dimensions gagne beaucoup en simplicité lorsqu'on la décrit dans un espace de dimension supérieure ou **super-espace**. C'est le cas des cristaux apériodiques (quasi-cristaux, cristaux incommensurables) qui deviennent périodiques dans ces espaces.

D'où vient cette notion de dimension supérieure? La **dimension** (ou plus exactement la **dimensionnalité**) peut être

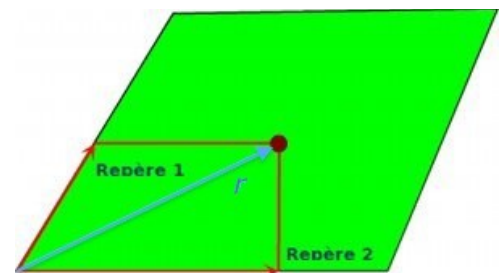


Fig.35- Un champ est une surface à **deux dimensions**. Pour indiquer la position d'un piquet dans ce champ, on doit fournir **deux repères**, par exemple ses distances par rapport à deux côtés.

définie comme le nombre de coordonnées nécessaires pour préciser la position d'un élément (un point) de cette structure. Par exemple, une ligne est un espace à une seule dimension, car si on part d'un repère zéro sur cette ligne, il suffit d'indiquer la distance (dans un sens ou dans l'autre) par rapport à ce repère pour situer un point de cette ligne. De même dans un plan on peut indiquer la position d'un point en indiquant ses 2 coordonnées par rapport à deux axes de ce plan (fig.35). C'est un espace de dimensionnalité 2.

Structures incommensurables

Si sur une ligne, donc un espace de dimension 1, on a une structure faite d'une succession de disques telle que celle de la figure 36a, il n'est pas simple de décrire simplement la position des disques.

Mais si dans ce cas particulier, on sépare ces disques en deux catégories (une verte et une bleue - fig.36b), alors on peut décrire séparément les disques bleus dans un espace avec une périodicité et les disques verts dans un autre espace avec une autre périodicité (fig.36c).

On a donc remplacé la structure à une dimension par la combinaison de deux variables (la position des disques bleus et celle des disques verts). Autrement dit, on est passé dans un espace à deux dimensions.

On peut alors imaginer cet espace plus vaste avec ses deux axes (fig.36d) dans lequel ces deux périodicités se combinent dans le plan (des structures non représentées sur la figure). Si on coupe cet espace par la ligne diagonale jaune, on retrouve notre structure de départ de 36b. On pourrait trouver d'autres combinaisons en coupant par d'autres lignes telles que la ligne rouge. Ce qui est à retenir, c'est que la structure réelle à une dimension dessinée sur cette ligne jaune peut-être définie comme la coupe (ou encore la projection) d'un espace à deux dimensions.

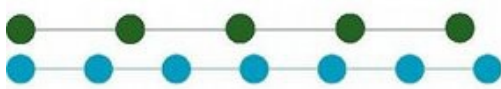
Fig. 36a-
Structure
réelle à
décrire



Fig.36b-
Séparation
en 2
catégories,
verte et
bleue



Fig.36c-
Séparation
en 2
espaces.
D'après F.



F.
Momprou

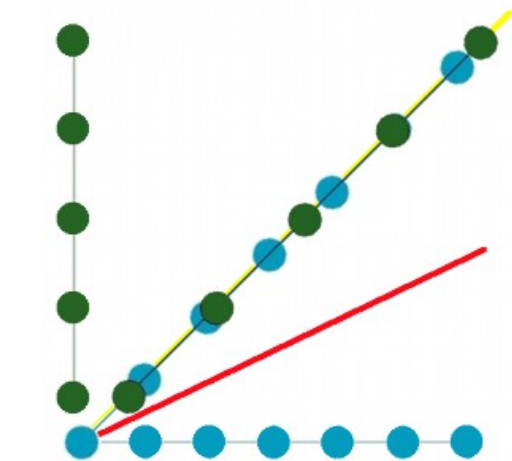
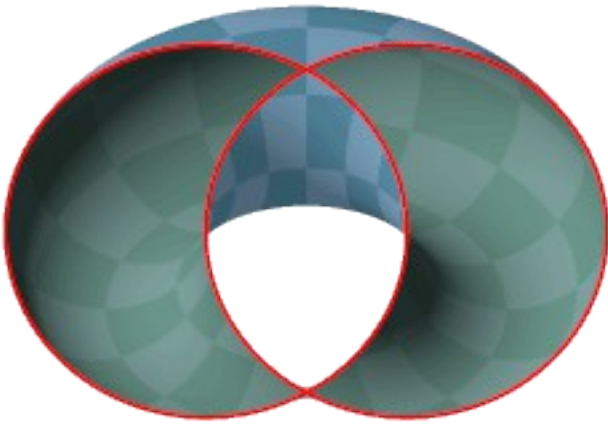


Fig.36d- Combinaison des 2 espaces et
projection sur une droite

Dans les cristaux incommensurables, c'est de manière semblable que leurs diagrammes de diffraction, obtenus sur un cliché à 2 dimensions, peuvent être décrits avec 4 indices. On a donc la possibilité simple de les définir dans un espace de dimension 4. Le cristal lui-même de l'espace à 3 dimensions peut être défini dans un espace de 4, 5 ou 6 dimensions où il est alors périodique.

Quasi-cristaux

Le même artifice mathématique de super-espace a été utilisé dans le cas des quasi-cristaux. Bien que ces cristaux aient une réalité concrète dans notre espace à 3D en tant qu'empilement de motifs atomiques, A. Katz et M. Duneau, chercheurs de l'école Polytechnique (Paris) ont montré en 1985 qu'on pouvait les décrire de façon beaucoup plus simple dans un super-espace de 4 dimensions ou plus. On est ramené à la réalité concrète de troisième dimension en coupant ce super-espace par un volume à 3 dimensions ou en le projetant dans ce volume.



*Fig.37- 2 cercles entrelacés obtenus par la coupe d'un tore par un plan (cercles de Villarceau)
Merci à Wikipedia*

Par exemple, des quasi-cristaux (Al-Li-Cu) de symétrie icosaédrique peuvent être indexés par 6 coordonnées (*pour plus de détail, voir le cours de S. Ravy*). On coupe cet espace à 6 dimensions par un hyperplan à 3 dimensions pour retomber sur la structure réelle. L'intérêt de ce formalisme qui semble une complication est au contraire de décrire le quasi-cristal de façon beaucoup plus simple, car à 6 dimensions, il comporte des périodicités de translation semblables aux systèmes cristallins des cristaux ordinaires.

Coupe d'un super-espace

Nous allons donner une image concrète de ce que signifie **couper un super-espace par un hyper-plan** en

prenant comme exemple un espace à 2 dimensions, donc un plan, dans lequel nous considérons une structure très simple pour notre exemple, deux cercles entrelacés (fig.37). Il nous est possible de décrire précisément ces cercles en indiquant leurs centres, leurs rayons, etc. Mais alternativement, nous pouvons imaginer un espace de plus grande dimension sans réalité concrète du point de vue de ces cercles entrelacés, le super-espace à 3 dimensions. Dans cet espace, nous imaginons un **tore**, c'est-à-dire un anneau semblable à une bouée. Un tore est une figure extrêmement simple parce qu'elle est régulière, symétrique, homogène.

Si on coupe le tore par un plan, on obtient des figures complexes qui varient selon l'inclinaison du plan. Dans une certaine position où le plan est *tangent* (il *touche* le tore - mot de la même famille que *tangible*) à la fois au-dessus d'un côté et au-dessous de l'autre, on obtient les deux cercles de la fig 37 (appelés par les mathématiciens **cercles de Villarceau**).

Dans le cadre de cet article, ce qui est important à retenir, c'est qu'on dispose d'une méthode pour décrire ces cercles dans un espace de dimension 3 alors qu'ils n'ont une réalité qu'en dimension 2. Cela peut faire apparaître des symétries inapparentes autrement.

Bien entendu, dans ce cas, comme dans le cas des cristaux aperiodiques, l'invention d'un super-espace est un artifice mathématique. On l'invente pour décrire une structure complexe parce qu'elle devient soudainement beaucoup plus simple et symétrique. Toutefois, cet artifice pourrait nous donner des idées sur la réalité d'un super-espace qu'au départ on suppose irréel. Pourrait-il être réel?

Au fond, **que percevons-nous de notre réalité?** Il se peut que la réalité de l'univers soit beaucoup plus vaste que ce que nous en percevons et que par constitution physique, nous soyons capables d'en percevoir seulement 3 dimensions. Or des scientifiques ont été amenés à imaginer un monde à plusieurs couches parallèles pour expliquer certains phénomènes quantiques. Mais alors **ces mondes parallèles sont-ils seulement des artifices mathématiques? Ou bien ces réalités parallèles existent-elles?** C'est la question que se posent certains physiciens quantiques. (*voir Fondements de la physique quantique*)

En savoir plus

LIVRE: Voyage au cœur de la matière plastique, par Alain Boudet

Certaines illustrations de ce livre sont reproduites du livre de l'auteur: **Voyage au cœur de la matière plastique**. Cet ouvrage comporte de nombreuses photographies des différentes microstructures des polymères, prises en microscopies optiques et électroniques. CNRS Editions, 2003

Articles sur des sites web

- Encyclopédie Wikipedia: [cristal](#); [forme cristalline](#); [cristallographie](#); [maille](#); [René Just Haüy](#); [diamant](#); [obsidienne](#); [carbone](#); [granite](#); [quasi-cristal](#); [verre](#); [industrie du verre](#); [puce électronique](#); [cristaux liquides](#); [nématique](#); [écrans à cristaux liquides](#); [écrans LCD](#); [F. Reinitzer](#); [Fullerène](#), [polyèdre](#); [solides de Platon](#); [polyèdres uniformes](#)

Minéraux (parfois avec cristallographie)

- [Minéralogie européenne à travers ses musées](#). Plusieurs textes de documentations. Biographies, telles celle de [René Just Haüy](#) (1743-1822)
- [Les cristaux et la cristallographie](#). Le site de Philippe Gosse
- [Kasaku, les secrets de notre planète](#). Site pédagogique très agréable. On y trouve des textes clairs et consistants (en format pdf) écrits par 4 anciens collaborateurs du muséum de Genève, en particulier Jacques Deferne et Nora Engel. [Au cœur des minéraux](#); [Le monde merveilleux des pierres précieuses](#); [Introduction à la cristallographie](#); [Le quartz](#)
- [Énergies et cristaux](#), association Akali

Cristallographie

- [Cristal](#). Les définitions du dictionnaire Littré
- Wikiversité, projet communautaire francophone visant à produire et diffuser des documents pédagogiques (cours, exercices, TD, documents audio, etc.). [Introduction à la cristallographie: systèmes cristallins](#)
- [Les cristaux ioniques](#). Mailles et réseaux; Systèmes cristallins; Croissance cristalline. Un projet TPE 2003 de Raphaël, Aude et Benoît
- [Cristallographie](#). Par Yves Epelboin, Université P.M. Curie, Paris. Des références pour l'enseignement
- [Cristallographie et Diffraction](#). Les cours de Jean-Pierre Lauriat, pour ceux qui ont un bon niveau de physique
- [Géométrie et Quasi-cristaux](#), Frédéric Mompiau
- Cours [Structure de la matière condensée](#), par Sylvain Ravy, Laboratoire de physique des solides, CNRS, Paris. Cristaux, cristaux aperiodiques, symétrie, remplissage

Technologie

- [La piézo-électricité](#) sur le site de F5ZV
- [La montre à quartz](#), son fonctionnement. Futura Sciences
- [Microprocesseurs](#), dans le site de Jean-Michel Richer, Faculté des Sciences d'Angers. Les galettes de silicium

Cristaux liquides

- Les cristaux liquides: sur [science amusante](#);
- Affichage par cristaux liquides: [Les affichages par cristaux liquides](#), par Cécilia Welti, Jean-Philippe Lebour et Charly Liddell sur le site Technosciences; [Les écrans LCD](#), par Sébastien Dalmasso; [écrans plats](#), par Comment ça marche; [Les écrans LCD](#) par Europ-Computer Performance
- [Georges Friedel](#), biographie, Annales des Mines
- [Fullerènes](#). [Agrégats moléculaires](#) Henri Alloul, Laboratoire de Physique des Solides, CNRS, Paris. Site [La supraconductivité](#).

En anglais

- [The world of Liquid Crystal Displays](#), by Mingxia Gu
- [Liquid Crystals](#). University of Cambridge, UK. This Teaching and Learning Package provides an introduction to liquid crystals, their physical properties and their modern-day applications.
- [Plastic Crystals](#), Groupe sur la matière désordonnée, Augsburg, Allemagne

Géométrie

- [Polyèdres](#). Magnifique site de Robert Ferréol comportant une encyclopédie des formes remarquables
- [Une balade dans le monde des polyèdres](#), le site graphique de Maurice Starck
- Je cite également ce site vraiment magique de Thérèse Eveilleau qui y a passé des milliers d'heures. On peut y voir des animations du [pavage d'une surface](#) qui ont été réalisées avec beaucoup d'imagination.

Texte conforme à la [nouvelle orthographe française](#) (1990)

Les publications du site [spirit-science.fr](#) sont identifiées par le numéro international ISSN 2430-5626

Cet article est protégé par les lois sur les droits d'auteur. Il est l'aboutissement d'études, d'investigations, de compréhensions, de synthèse, de réflexions, de clarifications et de reformulation en langage simple, qui ont demandé une somme importante de travail. Si vous deviez en tirer parti devant un public de lecteurs ou de spectateurs ou pour quoi que ce soit, merci de le citer.