

VISIONS CROISÉES

MAGAZINE N°4 / PRINTEMPS 2009

Les cristaux

Dès la Préhistoire, l'homme, dans sa quête des richesses souterraines, découvre des objets déroutants : les cristaux. Leurs couleurs et géométries multiples, leur « apparente inaltérabilité », et leurs jeux surprenants avec la lumière ont suscité mysticisme et fascination : les cristaux sont devenus symboles, dotés de pouvoirs surnaturels par des hommes avides de comprendre le monde.

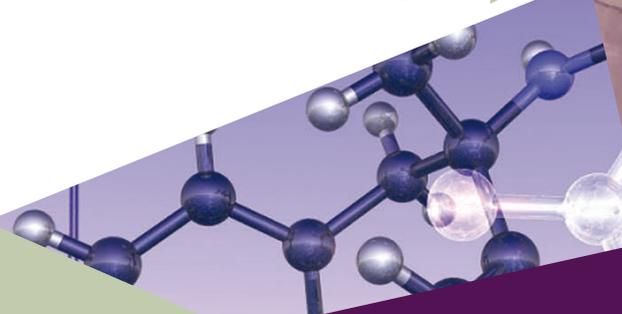
Les découvertes du XX^e siècle ont levé le voile sur la structure moléculaire et les propriétés physiques des cristaux, leur attribuant une « nouvelle place au coeur de la civilisation moderne ». Ils assurent aujourd'hui le fonctionnement précis de nos montres et téléphones portables, et participent à des applications aussi diverses que l'échographie médicale ou les sources de lumière LASER. Les cristaux sont désormais outils de recherche pour explorer l'infiniment grand et les origines de la Terre ou le minuscule et la structure des molécules du Vivant.

Ce numéro spécial de Visions Croisées est le fruit d'un partenariat avec l'équipe organisatrice de l'exposition hors les murs du Museum d'Histoire Naturelle de Grenoble intitulée « Voyage dans le cristal ». Elle sera inaugurée à Grenoble le 25 avril prochain et nous entraînera au coeur du cristal pour découvrir toutes les facettes de ces mystérieux objets.

Ion Iturbe et Edwige Moyroud, pour les moniteurs de l'atelier,
CIES-VISIONS CROISÉES, 2008-2009

SOMMAIRE

Édito	1
Les larmes du ciel, émerveillement et symboles	2
Les mathématiques pour expliquer la forme des cristaux	3
Des cristaux pour comprendre la Terre	4
Les débuts de la cristallographie aux rayons X	6
Cristal de roche	8
Les cristaux jouent avec la lumière	9
Cristalliser les protéines pour les observer en trois dimensions	10
Agenda	12



LES LARMES DU CIEL, ÉMERVEILLEMENT ET SYMBOLES

Pouvoirs occultes des pierres guérisseuses, pierres de folie, pierres à venin, pierres d'yeux, pierres de foudre, pierres amulettes... Quête légendaire de la Pierre philosophale, aura mystérieuse des pierres tombées du ciel et des mégalithes millénaires... La fascination pour le règne minéral est telle qu'elle demande à être interrogée. Avec l'anthropologie, on peut comprendre que l'interprétation symbolique est un rapport au monde qui permet à l'homme de donner sens à son environnement.

GLOSSAIRE

Bricolage idéologique

Concept introduit par Claude Lévi-Strauss dans *La pensée sauvage* (Plon, 1962).

Efficacité symbolique

Ce qui, tout en relevant d'un système symbolique, fait preuve d'un effet dans le réel. Voir Claude Lévi-Strauss, *Anthropologie structurale* (Plon, 1958).

Hippocratique

Qui se fonde sur la doctrine d'Hippocrate, médecin grec (460 av. J.-C. - 370 av. J.-C.) souvent désigné comme le père de la médecine.

Pline

Ici Pline l'Ancien, écrivain et naturaliste romain (23 - 79 ap. J.-C.), auteur de l'encyclopédie intitulée *Histoire naturelle*.

Prophylaxie

Ensemble des moyens destinés à prévenir l'apparition, la propagation ou l'aggravation des maladies.

PORTRAIT DE L'AUTEUR

Florence Pizzorni-Itié est anthropologue, conservatrice en chef au Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée, Paris/Marseille (www.musem.eu), spécialisée dans la muséographie de la mobilité (métissages, échanges culturels et de savoir-faire, migrations, tourisme...) et enseigne la muséologie dans diverses Universités, Écoles et Centres de formation. Elle a réalisé les expositions *Tropiques Méfis*, 1999, *Parlez-moi d'Alger*, 2002, *Loin de l'Ararat, les petites Arménies d'Europe et de Méditerranée*, 2007 (catalogues publiés par la RMN).

florence.pizzorni@wanadoo.fr

Comment explique-t-on le rapport symbolique qu'entretiennent les hommes avec leur environnement ?

Les hommes entretiennent un rapport inquiet et curieux à leur environnement naturel. Trouver des interprétations rationnelles à cet apparent chaos est leur continuel souci. Ils n'ont de cesse de classer leurs observations et d'inventer des systèmes cohérents qui leur permettent de se situer dans cet univers, en position centrale, et d'élaborer des représentations avec lesquelles ils peuvent mettre en jeu des « bricolages idéologiques »* interférents. Dans ce cadre, les éléments des « trois règnes » (végétal, animal, minéral) ainsi que la lecture des astres et des quatre éléments, composent un ensemble maîtrisable dont une habile pratique génère une « efficacité symbolique »*, recours indispensable pour l'apaisement des maux et la maîtrise des risques auxquels la fragile vie humaine est dramatiquement exposée.

Qu'en est-il alors du rapport aux minéraux ?

Parmi toutes les données naturelles, les minéraux, de par leurs caractéristiques physiques, jouent un rôle très particulier. Leurs couleurs et formes et surtout leur apparente inaltérabilité leur confèrent la puissance d'échapper au temps. Nous retrouvons de nombreux vestiges des systèmes interprétatifs des cultures populaires traditionnelles européennes dans nos manières de faire contemporaines transmises par tradition orale sans forcément comprendre, étant donné la déperdition de ces savoirs, leur raison d'être. Il existe un langage des pierres dites « précieuses » et des cristaux, comme il existe un langage des plantes.

Quelles sont les sources savantes sur lesquelles reposent ces systèmes interprétatifs ?

Ces systèmes reposent sur la transmission déformée, simplifiée et réduite des connaissances de la médecine hippocratique* combinées aux observations de Pline*. Les Almanachs, véritables vecteurs entre savoirs savants et populaires, ont diffusé l'image de « l'homme zodiacal ». Selon cette conception, il existerait des classes de correspondance entre les différentes parties du corps, les constellations (les signes du Zodiaque), les animaux, les végétaux (donc aussi les aliments) et les minéraux.

Selon cette construction symbolique, comment fonctionnent les vertus des pierres ?

Le mode opératoire fonctionne par analogie : les éléments d'une même classe de correspondance, bien que de nature différente, sont censés présenter des « ressemblances ». La combinaison de plusieurs éléments renforce le pouvoir d'action de la caractéristique de ressemblance. Ces pouvoirs se neutralisent ou s'inversent si les éléments sont de classes différentes. L'efficacité symbolique thérapeutique pour les minéraux est souvent le contact avec la partie du corps « à soigner », dans de plus rares cas l'absorption du cristal réduit en poudre ou de l'eau dans laquelle la pierre a bouilli. Dans ce système symbolique, les pierres sont alors supposées agir dans bien des domaines : thérapie, prophylaxie* et techniques divinatoires procèdent du même mode de compréhension du monde. Enfin, du fait de leur beauté, on en fait souvent des bijoux qui permettent d'allier élégance, symbolisme et « protection ».

Florence Pizzorni-Itié

LES MATHÉMATIQUES POUR EXPLIQUER LA FORME DES CRISTAUX

Facilement reconnaissables à leurs formes anguleuses, les cristaux restent longtemps un sujet mystérieux. Comment expliquer leurs formes si particulières ? Est-ce dû à un hasard ou ces propriétés macroscopiques ne seraient-elles que le fruit d'un ordonnancement particulier au niveau microscopique.

De l'observation au modèle géométrique

C'est au XVIII^e que Jean-Baptiste Romé de l'Isle publie son *Essai de Cristallographie* dans lequel il tente de classer les cristaux suivant des formes primitives. Il utilise notamment un goniomètre afin de mesurer précisément les angles entre les faces cristallines et observe la constance de ceux-ci pour un cristal donné.

René-Just Haüy suggère au début du XIX^e siècle que chaque type de cristal est constitué par une forme géométrique simple dont la répétition à l'échelle moléculaire est la cause de la constance de l'angle apparaissant dans le cristal brisé.

Au milieu du XIX^e siècle, le polytechnicien Auguste Bravais classe dans son mémoire précisément les arrangements élémentaires des structures cristallines à l'aide de la géométrie des symétries et rotations. Cette classification est toujours utilisée de nos jours.

Arrangement périodique microscopique

Nous savons aujourd'hui que la particularité des cristaux provient de l'arrangement spatial répétitif des atomes constitutifs. L'arrangement élémentaire du plus petit ensemble décrivant cette disposition est alors appelé une maille.

Des transformations géométriques de translation, rotation et symétrie appelées isométries* permettent alors de décrire la structure périodique du cristal que l'on appelle réseau (figure 1 et 3).

Cette maille élémentaire peut ainsi être représentée comme une combinaison de vecteurs* de bases (2 dans un plan et 3 dans l'espace).

L'image d'une maille d'un cristal donné est ainsi conservée à l'intérieur du réseau par un ensemble déterminé d'isométries.

Une contrainte physique supplémentaire permet également de montrer que les seules rotations possibles pour un cristal pur sont celles d'angles 180, 120, 90 ou 60 degrés.

La figure 1 montre ainsi une structure répétitive par l'application d'une rotation de 180 degrés suivi d'une translation.

L'aide des mathématiques pour dénombrer les différentes configurations

Les différentes transformations rigides que peut subir la maille élémentaire peuvent être combinées. Mathématiquement, cela revient à définir une structure particulière appelée groupe algébrique. Les opérations internes du groupe étant formées par des isométries de l'espace tridimensionnel.

Cette structure est connue en détail, et on peut montrer qu'il existe ainsi 230 groupes mathématiques possibles.

Notons également que les groupes sans considérations de translations sont au nombre de 32 et sont responsables de l'aspect des cristaux à l'échelle macroscopique. On les nomme classes cristallines.

À partir de ces 32 classes, on peut également définir 7 systèmes d'opérations de symétries ne modifiant pas le réseau. On les appelle alors les 7 systèmes cristallins caractéristiques de la maille élémentaire (figure 2). Les 32 classes cristallines étant alors obtenues par des symétries supplémentaires de ces 7 systèmes de bases.

En définissant ces formes de mailles élémentaires, il devient alors possible de remonter à toutes les formes possibles des cristaux purs par simple application de symétries.

Damien Rohmer

GLOSSAIRE

Isométrie

Transformation géométrique ne modifiant pas les longueurs.

Vecteur

Objet mathématique généralement représenté par une flèche reliant ici une position à une autre.

PORTRAIT DE L'AUTEUR

Damien Rohmer est doctorant au laboratoire de mathématiques appliquées-informatique Jean Kuntzmann de Grenoble. Sa thématique de recherche concerne la déformation de surfaces sous contraintes.

damien.rohmer@imag.fr

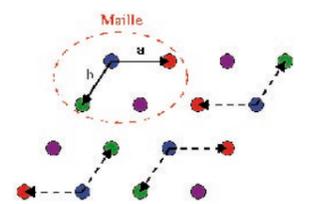


Figure 1 : Ordonnancement d'une maille dans un réseau plan. La maille, entourée en rouge, représente la forme élémentaire reliant les atomes. Les deux vecteurs de base décrivant la maille sont a et b. La répétition périodique de cette maille forme le réseau.

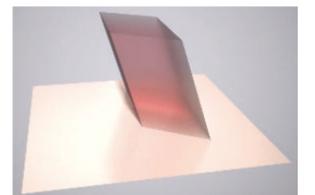


Figure 2 : Maille élémentaire de l'un des 7 systèmes cristallins. Le parallépipède à base oblique appelé maille triclinique est l'un des configurations la moins symétrique. La maille cubique étant la plus symétrique.

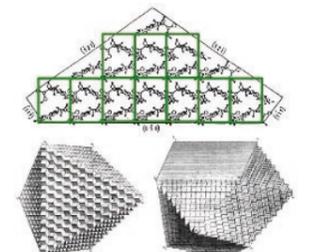


Figure 3 : Exemple de réseau formé par une maille élémentaire.

DES CRISTAUX POUR COMPRENDRE LA TERRE

La Terre nous dévoile ses mystères au fur et à mesure des avancées de la recherche scientifique. Les géosciences permettent d'aborder la « Terre interne » de nombreuses manières, à la fois différentes et complémentaires. C'est notamment de l'étude couplée des ondes sismiques et des cristaux qu'un modèle global de référence a pu être établi et affiné. La minéralogie expérimentale est aujourd'hui un domaine clé pour la compréhension fondamentale des mécanismes qui régissent la structure de notre planète.

GLOSSAIRE

Ondes S ou ondes secondaires

À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la Terre.

Phase

Un ou plusieurs corps pur ayant des propriétés différentes selon leur forme de cristallisation. Par exemple, le diamant et le graphite (mine du crayon) sont deux phases cristallines distinctes, formées uniquement par des atomes de carbones dont l'organisation entre eux diffère.

Géologie

Science qui étudie les gisements (ou gîtes) de minerais exploitables.

La structure interne du globe

C'est en 1981 qu'Adam Dziewonski et Don Anderson ont pour la première fois publié leurs résultats sur la vitesse de propagation des ondes sismiques à l'intérieur de la Terre (Modèle PREM, Figure 1). Cette vitesse dépend de la densité du matériau traversé et l'analyse des données a permis de mettre en évidence, outre l'augmentation régulière de la vitesse et donc de la densité, un certain nombre de discontinuités de la surface jusqu'au centre de la Terre.

Parmi les discontinuités majeures observées, nous pouvons noter celles qui sont situées à 410 km, 660 km, 2 900 km et 5 100 km de profondeur. Ces discontinuités traduisent le passage d'un matériau à un autre. La discontinuité la plus significative se situe à 2 900 km de profondeur et correspond à la transition Noyau-Manteau nommée discontinuité de Gutenberg. Une variation de densité suggère une modification brutale de la nature des matériaux : purement minérale dans le cas du manteau et métallique (essentiellement du fer) au sein du noyau. L'absence de propagation des ondes S* au niveau du noyau externe indique que ce dernier est liquide alors que le noyau interne, encore appelé graine, se trouve à l'état solide.

Compte tenu de la variété chimique, minéralogique et structurale des matériaux terrestres profonds, les outils minéralogiques deviennent donc indispensables à la

compréhension des propriétés physico-chimiques de ces matériaux et permettent ainsi d'affiner les modèles de la Terre.

Matériaux terrestres et extraterrestres témoins de la Terre interne

• **Péridotites : roches du manteau supérieur**
Par définition, la minéralogie de la Terre profonde n'est pas directement accessible à la surface du globe. Cependant, la géologie et la pétrologie ont permis d'observer en surface des roches de profondeur, n'ayant subies que des transformations mineures au cours de leur exhumation. C'est notamment le cas des péridotites, généralement observées au niveau d'anciennes zones de dorsale océanique. Ces roches sont constituées de pyroxènes en proportions variables, parfois de grenats mais surtout de cristaux d'olivine qui est de loin l'espèce minérale la plus abondante dans le manteau supérieur (Figure 2).

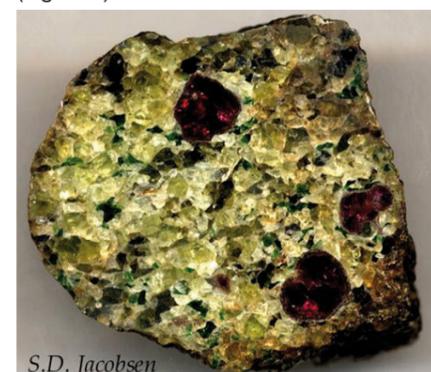


Figure 2 : Péridotite à grenats (rouges), pyroxènes (noirs) et cristaux d'olivine (vert).

• **Diamants : cristaux de grande profondeur**
Les diamants, constitués exclusivement de carbone, se forment à des conditions de pression et de température typiques du manteau supérieur, à environ 180 km de profondeur, mais peuvent également se former dans le manteau inférieur. Ainsi, ces minéraux ne peuvent atteindre la surface

que par le biais de mécanismes volcaniques puissants comme à Kimberley, Afrique du Sud (Figure 3), où ont été trouvés des diamants inclus dans la roche volcanique mère (« kimberlite »). Le diamant étant un minéral de grande profondeur, l'étude des cortèges d'inclusions minérales permet une approche directe de la minéralogie du manteau. Dans ces inclusions, on identifie généralement une minéralogie de péridotite typique du manteau supérieur. Mais une autre catégorie, moins abondante, révèle une minéralogie de plus grande profondeur, caractéristique du manteau inférieur, la pérovskite.

• Pallasites : météorites à l'« image » de l'interface noyau-manteau

Pour identifier la nature du matériau qui constitue le noyau terrestre et avoir une représentation possible des interactions « minéral-métal liquide » au niveau de la transition Noyau-Manteau, les météorites deviennent un outil de choix. En effet, grâce aux pallasites, elles peuvent permettre la compréhension des processus de formation et de différenciation de la Terre primitive il y a plus de 4 milliards d'années (Figure 4). La pallasite est une roche constituée de cristaux centimétriques d'olivine contenus dans un d'alliage métallique fer-nickel et provient vraisemblablement de fragments d'astéroïdes différenciés. Les pallasites confortent donc largement la présence d'un tel alliage métallique au sein du noyau terrestre.

La minéralogie expérimentale comme outil de la structure de la Terre

La minéralogie expérimentale, quant à elle, permet d'explorer des domaines inaccessibles de manière directe et confirmer par exemple les mesures de sismologie concernant les profondeurs des discontinuités. En particulier, le système de cellule à enclumes de diamant (Figure 5) permet de générer des conditions allant du manteau supérieur à la graine ; la pression étant réalisée par la compression de l'échantillon entre deux diamants, et la température par chauffage laser de l'échantillon à travers les diamants transparents. Par ailleurs, ce système est adapté aux mesures cristallographiques par diffraction de rayons X, ce qui permet de suivre l'évolution des structures induites par la pression et la température. De telles

expériences réalisées sur des cristaux d'olivine ont permis d'interpréter les discontinuités observées sur le modèle PREM (Figure 1) : à 410 km, passage de l'olivine (phase α) vers une phase β plus dense (wadsleyite) ; à 660 km, passage du manteau supérieur au manteau inférieur, marqué par une décomposition de la phase γ (ringwoodite) en pérovskite et magnésio-wüstite. Plus profond, des expériences récentes ont montré la présence possible de post-pérovskite au niveau de la transition Noyau-Manteau, et la courbe de fusion du fer à très haute pression a pu être établie pour la validation de l'interface « noyau externe - graine ».

Conclusion

De tous temps, les cristaux fascinent les civilisations de part leur esthétique, leur richesse minérale ou leur intérêt géologique*. Ce n'est que très récemment que la cristallographie s'est révélée être un outil précieux pour des approches d'abord naturalistes, puis plus géologiques. Aujourd'hui, les cristaux sont des objets d'une grande richesse scientifique et leur étude, mettant souvent en jeu les technologies les plus avancées, sont d'un intérêt crucial pour la compréhension de la géosphère et des mécanismes géologiques complexes.

Manuel Muñoz et Jean-Paul Itié

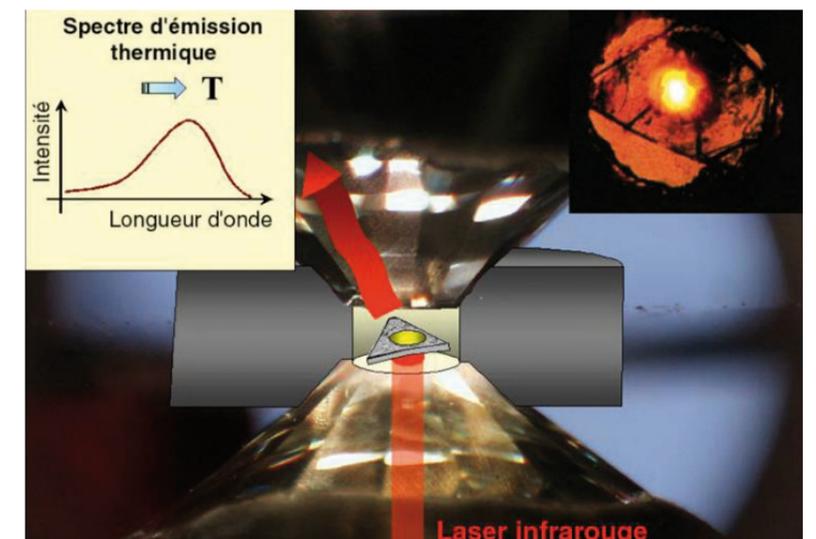


Figure 5 : Vue en coupe d'une cellule à enclumes de diamant (d'après Guillaume Fiquet, IMPMC, Université Paris VI).

PORTRAIT DES AUTEURS

Manuel Muñoz est Maître de conférences à l'Université Joseph Fourier. Il axe sa recherche vers les domaines de la minéralogie expérimentale et l'étude d'objets naturels. Le rayonnement synchrotron constitue un outil de prédilection dans son approche de la minéralogie.

manuel.munoz@ujf-grenoble.fr

Jean-Paul Itié est Directeur de Recherche au CNRS et effectue sa recherche au synchrotron SOLEIL où il est responsable de la ligne de diffraction sous conditions extrêmes.

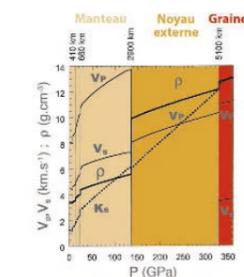
jean-paul.itie@synchrotron-soleil.fr



Figure 3 : Big Hole à Kimberley (Afrique du Sud)

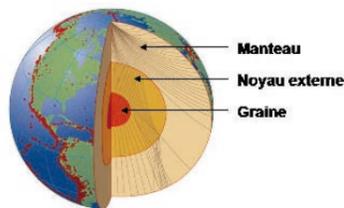


Figure 4 : Météorite (pallasite) constituée de cristaux d'olivine dans une matrice de fer-nickel métallique.



V : Vitesse des ondes de propagation
P : Pression
ρ : Masse volumique

Figure 1 : Modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model).



LES DÉBUTS DE LA CRISTALLOGRAPHIE AUX RAYONS X

Les rayons X sont aujourd'hui un outil de choix pour l'étude de la structure des cristaux. De la découverte fortuite de ce rayonnement aux premières résolutions de structures cristallines par diffraction des rayons X, retour sur vingt années (1895 -1915) d'idées, d'expérimentations et de prix Nobel.

GLOSSAIRE

Rayonnement cathodique

C'est ainsi que l'on appelait les décharges électriques produites en appliquant un champ électrique dans une chambre contenant du gaz sous faible pression.

Double réfraction

Phénomène observé lorsqu'un rayon lumineux traverse un milieu dit biréfringent : le rayon est divisé en deux.

Interférence

Phénomène observé lorsque deux ondes (ou plus) de même fréquence se rencontrent et interagissent entre elles.

PORTRAIT DE L'AUTEUR

René Guinebretière est professeur à l'École Nationale Supérieure de Céramique Industrielle (ENSCI) de Limoges et chercheur au sein du laboratoire « Sciences des procédés céramiques et traitements de surfaces » (SPCTS, UMR CNRS 6638). Il développe une activité de recherche centrée sur l'élaboration de matériaux oxydes nanostructurés et sur la caractérisation quantitative de la microstructure de ces matériaux par diffraction des rayons X.

rene.guinebretiere@unilim.fr

Découverte des rayons X, prix Nobel de Röntgen (1901)

Le 8 novembre 1895, à Würzburg, alors qu'il étudie le « rayonnement cathodique* » produit par un tube de Crookes, le physicien Wilhelm Conrad Röntgen observe une lueur sur une plaque photographique située relativement loin du tube. Cette lueur ne peut pas être due directement au rayonnement cathodique qui ne se propage dans l'air que sur de très courtes distances, celui-ci a donc produit l'émission d'un autre rayonnement.

Röntgen cherche à comprendre la nature de ce rayonnement inconnu. Il interpose entre le tube de Crookes et la plaque photographique différents objets et constate que ces rayons traversent la matière solide ! L'incroyable survient alors lorsque par inadvertance sa main traverse le faisceau formé par ces étranges rayons. Incrédule, Röntgen observe sur la plaque photographique l'image des os de sa main... Cette première observation des os dans un corps vivant bouleverse le monde de cette fin du XIX^e siècle : les rayons de Röntgen permettent de voir le squelette des hommes vivants.

Röntgen est persuadé que ces rayons présentent des analogies avec la lumière visible mais malgré ses efforts il ne parvient pas à cerner leur nature. De guerre lasse, il les baptise « Rayons X » et publie ses résultats le 28 décembre 1895. En 1901, il obtient, pour la découverte des rayons X, le premier prix Nobel de physique.

Les années qui suivent sont celles d'un travail acharné pour comprendre la nature des rayons X. Les scientifiques notamment allemands sont persuadés qu'il s'agit d'une onde. Les travaux de Röntgen montrent déjà que ce rayonnement qui traverse la matière solide possède une énergie élevée et donc une longueur d'onde très courte. Il faudra 17 ans plus tard l'intuition de Max Laue et Paul Ewald pour comprendre toute la puissance de cette caractéristique dans l'analyse de la structure interne des cristaux.

Première expérience de diffraction des rayons X par des cristaux : prix Nobel de Laue (1914)

En 1912, Ewald termine sa thèse de physique théorique sur la double réfraction* de la lumière par certains cristaux. Il discute de ses résultats avec Laue, professeur spécialiste d'optique théorique. Bien que peu au fait des hypothèses d'alors sur la constitution interne des cristaux, Laue pose deux questions décisives à Ewald : quelle est la distance typique entre les dipôles au sein d'un cristal ? Que se passerait-il si la longueur d'onde du faisceau éclairant le cristal était du même ordre de grandeur que cette distance ? De ces questions restées sans réponses est née l'idée d'une expérience décisive dans l'esprit de M. Laue qui comprend que l'irradiation par des rayons X d'un cristal doit donner lieu à un phénomène d'interférence* des ondes diffusées par les atomes de ce cristal.

Laue expose son idée à W. Friedrich alors assistant de Sommerfeld. Avec P. Knipping, qui termine sa thèse dans le laboratoire de Röntgen, Friedrich construit un appareil susceptible de valider l'idée de Laue. Le 12 avril 1912, ils irradient un cristal de sulfate de cuivre et observent sur le film photographique placé derrière, des spots que Laue interprète comme étant dus à la diffraction des rayons X par le réseau périodique formé par les atomes présents au sein du cristal. Laue obtient en 1914 le prix Nobel de physique pour la découverte de la diffraction des rayons X par les cristaux.

Cette expérience, menée dans un laboratoire de physique théorique, d'une part prouve le caractère ondulatoire des rayons X et donne un moyen direct pour évaluer leur longueur d'onde et d'autre part ouvre la possibilité extraordinaire de déterminer l'organisation atomique au sein des cristaux. Là commence un autre champ de l'histoire qui va être exploré par W.H. Bragg et son fils W.L. Bragg.

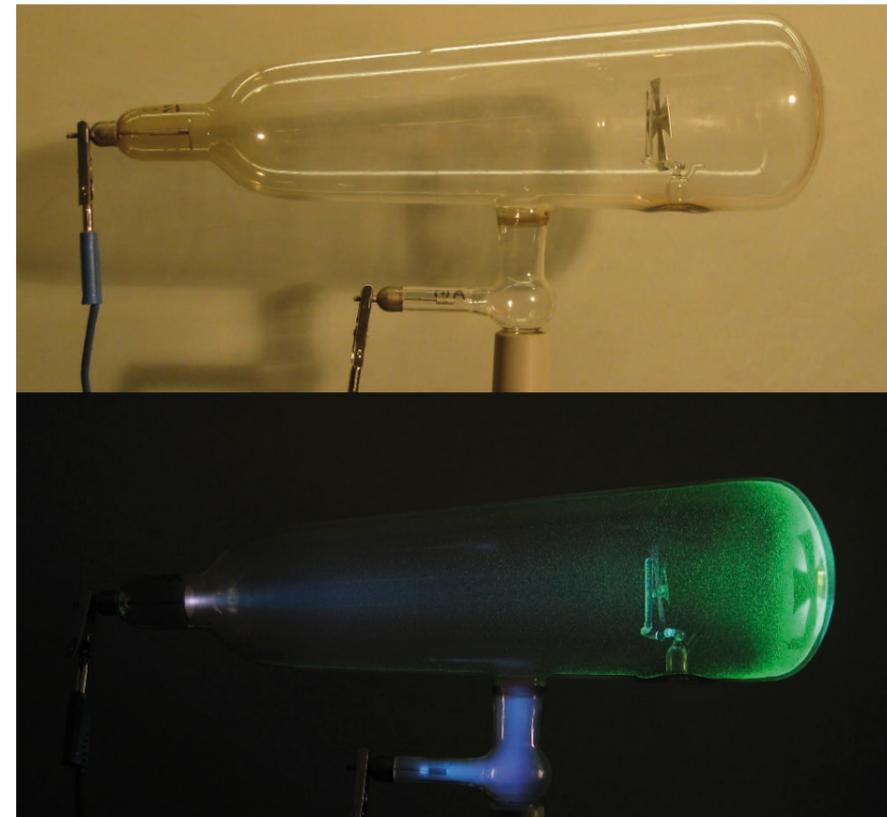


Figure 1 : un tube de Crookes, éteint (en haut) et éclairé par sa propre fluorescence (en bas).

Vers la structure interne des cristaux : prix Nobel de W.H. et W.L. Bragg (1915)

Depuis la découverte des rayons X par Röntgen, W.H. Bragg, professeur de physique à Leeds en Angleterre, est persuadé que les rayons X sont des particules analogues aux électrons, mais ne portant pas de charge électrique. Lorsqu'il prend connaissance des résultats de Laue sur la diffraction des rayons X par les cristaux, il comprend que ceux-ci confortent le caractère ondulatoire des rayons X. Durant l'été 1912, W.L. Bragg, fils de W.H. Bragg et alors âgé de 22 ans, analyse de façon détaillée les résultats de Laue et montre que l'on pourrait les interpréter comme correspondant à la réflexion de particules sur des plans atomiques denses parallèles entre eux formés par les atomes au sein du cristal diffractant. Cette interprétation, bien que basée sur un concept erroné, conduit W.L. Bragg à formuler une des lois fondamentales de la diffraction des rayons X : $\lambda = 2d \sin \alpha$. En reliant la longueur d'onde du faisceau de rayons X à la distance inter-réticulaire au sein du cristal diffractant, cette loi montre que la mesure de la direction du faisceau diffracté permet d'accéder

directement à l'arrangement des plans d'atomes à l'intérieur du cristal.

Dès 1912, les Bragg construisent un nouveau diffractomètre à rayons X. Une source irradie selon un angle connu la surface d'un monocristal clivé et un détecteur orienté selon un angle égal à l'angle d'incidence enregistre l'intensité du faisceau diffracté. Ce diffractomètre équipé d'un détecteur à gaz permet une mesure directe de l'intensité diffractée en fonction de l'angle de diffraction. Les mois et quelques années qui suivent sont alors celles d'une production scientifique prolifique. W.H. et W.L. Bragg réalisent de nombreuses mesures avec leur diffractomètre et déterminent la structure de nombreux cristaux. La diffraction des rayons X passe du statut de phénomène physique à celui d'outil d'exploration de l'organisation inter-atomique au sein des cristaux.

W.H. et W.L. Bragg obtiennent le prix Nobel de physique en 1915. Leurs travaux ouvrent la porte de l'analyse structurale aux chimistes et plus tard aux biologistes. En 1953, ce seront des élèves de W.L. Bragg qui détermineront par diffraction des rayons X la structure en double d'hélice de l'ADN.

René Guinebretière



Figure 2 : portrait de Wilhelm Conrad Röntgen.



Figure 3 : un des premiers clichés aux rayons X pris par Röntgen en 1896.

CRISTAL DE ROCHE

Le quartz, ou cristal de roche, est un des cristaux les plus fréquents des Alpes. Il a été utilisé dès la Préhistoire pour la fabrication de pointes de flèches, puis ensuite pour la taille d'objets d'art. Il a été un des premiers minéraux étudiés lors de la naissance de la cristallographie. Grâce à ses propriétés physiques et aux progrès de l'électronique, le cristal de quartz est maintenant utilisé pour toutes les mesures précises du temps.

GLOSSAIRE

Cabinet de curiosités

C'était une pièce où, à partir de la Renaissance, un amateur (fortuné) rassemblait une collection d'objets historiques, artistiques ou d'histoire naturelle. Ce sont les précurseurs des musées modernes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Cesbron F. et al. (2000), *Quartz et autres minéraux de la silice*, Revue Minéraux et Fossiles, Paris, Hors Série N° 11 (disponible : BU Sciences - UJF).

[2] Cordier P., Leroux H. (2008), *Ce que disent les minéraux*, Paris, Belin.

PORTRAIT DE L'AUTEUR

Gérard Dolino est directeur de recherche (CNRS) au Laboratoire de Spectrométrie Physique de l'Université Joseph Fourier. Il s'intéresse aux propriétés physiques des cristaux de quartz et aux structures particulières de certains cristaux des Alpes.

dolino@spectro.ujf-grenoble.fr



Cristal de quartz de l'Oisans

Objet de collection

Le quartz (ou dioxyde de silicium) est un des constituants majeurs de diverses roches de l'écorce terrestre (granite, grès, sable). Mais il est surtout connu pour sa croissance sous la forme de cristaux transparents de forme hexagonale se terminant par une pyramide à six faces : c'est le fameux cristal de roche, qui a fait la renommée de la mine de La Gardette, au dessus de Bourg d'Oisans (voir figure).

À partir du Moyen-âge, de nombreux objets religieux puis des œuvres d'art ont été fabriqués à partir de gros cristaux de quartz des Alpes. Ces œuvres ainsi que les plus beaux échantillons naturels des cabinets de curiosités* du XVIII^e siècle se retrouvent maintenant dans les musées.

Une structure en forme d'hélice

En raison de sa présence fréquente et de ses formes caractéristiques, le cristal de roche est un des premiers cristaux étudiés par les savants au cours du XVIII^e siècle, avant le développement de la science des cristaux ou cristallographie par l'abbé René-Just Haüy à la fin de ce siècle. Les propriétés physiques du quartz ont ensuite été très étudiées : en 1811, Arago

a découvert la rotation du plan de vibration de la lumière se propageant dans le quartz. Cette propriété est due à l'arrangement hélicoïdal des atomes dans le cristal de quartz, déterminé en 1925 par l'utilisation des rayons X.

De la piézoélectricité à la détection des sous-marins

Mais la découverte qui a eu le plus de conséquences est celle de la piézoélectricité par Jacques et Pierre Curie en 1880 : ce phénomène est l'apparition dans certains cristaux (dont le quartz) d'une charge électrique proportionnelle aux déformations produites par des forces extérieures. Cet effet n'intéressa d'abord que les physiciens : il servit en particulier aux premières mesures quantitatives de la radioactivité de Marie et Pierre Curie à partir de 1898.

C'est Paul Langevin qui, en 1917, eut l'idée d'utiliser l'effet piézoélectrique du quartz pour détecter les sous-marins allemands, en générant des ondes acoustiques dans l'eau. Cette invention est à l'origine des nombreuses applications des ultrasons (par exemple pour l'échographie médicale). L'utilisation des vibrations piézoélectriques du quartz est aussi à la base des procédés modernes de mesure du temps. L'extension de ces nombreuses applications n'a été rendue possible que par la mise au point de procédés de production industrielle du quartz. Ce sont maintenant de petits cristaux de quartz de synthèse qui assurent le fonctionnement précis des montres à quartz, des ordinateurs et des téléphones portables.

C'est ainsi que le cristal naturel le plus anciennement connus des hommes a trouvé une nouvelle place au cœur de la civilisation moderne.

Gérard Dolino

LES CRISTAUX JOUENT AVEC LA LUMIÈRE

Un cristal est un solide constitué d'un certain nombre d'éléments (atomes, molécules ou ions) dont l'empilement à l'échelle microscopique est régulier et périodique, à l'image d'un mur de « briques » formant des motifs répétitifs. Les cristaux se forment progressivement soit en milieu naturel soit en laboratoire. Ils peuvent absorber, produire ou dédoubler la lumière, être transparents, colorés, ou même noirs (Figure 1).



Figure 1 : Cristal transparent, coloré et de couleur noire.

Produire de la lumière : de la luminescence au LASER

Si la luminescence des lucioles et des diodes (éclairage « LED » des guirlandes) est célèbre, celle des cristaux est moins connue. Un cristal est luminescent s'il contient un lanthanide dans sa composition car c'est un élément naturellement luminescent. Si un cristal luminescent est inséré entre deux miroirs, sa luminescence peut faire des allers-retours dans le cristal après plusieurs réflexions sur les miroirs. Elle est alors canalisée et devient une Lumière Amplifiée par Stimulation d'Emission de Rayonnements (LASER) d'où le nom de source laser. L'émission LASER se propage selon une direction particulière et son énergie est bien plus importante que celle d'une lampe à incandescence. Son spectre (gamme de longueurs d'ondes constituant la lumière LASER) est plus étroit et peut être même composé d'une seule longueur d'onde.

Dédoubler des images

Dans un cristal dit biréfringent, l'arrangement des atomes n'est pas identique selon toutes les directions de l'espace. Un cristal biréfringent taillé sous la forme d'un cube épais, poli sur deux faces opposées dont l'une d'entre elles est posée sur un texte

donnera une image dédoublée (Figure 2). Si un cristal biréfringent tourne dans le plan du texte, une des deux images ne bouge pas : elle est dite ordinaire. La position de l'autre image, dite extraordinaire, change avec l'orientation du cristal. Un cristal biréfringent peut être utilisé pour fabriquer un polariseur qui permet d'imposer une direction d'oscillation de la lumière ; ce principe est aussi utilisé par les lunettes de soleil et en photographie.

Changer la couleur de la lumière

Certains cristaux biréfringents dits non linéaires peuvent changer la longueur d'onde d'un faisceau LASER incident si son énergie est intense et concentrée. Cette transformation dépend de l'orientation du cristal car elle utilise sa biréfringence. Certaines orientations du cristal permettent de diviser la longueur d'onde d'une source laser par deux ou par trois. Une source laser qui émet une longueur d'onde égale à 1064 nm est invisible à l'œil nu, mais son émission peut devenir verte (532 nm) ou bleue (354 nm) s'il traverse un cristal non linéaire.

L'association de cristaux non linéaires avec des sources LASER a permis d'étendre considérablement leur domaine d'émission au-delà du domaine visible. Ces progrès ont permis le développement d'applications comme les télécommunications ou la télémétrie.

Patricia Segonds

GLOSSAIRE

Onde

Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible de propriétés physiques locales. Elle transporte de l'énergie sans transporter de matière. La lumière est constituée d'ondes dites électromagnétiques qui oscillent et se propagent de la même façon que l'onde observée à la surface de l'eau suite à la chute d'un objet.

Longueur d'onde

C'est la distance parcourue par la lumière pendant sa période d'oscillation (distance entre 2 sommets successifs de l'oscillation d'une onde). Son symbole est λ et son unité le nanomètre (10^{-9} mètre).

Lumière visible

La sensibilité de l'œil humain se situe entre 400 à 780 nanomètres, ce domaine correspond aux couleurs du visible.

PORTRAIT DE L'AUTEUR

Patricia Segonds est Maître de conférences à l'UFR de physique de l'Université Joseph Fourier et chercheuse au département Matière Condensée, Matériaux et Fonctions de l'Institut Néel. Ses thématiques de recherche impliquent la caractérisation des propriétés optiques de cristaux biréfringents, LASER et non linéaires. Pour cela, elle développe des techniques couplées à des LASER.

patricia.segonds@grenoble.cnrs.fr



Figure 2 : Dédoublage d'une image par un cristal biréfringent.

CRISTALLISER LES PROTÉINES POUR LES OBSERVER EN TROIS DIMENSIONS

Les protéines sont les « micromachines » essentielles de l'organisme. Obtenir l'organisation structurale en trois dimensions des protéines permet de mieux comprendre leur fonctionnement et ouvre des perspectives uniques pour concevoir de nouveaux médicaments. La cristallisation des protéines est une étape-clé pour établir cette vision tridimensionnelle.

GLOSSAIRE

Nanomètre

il y a un milliard de nanomètres (nm) dans un mètre. Le nm est utilisé pour mesurer les longueurs d'ondes comprises entre l'infrarouge et l'ultraviolet.

Biocristallographie

Cristallographie des macromolécules biologiques aux rayons X.

Maurits Cornelis Escher

Artiste néerlandais (1898 - 1972) qui a séduit de nombreux mathématiciens auxquels il se défendait d'appartenir.

Synchrotron

Gros accélérateur de particules produisant un rayonnement de haute énergie.

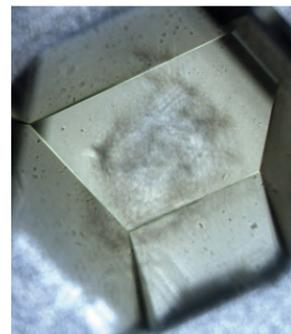
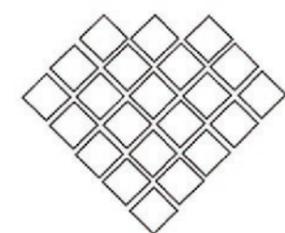
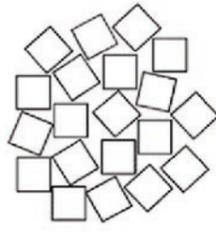


Figure 1 : Cristal de l'urate oxydase.



Cristal



Agglomérat



"Vers le Cristal"

Figure 2 : Représentation schématique de l'agencement des sous-unités dans un cristal et dans un agglomérat

De minuscules « bonnes à tout faire »

Les protéines (de *proteios*, premier) sont les molécules organiques les plus abondantes des êtres vivants et sont responsables de la totalité des activités cellulaires. Les enzymes qui catalysent les réactions chimiques par exemple sont presque toutes des protéines. On conçoit donc l'importance considérable de ces « bonnes à tout faire » dont les propriétés ont laissé croire pendant des siècles à une mystérieuse force vitale.

Les protéines sont des macromolécules enroulées en pelote de quelques nanomètres*, constituées de plusieurs dizaines ou centaines d'unités élémentaires, les acides aminés. Comme les liaisons entre acides aminés permettent leur rotation relative, la chaîne peut en théorie adopter une infinité de conformations différentes. Or, les lois physicochimiques font qu'une seule conformation est la plus favorable énergétiquement. La chaîne d'acides aminés se replie donc spontanément de façon à adopter cette conformation stable constituant ainsi la structure tridimensionnelle responsable de la fonction particulière de la protéine : par exemple une protéine pourra se fixer spécifiquement à d'autres molécules et permettre leur transformation chimique.

Un outil révolutionnaire

La structure de milliers de protéines a été établie au cours des dernières années et on en publie tous les jours de nouvelles. En dépit de cette somme de données et malgré la puissance des programmes d'ordinateur, on reste incapable de prévoir la structure tridimensionnelle d'une protéine à partir de sa séquence en acides aminés. Or, c'est la structure spatiale de la molécule qui a le plus d'intérêt puisqu'elle est responsable de ses propriétés.

Mais comment « voir » des molécules qui mesurent quelques nanomètres ?

C'est la convergence de travaux en physique, chimie et biologie qui a rendu possible cet exploit au travers d'un outil indispensable pour élucider la structure des macromolécules, la biocristallographie*.

La naissance d'un cristal

Trop minuscule pour être analysée individuellement, la protéine est étudiée sous forme de cristal (Figure 1), c'est à dire un empilement de milliers de milliards d'une même protéine dans un arrangement spatial très ordonné. Un cristal correspond à la protéine en format « géant ».

Les protéines sont solubles dans l'eau, pour obtenir une structure cristalline il faut réduire leur solubilité pour permettre la formation des germes cristallins (nucléation). La nucléation des cristaux peut être obtenue en laissant la protéine devenir sursaturée dans un solvant.

Petit cristal deviendra grand

Si un noyau de cristallisation est présent, il peut permettre la croissance d'un gros cristal, qui consiste en la répétition ordonnée dans l'espace d'une structure particulière. Dans la figure 2, l'agencement régulier des sous-unités donne une apparence



Figure 3a : Polygone Scientifique de Grenoble avec l'anneau synchrotron ESRF.

cristalline à la première structure. Dans le second cas, l'empilement est désordonné et non-répétitif ; ce n'est pas un cristal. Dans le dessin de Maurits Cornelis Escher*, à droite, on voit un personnage dévaler un escalier jusqu'à ce que la répétition ordonnée de son image donne une allure cristalline. Le personnage au bas des marches a en quelque sorte servi de noyau de cristallisation.

Un cristal de protéines contient environ 50% de solvant réparti dans les interstices entre les molécules et tient ensemble par le biais de forces hydrophobes, de ponts hydrogènes et salins (contrairement à un cristal minéral qui utilise surtout les liens ioniques). La solidité d'un tel cristal est donc plus proche de celle d'un cube de gélée sec que d'un diamant. Ainsi, un gros challenge dans la cristallisation des protéines reste l'obtention de cristaux de taille suffisante. Une méthode efficace pour obtenir de tels cristaux est de produire une solution métastable (faiblement sursaturée) : par exemple on chauffe le solvant, on y dissout le maximum de protéine et ensuite on laisse la solution refroidir le plus lentement possible. L'ajout d'un germe de cristal à une solution métastable entraîne la croissance de

celui-ci jusqu'à l'obtention éventuelle d'un gros cristal de bonne qualité [1].

Faire « parler » le cristal

Le synchrotron* permet d'envoyer un faisceau lumineux sur le cristal une fois celui-ci obtenu (Figure 3a). Les rayons le traversent et sont déviés par les atomes des molécules cristallisées. C'est le principe de diffraction. Pour que la diffraction soit exploitable, la longueur d'onde de la lumière envoyée sur le cristal doit être du même ordre de grandeur que la taille des atomes. On utilise donc les rayons X dont la longueur d'onde est de l'ordre du dixième de nanomètre. Les données obtenues constituent une image parsemée de points, correspondant aux déviations des rayons X par le cristal : c'est le cliché de diffraction (Figure 3b). En changeant l'angle de frappe du rayon lumineux afin d'échantillonner toutes les orientations du cristal, puis à l'aide d'outils mathématiques, on détermine la structure tridimensionnelle de la protéine.

L'ordinateur permet de dessiner de magnifiques modèles moléculaires en couleurs (Figure 3c) que l'on manipule pour observer la protéine sous toutes les coutures. En examinant son architecture spatiale à l'échelle atomique, on établit la manière dont elle interagit. Ces connaissances sont indispensables pour comprendre son rôle dans un organisme, l'origine de certaines maladies ou concevoir de nouveaux médicaments. En ciblant les structures protéiques portant un intérêt particulier le « design » moléculaire permettra la création de toutes pièces de molécules nouvelles dont les propriétés sont prévisibles. Les industriels de la pharmacie ont de plus en plus recours à ce type de méthodes pour élaborer les médicaments de demain.

Monika Budayova-Spano

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] M. Budayova-Spano, F. Dauvergne, M. Audiffren, T. Bactivelane and S. Cusack, *A methodology and an instrument for the temperature-controlled optimization of crystal growth*, Acta Cryst. D63, 2007, 339-347.

PORTRAIT DE L'AUTEUR

Monika Budayova-Spano est Maître de conférences en Physique à la Faculté de Pharmacie à l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Elle est chercheuse au sein de l'unité mixte de recherche UJF-EMBL-CNRS à l'UVHCI (Unit of Virus Host-Cell Interactions) et collaboratrice scientifique au réacteur nucléaire de l'ILL (Institut Laue Langevin) à Grenoble. Après une thèse en croissance cristalline des protéines en solution, elle poursuit ses recherches dans le domaine de la biophysique structurale.

spano@embl-grenoble.fr

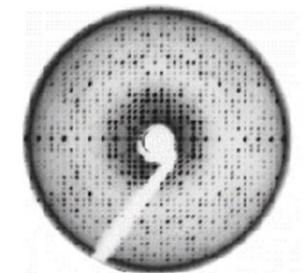


Figure 3b : Cliché de diffraction.

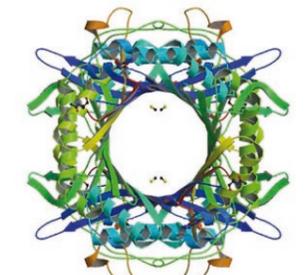


Figure 3c : Modèle moléculaire du tétramère (quatre molécules représentées par différentes couleurs) de l'assemblage de quatre molécules de l'urate oxydase montrant la formation d'un tunnel.



Exposition « Voyage dans le cristal », du 25 avril au 27 septembre 2009, Palais du Parlement du Dauphiné à Grenoble, Place St André, entrée libre du mercredi au dimanche entre 13h et 18h, fermé le 1^{er} mai.

Ce « Voyage dans le cristal » vous fera découvrir les interrogations qu'il suscite, les démarches scientifiques qu'il provoqua et son importance dans notre vie quotidienne. Il s'adresse à un large public : grand public, scolaires avec des ateliers pédagogiques et scientifiques.

Cette exposition se décline suivant 3 espaces :

- L'émerveillement : le cristal, objet d'émerveillement de symboles et d'observation
- Le questionnement, la naissance d'une science : le cristal, objet de questionnement, de déduction, de science
- La recherche et le rêve : les cristaux « cultivés » au quotidien par les scientifiques, les surprises et le futur.

Cette exposition est le fruit d'une collaboration entre le Museum d'Histoire Naturelle de Grenoble et l'association Française de cristallographie. Elle bénéficie du parrainage de l'Académie des Sciences et du label de l'année mondiale « Planète - Terre ».

Contacts : Martine Amram, communication Muséum d'histoire Naturelle de Grenoble, martine.amram@ville-grenoble.fr, 04 76 44 95 47 ; Jean-Louis Hodeau, Directeur de recherche CNRS, Institut Neel, hodeau@grenoble.cnrs.fr, 04 76 88 11 42 ; voyagecristal@grenoble.cnrs.fr

Pour en savoir plus sur les conférences, ateliers et animations :

www.museum-grenoble.fr
<http://neel.cnrs.fr>

▶ À VOS CLAVIERS !

Si vous travaillez sur le thème du prochain numéro et que vous appartenez à une des 5 universités de Grenoble ou Chambéry, vous pouvez soumettre votre sujet au comité éditorial. Il s'agit d'écrire un article de vulgarisation à destination d'étudiants en licence, toutes filières confondues. Il doit par conséquent comporter une introduction claire cadrant le sujet, et le développement comprendra très peu d'équations et de termes scientifiques trop spécialisés. Ces derniers devront être définis dans un glossaire et le texte devra être accompagné d'illustrations.

Vous pouvez également suggérer un/des thèmes qu'il vous semblerait opportun d'être abordé dans *VISIONS CROISÉES*.

Prochains thèmes :

- Le patrimoine : le prochain numéro sera l'occasion de parler du patrimoine sous différents angles ; génétique, social, informatique, culturel, géographique...
- Le hasard / l'aléatoire : rôle du hasard dans les découvertes, dans le domaine artistique, lors de la rencontre de molécules dans les processus réactionnel en biologie ou chimie...
- L'invisible : liens invisibles influençant le quotidien, description d'éléments invisibles à l'oeil nu (cellules vivantes, micro-organismes, liens sociaux...), des outils permettant de les visualiser...

N'hésitez pas à envoyer vos propositions d'article à l'adresse électronique suivante :

visionscroisees@grenoble-universites.fr

Les consignes de rédaction sont consultables à l'adresse suivante :

www.grenoble-universites.fr/visionscroisees



agenda

Du 25 avril au 27 septembre 2009

Exposition « Voyage dans le Cristal » (voir ci-contre).

Jusqu'au 31 octobre 2009, tous les jours de 14h à 18h sauf le mardi

Le Musée des Minéraux et de la Faune des Alpes accueille l'exposition temporaire « Oisans mémoire des Alpes »,

place de l'église à Bourg d'Oisans (38). Le musée présente un ensemble unique de collections minéralogiques de la région.

www.musee-bourgdoisans.com

Jusqu'au 31 décembre 2009, toute la semaine de 14h à 19h

A la découverte des minéraux des Alpes ?, musée des Cristaux de Chamonix, Espace Tairraz. La scénographie du musée des Cristaux offre un parcours pour expliquer de façon complète les cristaux de quartz et présente également une mise en scène des minéraux.

www.chamonix-mont-blanc.fr/animationculture/site_museecristaux/accueil.html

Jusqu'au 31 décembre 2009

Cycle de conférences « Plus haut, Plus beau ! », dans le cadre de l'Année mondiale de l'Astronomie 2009 (AMA09), le club d'astronomie de St Martin d'Hères et l'Observatoire organisent un cycle de conférences scientifiques tout public.

www.obs.ujf-grenoble.fr/osug/content/view/256/161/

VISIONS CROISÉES

Visions Croisées est édité par le CIES de l'Académie de Grenoble, 701 rue de la Piscine, BP 81, 38402 St-Martin d'Hères cedex, 04 76 82 76 90

Directeur de la publication : Didier Retour, Directeur du CIES

Responsable de la rédaction : Isabelle Le Brun, tutrice de l'atelier

Comité de rédaction : Antoine Chareyre, Rémi Colliat, Damien Goutte-Gattat, Pascal Guillo, Sahar Hassan, Ion Iturbe, Michael Lienhardt, Edwige Moyroud, Mathieu Pierre, Ludovic Ravanel, Damien Rohmer, Yan Suffren et Pauline Vachaud

Contact :
visionscroisees@grenoble-universites.fr

Impression : Coquand la Typo

Création graphique : Arrimage

Mise en page : Service communication de Grenoble Universités

Crédits photos : Carion minéraux, D-Kuru, Grenoble Communication, Grenoble Universités, IUCr journals, Jacobsen, Museum d'histoire naturelle de Grenoble / Jean-Lou Balat, Garybembridge

Nombre d'exemplaires : 10 000

N°ISSN : 1964-4671

www.grenoble-universites.fr/visionscroisees