



Organisation  
des Nations Unies  
pour l'éducation,  
la science et la culture



Union internationale  
de la cristallographie



Partenaires de l'Année internationale de la cristallographie 2014

# Cristallographie et applications: aux confins de la matière



Année internationale de la cristallographie 2014





Publié par l'Organisation des Nations Unies  
pour l'éducation, la science et la culture  
7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France

© UNESCO 2013  
Tous droits réservés

Titre original : Crystallography matters!

Coordinateur/éditeur : Susan Schneegans

Photos de première de couverture : Avion © Shutterstock/IM\_photo / Scientifique en Afrique © FAO  
Photo de quatrième de couverture : Jeune famille regardant la télévision © Shutterstock/Andrey\_Popov

Composé et imprimé  
dans les ateliers de l'UNESCO

Imprimeur certifié Imprim'Vert®, initiative écologique  
des industries graphiques françaises.

*Imprimé en France*

SC-2013/WS/9

# Qu'est-ce que la cristallographie ?

Les cristaux sont présents un peu partout dans la nature. Ils sont particulièrement abondants dans les formations rocheuses telles que les minéraux (pierres précieuses, graphite, etc.) mais ils peuvent également être trouvés en d'autres lieux, comme par exemple les flocons de neige, la glace et les grains de sel. Depuis les temps anciens, les érudits ont été intrigués par la beauté des cristaux, leur forme symétrique ainsi que leur variété de couleurs. Ces premiers cristallographes se servaient de la géométrie pour étudier la forme des cristaux dans le monde naturel.

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, il a été montré que les rayons X pouvaient être utilisés pour « observer » la structure de la matière sans toutefois la perturber. Ceci marque l'aurore de la cristallographie moderne. En effet, les rayons X ont été découverts en 1895. Ce sont des faisceaux de lumière qui ne sont pas visibles par l'œil humain. Lorsque les rayons X traversent un objet, ils sont diffusés par les atomes de ce dernier. Les cristallographes ont découvert que, comme c'est le cas pour les cristaux, les arrangements réguliers d'atomes diffractent les rayons dans seulement quelques directions spécifiques. À l'aide des mesures de directions et d'intensités des rayons diffractés, les scientifiques furent capables de produire les premières représentations tridimensionnelles des structures atomiques des cristaux. On a alors compris que les cristaux étaient des cibles idéales dans l'étude de la structure de la matière à l'échelle atomique ou moléculaire, sur la base de trois caractéristiques communes : ce sont des solides tridimensionnels, construits à partir d'atomes régulièrement disposés et présentant très souvent un arrangement à haute symétrie.

Grâce à la cristallographie aux rayons X, les scientifiques peuvent étudier les liaisons chimiques qui lient un atome à un autre. Considérons par exemple le graphite et le diamant. Ces minéraux sont en apparence très différents : l'un est opaque et mou (le graphite est utilisé pour la fabrication des crayons à mine), alors que l'autre est transparent et dur. Cependant, graphite et diamant sont très proches du point de vue chimique car ils sont tous deux composés de carbone. C'est sa propriété à disperser la lumière – à cause de la structure de ses liaisons chimiques – qui donne au diamant son « éclat ». Nous savons cela grâce à la cristallographie aux rayons X.

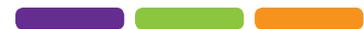
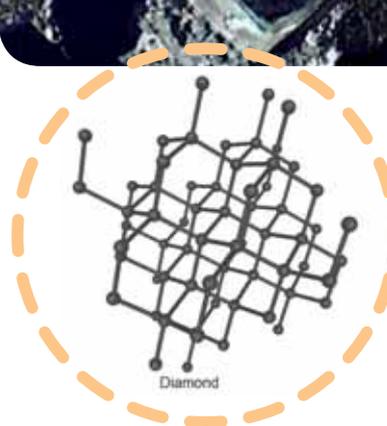
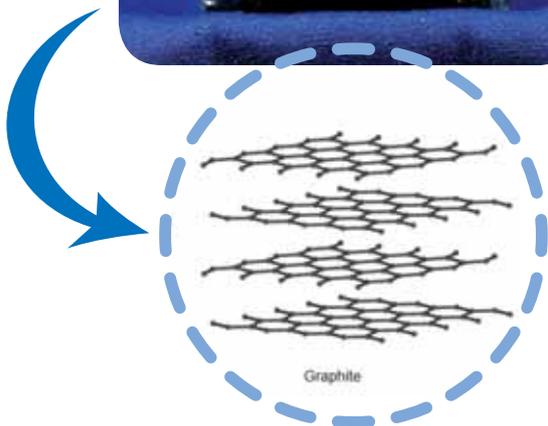
Au début, la cristallographie aux rayons X n'a été utilisée que pour observer les solides cristallins présentant un arrangement régulier d'atomes. Elle pouvait par exemple servir à l'étude des minéraux et d'autres composés tels que le sel ou le sucre.



La symétrie hexagonale des cristaux de neige résulte de la façon dont les molécules d'eau sont liées les unes aux autres.  
Image: Wikipédia



Un éclat de graphite (à gauche) et un diamant brut (à droite). Ces deux cristaux ne se ressemblent pas, mais ils sont en fait étroitement liés, car ils sont tous deux composés de pur carbone. C'est la structure de ses liens chimiques qui donne au diamant sa brillance et sa capacité à diffuser la lumière.  
Photos: Wikipédia



La structure cristalline du graphite (à gauche) diffère considérablement de celle du diamant. © IUCr

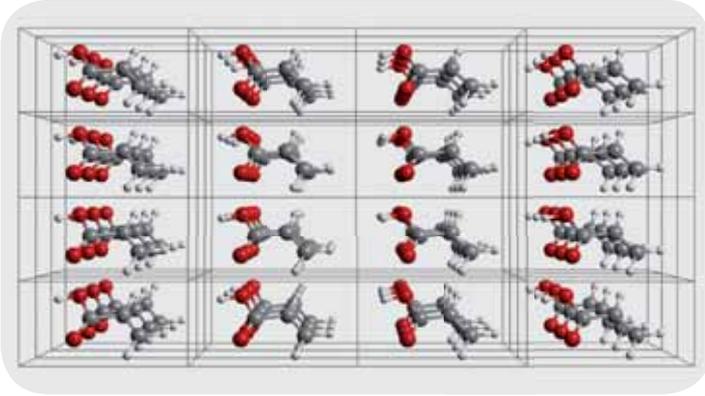


Image en 3D d'une structure cristalline. Dans un cristal, les atomes, les groupes d'atomes, les ions ou les molécules présentent un arrangement régulier en trois dimensions.  
© IUCr

La glace pouvait bien évidemment être étudiée, mais seulement avant qu'elle n'ait fondu. En effet, dans un liquide, le mouvement des molécules rend très difficile l'interprétation de la mesure du faisceau diffusé. Les cristallographes découvrirent qu'ils pouvaient étudier la matière biologique telle que les protéines ou l'ADN en produisant des cristaux de ces derniers. Cela a élargi le champ de recherche de la cristallographie à la médecine et la biologie. La découverte vint à une période où le développement d'ordinateurs puissants offrit la possibilité de modéliser la structure de ces composés bien plus complexes.

Après un siècle de développement, la cristallographie aux rayons X est devenue la méthode de référence pour l'étude de la structure atomique et des propriétés des matériaux. Elle se situe maintenant au centre des avancées dans plusieurs domaines scientifique. De nouvelles méthodes cristallographiques sont encore en cours de développement, et de nouvelles sources (électrons, neutrons, synchrotron) sont désormais disponibles. Ces développements permettent aux cristallographes d'étudier la structure atomique d'objets qui ne sont pas des cristaux parfaits, incluant les quasi-cristaux (voir l'encadré) et les cristaux liquides (voir la photo sur la page suivante).

Le développement de machines capables de générer une lumière intense et des rayons X (synchrotrons) a révolutionné la cristallographie. D'importantes installations pour la recherche comprenant des sources synchrotrons sont utilisées par les cristallographes travaillant dans les domaines de la biologie, la chimie, la science des matériaux, la physique, l'archéologie et la géologie. Les sources synchrotrons permettent aux archéologues d'indiquer avec précision la composition et l'âge d'objets d'art datant de dizaines de milliers d'années, et aux géologues d'analyser et de dater les météorites et les roches lunaires.

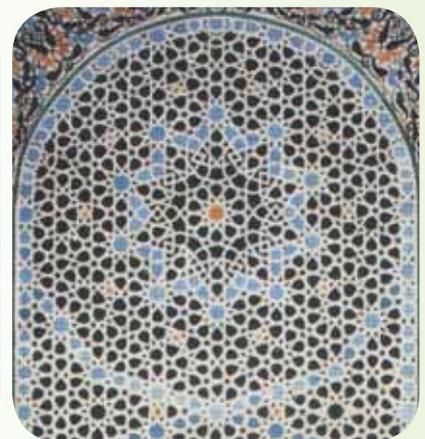
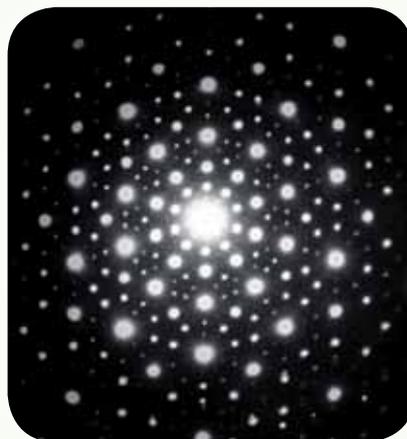
## QUASI-CRISTAUX : DÉFIER LES LOIS DE LA NATURE

En 1984, Dan Shechtman a découvert l'existence d'un cristal dans lequel les atomes suivaient un modèle qui ne pouvait être strictement répété. Cela défiait les théories communément admises alors sur la symétrie des cristaux. Jusqu'alors, on pensait que seules les formes géométriques comprenant 1, 2, 3, 4 ou 6 côtés pouvaient former un cristal car seules ces formes pouvaient être reproduites en trois dimensions.

En observant un alliage d'aluminium et de manganèse avec un microscope électronique, Dan Shechtman découvrit un pentagone (figure à cinq côtés). Ce « proscrit » fut reconnu sous le nom de quasi-cristal. Cette découverte innovatrice de Dan Shechtman lui valut le prix Nobel de chimie en 2011.

Du fait de l'arrangement spécifique de leurs atomes, les quasi-cristaux ont des propriétés inhabituelles : ils sont à la fois durs et fragiles, et se comportent presque comme du verre tout en restant résistants à la corrosion avec des propriétés antiadhésives. Ils sont actuellement utilisés dans plusieurs applications industrielles, un exemple étant les poêles antiadhésives.

Depuis des siècles, les artisans marocains (*Maâlems*) connaissaient les arrangements géométriques trouvés dans les quasi-cristaux. Six siècles séparent les deux images ci-dessus. L'image sur la gauche montre le modèle de diffraction d'un quasi-cristal obtenu par Dan Shechtman en 1984. La photo sur la droite montre une belle mosaïque (*zellige*) dans l'Attarine Madrasa à Fez (Maroc), datant du 14<sup>e</sup> siècle. Les images sont remarquablement similaires, toutes deux montrant des modèles pentagonaux.



Source : image du modèle de diffraction, *Physical Review Letters* (1984), vol. 53, pages 1951–1953; image de la mosaïque, Association marocaine de cristallographie

# Un peu d'histoire

D'après les faits historiques, bien des personnes ont été fascinées par la beauté et le mystère des cristaux. Il y a deux mille ans, le naturaliste Pline l'Ancien admira la régularité des cristaux de roche sous forme de prismes à six côtés. A cette époque, les processus de cristallisation du sucre et du sel étaient déjà connus des anciennes civilisations indienne et chinoise. Les cristaux de sucre étaient fabriqués à partir du jus de canne à sucre en Inde. En Chine, du cristal de sel pur était obtenu à partir de l'eau salée. La cristallisation était également développée en Irak, au 8<sup>e</sup> siècle. Deux siècles plus tard, l'Égypte et la région d'Andalousie en Espagne maîtrisèrent les techniques de la taille des cristaux de roche pour fabriquer des ustensiles et des objets décoratifs. En 1611, le mathématicien et astronome allemand Johannes Kepler fut le premier à observer les formes symétriques des flocons de neige et devina à partir de là leur structure sous-jacente. Moins de 200 ans plus tard, le minéralogiste français René Just Haüy découvrit les lois géométriques des cristaux.

En 1895, les rayons X furent découverts par William Conrad Röntgen, à qui fut décerné le premier prix Nobel de physique en 1901. Max Von Laue et ses associés découvrirent ensuite que les rayons X traversant un cristal interagissent avec ce dernier et sont par conséquent diffractés suivant des directions particulières, selon la nature du cristal. Cette découverte valut à Von Laue le prix Nobel de physique en 1914.

En 1913, une autre découverte importante fut celle de l'équipe constituée par William Henri Bragg et son fils William Lawrence Bragg, selon laquelle les rayons X pouvaient être utilisés pour déterminer avec précision les positions des atomes à l'intérieur d'un cristal et ainsi éclairer sur sa structure tridimensionnelle. Connue sous le nom de loi de Bragg, cette découverte a largement contribué au développement moderne de toutes les sciences naturelles, car la structure atomique gouverne les propriétés chimiques et biologiques de la matière alors que la structure cristalline gouverne la plupart des propriétés physiques de la matière. Au duo Bragg fut décerné le prix Nobel de physique en 1915.

Entre 1920 et 1960, la cristallographie aux rayons X a permis d'élucider certains mystères de la structure du vivant ayant un grand impact dans le domaine médical. Ce fut par exemple le cas de Dorothy Hodgkin, qui élucida la structure d'un grand nombre de molécules biologiques telles que le cholestérol (1937), la pénicilline (1946), la vitamine B<sub>12</sub> (1956) et l'insuline (1969). En 1964, elle fut récompensée par le prix Nobel de chimie. Sir John Kendrew et Max Perutz furent les premiers à élaborer la structure cristalline d'une protéine, ce qui leur permit de remporter le prix Nobel de chimie en 1962. À partir de cette percée, les structures cristallines de plus de 90.000 protéines, acides nucléiques et autres molécules biologiques ont été déterminées grâce à la cristallographie aux rayons X.

Une des étapes clés du 20<sup>e</sup> siècle fut la découverte de la structure cristalline de l'ADN par James Watson et Francis Crick. Mais ce qui est beaucoup moins connu, c'est que leur découverte fut faite sur la base d'expériences de diffraction réalisées par Rosalind Franklin, qui mourut prématurément en 1958. La découverte de la double hélice ouvrit la voie à la cristallographie des macromolécules et des protéines, éléments essentiels de la biologie et des sciences médicales d'aujourd'hui. En compagnie de Maurice Wilkins, qui avait travaillé avec Rosalind Franklin, Watson et Crick furent récompensés par le prix Nobel de physiologie en 1962.

La cristallographie et les méthodes cristallographiques ont continué à se développer pendant les 50 dernières années. En 1985, par exemple, le prix Nobel de chimie fut décerné à Herbert Hauptman et Jerome Karle pour avoir développé de nouvelles méthodes d'analyse des structures cristallines. Depuis, les structures cristallines d'un grand nombre de composés ont été déchiffrées.

Des prix Nobel ont récemment été attribués à Venkatraman Ramakrishnan, Thomas Steitz et Ada Yonath (2009, voir page 8) ; à Andre Geim et Konstantin Novoselov (2010) pour leur travail innovant sur le graphène, le premier d'une nouvelle classe de matériaux aux structures cristallines bidimensionnelles possédant des propriétés électroniques et mécaniques uniques ; à Dan Shechtman (2011) pour avoir découvert les quasi-cristaux (voir l'encadré de la page 2) et à Robert Lefkowitz et Brian Kobilka (2012) pour avoir révélé le fonctionnement interne d'une importante famille de récepteurs cellulaires qui gouvernent presque toutes les fonctions du corps humain.



Coffret-reliquaire fabriqué entre le 12<sup>e</sup> et le 13<sup>e</sup> siècle et décoré avec des gemmes et des perles  
© Musée de Cluny, France

Depuis un siècle, 45 scientifiques ont été récompensés du prix Nobel pour des travaux directement ou indirectement liés à la cristallographie. Il n'y a pas assez d'espace pour tous les citer dans cette brochure, mais c'est grâce à leurs contributions individuelles que la cristallographie a aidé au développement de toutes les sciences. Aujourd'hui, la cristallographie reste un sol fertile pour de nouveaux et prometteurs travaux de recherche fondamentale.

# Pourquoi les pays doivent-ils investir dans la cristallographie ?

La cristallographie est à la base du développement de presque tous les **nouveaux matériaux**, y compris les produits de consommation courante, tels que les cartes mémoires des ordinateurs, les écrans plats de télévision et les composants des véhicules et des avions. Les cristallographes n'étudient pas seulement la structure des matériaux, mais utilisent également leurs connaissances afin de modifier une structure et lui conférer de nouvelles propriétés ou lui imposer un comportement différent. Les cristallographes peuvent également établir les « empreintes digitales » des matériaux ainsi obtenus. L'industrie peut alors utiliser ces empreintes digitales lors du dépôt de brevet pour prouver qu'un nouveau matériau est unique.

Ainsi, les applications de la cristallographie sont nombreuses. En effet, elle infiltre nos vies quotidiennes et forme la colonne vertébrale des industries qui dépendent de plus en plus de la génération et du développement de nouveaux produits. Par exemple, les industries agroalimentaire, aéronautique, automobile, des soins de beauté, de l'informatique, électromécanique, pharmaceutique et minière sont des bénéficiaires directs des applications de la cristallographie. Ci-dessous quelques illustrations concrètes.

La **minéralogie** est probablement la plus vieille branche de la cristallographie. La cristallographie aux rayons X a été la principale méthode de détermination de la structure atomique des minéraux et des métaux dès les années 1920. La plupart de nos connaissances des roches et des formations géologiques, ainsi que de l'histoire de la Terre, sont basées sur la cristallographie. Même nos connaissances sur les « visiteurs venus de l'espace » comme les météorites proviennent de la cristallographie. Ces connaissances sont essentielles aussi bien pour les industries minière et géothermique que pour toutes les industries de forage à la recherche d'eau, de pétrole et de gaz.

La **conception des médicaments** dépend fortement de l'utilisation des techniques de la cristallographie. Une compagnie pharmaceutique cherchant à développer un nouveau médicament pour combattre une bactérie ou un virus précis doit tout d'abord trouver une molécule capable d'inhiber les protéines actives (enzymes) qui sont engagées dans l'attaque des cellules humaines. Connaître la forme précise de la protéine permet aux scientifiques de concevoir la composition des substances actives du médicament qui peuvent se fixer sur les sites actifs de la protéine et ainsi arrêter leur activité nocive.

La cristallographie est aussi essentielle dans la distinction des différentes formes solides d'un médicament. Ces formes peuvent être solubles sous différentes conditions, ce qui influence l'efficacité du médicament. Ceci est important pour les industries pharmaceutiques productrices de médicaments génériques, notamment en Inde et en Afrique où les médicaments anti-VIH sont produits avec une licence obligatoire, les rendant accessibles aux plus démunis.

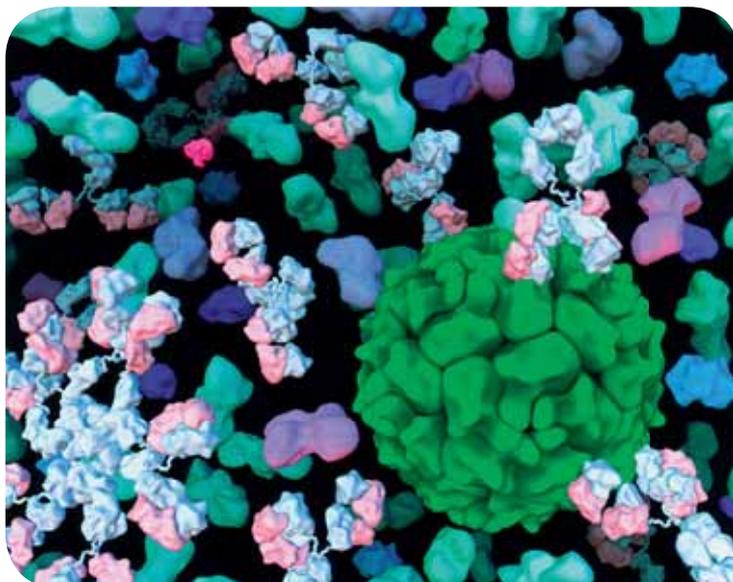
*Certains nouveaux matériaux sont utilisés pour développer des tissus intelligents permettant le passage de l'air ou piégeant la chaleur, pour éviter à celui qui les porte de transpirer ou trembler de froid. Les vêtements intérieurs peuvent être équipés de capteurs mesurant la température du corps, le taux de respiration et le battement cardiaque pour ensuite transmettre des messages correspondants sur le téléphone portable de la personne. Les vêtements extérieurs pourraient être conçus pour détecter les menaces telles que les gaz toxiques, les bactéries malfaisantes ou même des chaleurs extrêmes. Les cristallographes peuvent identifier les propriétés nécessaires pour développer de tels vêtements.*  
© Sharee Basinger/  
publicdomainpictures.net



*Aujourd'hui, les cristallographes sont capables d'étudier une large variété de matériaux incluant les cristaux liquides. Les affichages à cristaux liquides sont utilisés pour les écrans plats des téléviseurs, des ordinateurs, des téléphones portables, des montres digitales, etc. Le cristal liquide ne produit pas de lumière par lui-même mais utilise plutôt celle d'une source externe – tel que le rétro-éclairage d'un téléviseur – pour former les images, favorisant ainsi une faible consommation d'énergie.* @ Shutterstock/Andrey\_Popov



Le beurre de cacao qui est l'ingrédient clé du chocolat cristallise en six formes différentes, mais une seule fond agréablement dans la bouche et possède une surface luisante, solide et croustillante, le rendant aussi savoureux. Cette forme de cristal « saveur » a tendance à se convertir en une forme plus stable, qui est cependant terne, avec une texture molle qui ne fond que lentement dans la bouche, tout en produisant une sensation rugueuse et sableuse sur la langue. Heureusement, la conversion est lente, mais si le chocolat est gardé pour une longue durée ou à température ambiante, il peut développer un résidu blanc sur sa surface caractéristique de la recristallisation. Les maîtres chocolatiers doivent donc avoir recours à un processus sophistiqué de cristallisation pour obtenir la forme cristalline la plus désirable, la seule acceptable par les gourmets et consommateurs. Photo : Wikipédia



Des anticorps se lient à un virus. La cristallographie est utilisée pour contrôler la qualité des médicaments fabriqués, dont les médicaments antiviraux, au stade de la production de masse, dans le but de s'assurer du strict respect des normes sanitaires et de sécurité. © IUCr

Le robot astromobile Curiosity Rover a utilisé la cristallographie aux rayons X en octobre 2012 pour analyser des échantillons du sol de la planète Mars. La NASA avait équipé la Rover d'un diffractomètre. Les résultats suggèrent que l'échantillon de sol martien est similaire aux sols basaltiques des volcans de type hawaïen. Photo : NASA



# Qui organise l'Année internationale de la cristallographie ?

L'Année internationale de la cristallographie est organisée conjointement par l'Union internationale de la cristallographie (IUCr) et l'UNESCO. Cette Année servira aussi de lien entre deux autres Années internationales conduites par l'UNESCO ; en contribuant aux actions de suivi de l'Année internationale de la chimie (2011) et en servant d'introduction à l'Année internationale de la lumière (2015). L'UNESCO joue le rôle de coordonnateur de ces trois Années à travers son Programme international relatif aux sciences fondamentales.

## Pourquoi maintenant ?

L'Année internationale de la cristallographie commémore le centenaire de la naissance de la cristallographie aux rayons X, grâce aux travaux de Max Von Laue, William Henry Bragg et William Lawrence Bragg. L'année 2014 commémore également le 50<sup>e</sup> anniversaire du prix Nobel décerné à Dorothy Hodgkin pour ses travaux sur la vitamine B12 et la pénicilline (voir *Un peu d'histoire en page 3*).

Bien que la cristallographie soit aujourd'hui à la base de toutes les sciences expérimentales, elle reste mal connue du grand public. Un des buts de l'Année internationale de la cristallographie est de promouvoir l'éducation et la sensibilisation du public à travers une large gamme d'activités (voir *Qui bénéficiera de l'Année en page 9*).

Les cristallographes sont actifs dans plus de 80 pays, dont 53 sont déjà membres de l'Union internationale de la cristallographie (voir *la carte*). L'IUCr assure à tous ses membres un accès égal aux informations et aux données liées à la cristallographie et promeut la coopération internationale.

Il faut élargir les bases de la cristallographie pour permettre aux pays en développement d'acquérir plus d'expertise dans ce domaine critique, pour leur développement scientifique et industriel. Cette évolution s'impose d'autant plus que la cristallographie joue un rôle clé dans la transition vers un développement durable, essentiel pour les décennies à venir.

### Pays membres de l'Union internationale de la cristallographie



# Les défis pour l'avenir

En l'an 2000, les gouvernements ont adopté les Objectifs du Millénaire pour le Développement, élaborés sous l'égide des Nations Unies. Ces objectifs proposent des cibles à l'horizon 2015 convergeant vers la réduction de l'extrême pauvreté et la faim, l'amélioration de l'accès à l'eau potable et à des services d'assainissement, la réduction de la mortalité infantile et l'amélioration de la santé maternelle.

Les gouvernements préparent actuellement un ensemble d'objectifs qui détermineront l'agenda de développement de la période post-2015. Les exemples suivants montrent comment la cristallographie peut contribuer à la réalisation de cet agenda.

## Les défis alimentaires

La population mondiale va croître de 7 milliards en 2011 à 9,1 milliards d'ici à 2050. Les effets conjugués d'une croissance rapide et d'un régime alimentaire de plus en plus riche en viande et en produits laitiers devrait faire augmenter la demande en nourriture de 70% en 2050. Ceci représente un défi majeur pour le secteur agroalimentaire.

*Les techniques cristallographiques de pointe sont essentielles à la recherche dans le secteur agroalimentaire.*

*La cristallographie peut être utilisée pour l'analyse des sols par exemple. L'une des causes sérieuses de la détérioration des sols est la salinisation qui peut survenir naturellement ou être induite par l'activité humaine. Les études structurales sur les protéines des plantes peuvent être utilisées pour le développement de cultures plus résistantes dans des environnements salés.*

*La cristallographie peut également contribuer à l'élaboration de traitements dans la lutte contre les maladies des plantes et des animaux. Nous pouvons citer l'exemple de la recherche sur le chancre chez les espèces cultivées, comme la tomate, ou le développement de vaccins pour prévenir les gripes aviaires ou porcines.*

*De plus, les études cristallographiques sur les bactéries sont importantes dans la production des produits alimentaires dérivés du lait, de la viande, des légumes et d'autres plantes.*

## Les défis relatifs à l'eau

Bien que l'un des objectifs du Millénaire pour le développement ait récemment été atteint, à savoir celui de réduire de moitié en 2015 le nombre de personnes n'ayant pas accès à l'eau potable, l'Afrique subsaharienne et les États arabes ont pris du retard, d'après le *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* (2012). Le même objectif concernant l'assainissement de base apparaît actuellement hors d'atteinte, puisque la moitié de la population dans les régions en voie de développement n'y a pas encore accès. De plus, il est estimé que le nombre de personnes dans les villes manquant d'accès à un ravitaillement en eau potable et à des services d'assainissement de base a connu une augmentation de 20% depuis l'adoption des objectifs du Millénaire pour le développement, alors qu'il est estimé que la population urbaine doublera quasiment entre 2009 et 2050, passant de 3,4 à 6,3 milliards.

*La cristallographie peut aider à améliorer la qualité de l'eau dans les communautés défavorisées par l'identification de nouveaux matériaux, tels que les nano-éponges et les nano-tablettes, pouvant purifier l'eau pendant plusieurs mois. La cristallographie peut également aider à développer des solutions écologiques pour l'amélioration des installations sanitaires.*

## Les défis énergétiques

Alors que les problématiques énergétiques étaient absentes des objectifs du Millénaire pour le développement, elles devraient être un point central de l'agenda de développement des années post-2015. En septembre 2011, le Secrétaire général des Nations Unies lança l'initiative « Énergie durable pour tous ». Celle-ci intervient alors que l'inquiétude grandit quant à l'impact sur le climat terrestre des économies basées sur les énergies fossiles, d'où le besoin d'accélérer la transition vers les énergies durables. D'après l'Agence internationale de l'énergie,

*La cristallographie peut identifier de nouveaux matériaux, tels que les nano-éponges et les nano-tablettes, pouvant purifier l'eau pendant plusieurs mois.*  
© Shutterstock/S\_E



les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ont crû de 5% entre 2008 et 2010 pour atteindre 30,6 gigatonnes (Gt) en dépit de la crise financière internationale. Si l'on veut limiter la hausse de la température planétaire à 2 °C pour ce siècle, il faudrait que les émissions de CO<sub>2</sub> dues au secteur énergétique n'excèdent pas les 32 Gt en 2020.

On s'attend à une augmentation de la consommation d'énergie de l'ordre de 50 % entre 2007 et 2035, avec les pays non membres de l'OCDE comptant pour 84 % de cette envolée. En 2009, 1,4 milliard de personnes n'avaient pas encore accès à l'électricité. La demande d'énergie renouvelable devrait s'accroître de 60 % d'ici 2035.

*La cristallographie permet le développement de nouveaux produits à faible consommation d'énergie domestique, qui réduisent les émissions de carbone (et diminuent la facture de chauffage), comme les matériaux isolants. Elle peut également aider à identifier de nouveaux matériaux qui réduiraient le coût des panneaux solaires, des moulins à vent et des batteries tout en les rendant plus efficaces. Cela réduirait le gaspillage et améliorerait l'accès aux technologies vertes.*

### « Verdir » l'industrie chimique

Avoir une industrie chimique verte permettrait d'obtenir une économie mondiale verte. L'industrie chimique fabrique plus de 70.000 produits différents, allant des produits plastiques et fertilisants aux détergents et médicaments. Elle est fortement dépendante du pétrole car elle consomme 10% de la production mondiale pour fabriquer 80% à 90% de ses produits. L'industrie chimique est donc une grande consommatrice d'énergie et de ressources.

De plus, la plupart des solvants et catalyseurs sont toxiques, et les méthodes d'élimination des déchets chimiques sont coûteuses et compliquées à mettre en œuvre. Des substances toxiques et cancérigènes sont relâchées dans l'air, le sol et l'eau. D'après le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), l'Europe de l'Ouest a produit au total 42 millions de tonnes de déchets toxiques dans la seule année 2000, dont 5 millions furent exportés une année plus tard.

*La cristallographie peut contribuer au développement de matériaux de construction écologiques dans les pays développés et en développement. Elle peut également faciliter la réduction de la pollution en remplaçant les solvants chimiques par des solvants inorganiques « verts » à base de liquides ioniques et de CO<sub>2</sub>. Elle peut faciliter la réduction des déchets miniers et des coûts relatifs en contribuant au développement de méthodes qui permettent l'extraction des matériaux requis uniquement.*

### Les défis en matière de santé

Ces défis seront considérables dans les décennies à venir. Il n'y a pas encore de vaccin efficace ou de traitement contre les pandémies telles que le VIH/SIDA, la dengue ou la malaria, qui continuent à faire des ravages, notamment dans les pays en développement.

De nombreuses maladies dans les pays en développement, telles que le choléra ou les schistosomiasis chroniques – dont on estime qu'au moins 90% des cas sont répertoriés en Afrique –, sont liées au manque d'accès à l'eau potable et à des services d'assainissement.

De plus, les pays en développement sont exposés aux mêmes maladies chroniques que les pays développés, incluant les maladies cardiovasculaires, les cancers et, de plus en plus, les diabètes (*voir photo*).

D'autres défis majeurs pour les services de santé affectent tant les pays pauvres que les pays riches, comme l'émergence de nouveaux agents pathogènes et une résistance croissante des bactéries aux traitements médicaux existants.

*La cristallographie peut s'attaquer à la résistance croissante des bactéries aux antibiotiques, par exemple. Les cristallographes Venkatraman Ramakrishnan, Thomas Steitz, et Ada Yonath ont dirigé des travaux pour déterminer la structure du ribosome et son fonctionnement lorsqu'il est perturbé par des antibiotiques. Les ribosomes ont pour fonction de produire toutes les protéines des cellules vivantes dont les cellules humaines, végétales et bactériennes. Si l'activité du ribosome est entravée, la cellule meurt. Les ribosomes sont donc une cible-clé des antibiotiques, puisque ceux-ci sont capables d'entraver l'activité ribosomiale des bactéries malfaisantes sans toutefois perturber le fonctionnement des ribosomes humains. En 2008, Prof. Yonath fut récompensée par le prix l'Oréal-UNESCO « Pour les femmes et la science », et une année plus tard les trois scientifiques mentionnés ci-dessus reçurent le prix Nobel.*

*Les zones tropicales ont la chance d'être dotées d'une riche biodiversité qui, le plus souvent, reste inexploitée. La cristallographie peut aider les pays à identifier les propriétés et les comportements des plantes endogènes dans le but de développer des produits de beauté, des remèdes à base de plantes, etc.*

# Qui bénéficiera de l'Année internationale de la cristallographie ?

## L'Année internationale ciblera les gouvernements

En interagissant avec eux et en les conseillant sur la mise en place de politiques qui :

- \* financent la création et le fonctionnement d'au moins un centre national de cristallographie par pays ;
- \* développent la coopération avec les centres de cristallographie à l'étranger, ainsi qu'avec les synchrotrons et d'autres installations de grande taille ;
- \* encouragent l'utilisation de la cristallographie dans la recherche et le développement ;
- \* promeuvent la recherche en cristallographie ;
- \* introduisent la cristallographie dans les programmes scolaires et universitaires ou modernisent les programmes déjà existants.

Par ailleurs, une série de sommets régionaux est planifiée pour mettre en évidence les difficultés que rencontrent les scientifiques pour mener à bien des travaux de recherche de haut niveau dans certaines parties du monde, et identifier les voies possibles pour surmonter ces difficultés. Ces rencontres permettront à des pays différents en matière de langues, d'origines ethniques, de religions et de systèmes politiques de dessiner et se projeter ensemble vers les perspectives futures pour la science et la technologie. Ces sommets seront également l'occasion de stimuler le développement industriel qui découlera de ces échanges, tout en identifiant les opportunités de création d'emploi dans le domaine de la cristallographie.

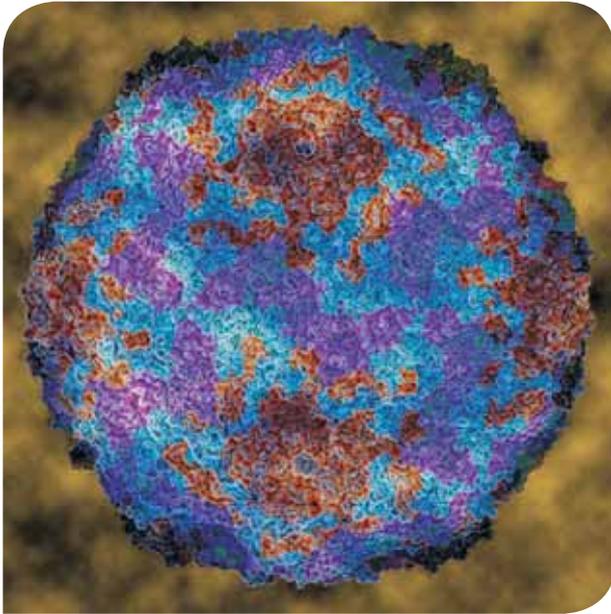
## L'Année internationale ciblera les écoles et les universités

En introduisant l'enseignement de la cristallographie dans les pays où elle reste mal connue par :

- \* la mise en place de laboratoires de démonstration de cristallographie « IUCr-UNESCO Open Laboratories » en Asie, en Afrique et en Amérique latine, en collaboration avec les sociétés de fabrication de diffractomètres ;
- \* l'extension, aux pays d'Asie et d'Amérique Latine où l'enseignement de la cristallographie fait défaut, de l'Initiative pour la cristallographie en Afrique ciblant les universités (voir encadré sur la page suivante) ;
- \* le biais d'expérimentation par la pratique et de compétitions éducatives dans les écoles primaires et secondaires ;
- \* des projets à destinations des lycéens, basés sur la résolution de problèmes, qui feront appel à leurs connaissances en cristallographie, physique et chimie ;
- \* l'organisation par l'Association marocaine de cristallographie d'une exposition itinérante ciblant les écoles et universités, basée sur le thème de la Cristallographie et l'art géométrique dans le monde arabo-islamique (voir l'encadré de la page 12). L'exposition fera des démonstrations de cristallisation et de diffraction aux rayons X à l'aide d'un diffractomètre portable.

*D'après la Fédération internationale du diabète, le nombre de diabétiques serait passé de 30 millions à 230 millions durant ces 20 dernières années. Sept des dix pays les plus frappés par le diabète sont des pays en développement ou des économies émergentes, dont la Chine et l'Inde. Dans les Caraïbes et au Moyen Orient, près de 20% des adultes souffrent du diabète. Si la structure de l'insuline naturelle sécrétée par le pancréas n'avait pas été déterminée par la cristallographie aux rayons X, il serait impossible aujourd'hui de produire l'insuline biosynthétique « humaine ».*  
Photo : Wikipédia





Un virus. La conception de médicament requiert au préalable la connaissance des protéines de structure de l'agent pathogène. © IUCr

## L'Année internationale ciblera le grand public

En aidant à mieux comprendre le rôle joué par la cristallographie dans la plupart des développements technologiques qui façonnent la société moderne, et dans notre héritage culturel et l'histoire de l'art, à travers :

- ❖ des conférences publiques organisées par les membres de l'Union internationale de la cristallographie sur des thèmes tels que l'importance primordiale de la structure cristalline de la protéine dans la conception des médicaments, la cristallographie et la symétrie dans l'art ou l'analyse cristallographique des œuvres d'art et matériaux anciens ;
- ❖ des parrainages d'expositions soulignant l'utilité de la cristallographie ;
- ❖ la soumission d'articles à la presse écrite, à la télévision et à d'autres médias sur l'apport de la cristallographie à l'économie mondiale.

## DÉVELOPPER LA CRISTALLOGRAPHIE DANS LES UNIVERSITÉS AFRICAINES



©Serah Kimani

L'une des missions principales de l'Union internationale de la cristallographie est de fournir aux doctorants et enseignants universitaires des pays en voie de développement des formations en enseignement de la cristallographie, ainsi que les familiariser aux méthodes de recherche modernes.

En collaboration avec les universités sud-africaines et l'Association sud-africaine de cristallographie, l'UICr organise depuis une dizaine d'années des sessions de formation dans des pays d'Afrique anglophone. Dans le cadre de ce partenariat, une bourse a été décernée à deux doctorants exceptionnels originaires du Kenya, Serah Kimani (*photo*) et Ndoria Thuku, leur permettant de terminer leurs thèses en Afrique du Sud. La thèse de Serah Kimani portait sur la détermination de non moins de 40 structures cristallines. Elle a été titularisée à l'Université du Cap en 2012. La thèse de Ndoria Thuku, quant à elle, portait sur la détermination de la structure cristallographique de molécules du *Rhodococcus rhodochrous*, une bactérie utilisée comme vaccin pour les sols afin d'améliorer la santé des plantes dans l'agriculture et l'horticulture. Depuis l'obtention de son diplôme en 2012, le Dr Thuku est post-doctorante dans le Département de biochimie médicale de l'Université du Cap.

En 2011, l'UICr a conçu un programme ambitieux en direction des pays d'Afrique subsaharienne. Connu sous le nom d'Initiative pour la cristallographie en Afrique, le programme forme le personnel enseignant et les doctorants dans le domaine de la cristallographie et équipe les universités participantes en diffractomètres d'une valeur individuelle échelonnée entre 80.000 et 150.000 euros. Cela leur permet ainsi de faire de la recherche à un niveau de qualité international. Un partenaire clé de cette initiative est la compagnie Bruker, qui est une entreprise privée ayant accepté d'équiper toutes les universités reconnues par l'UICr en diffractomètres en parfait état d'utilisation. L'UICr, quant à elle, couvre les frais de livraison du diffractomètre vers chaque université. En contrepartie, l'université bénéficiaire assure la maintenance du diffractomètre et couvre les coûts des équipements secondaires tels qu'ordinateur et tube à rayons X.

## L'Année ciblera la communauté scientifique

En vue de favoriser la collaboration internationale entre scientifiques du monde entier, tout en mettant l'accent sur la collaboration Nord-Sud, à travers les actions suivantes :

- \* le lancement d'un journal à libre accès sur la cristallographie, qui s'appellera *UICrJ* ;
- \* des projets de recherche communs nécessitant l'utilisation de grandes installations synchrotrons dans les pays développés et en développement, comme celle au Brésil ou bien l'installation SESAME au Moyen Orient, qui est née d'un projet de l'UNESCO (voir photo page 14) ;
- \* des consultations pour identifier les meilleurs moyens de conserver toutes les données de diffraction collectées dans des installations à grande échelle et des laboratoires de cristallographie.



Couverture du premier numéro du nouveau journal de cristallographie à accès libre, disponible sur : [www.iucrj.org](http://www.iucrj.org)



Les premiers enseignants-chercheurs à être formés à l'utilisation de ces diffractomètres appartiennent à l'Université de Dschang au Cameroun. Le personnel enseignant-chercheur et les doctorants ont assisté à un stage intensif de 20 heures, en février 2012, dans le but de les préparer à l'arrivée d'un diffractomètre l'année d'après.

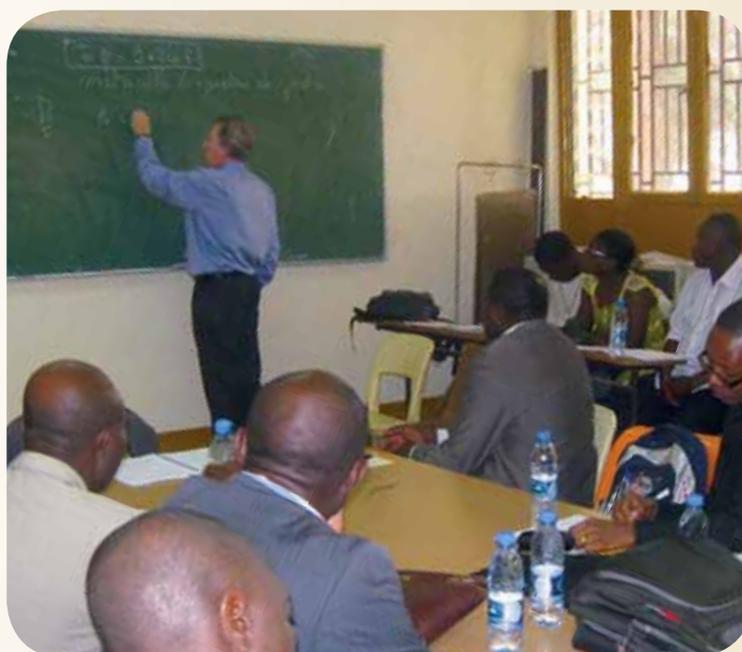
L'Association camerounaise de cristallographie a été fondée pendant cette période. La jeune association a mis en place son premier stage de formation, du 7 au 13 avril 2013, à Dschang, qui attirera 24 professeurs et doctorants originaires de plusieurs universités camerounaises et de la sous-région. Ce stage, cofinancé par l'UICr, l'Association camerounaise de cristallographie, l'Université de Dschang et Bruker, a été centré sur les moyens de détermination des structures cristallines par la diffraction.

Les prochains pays à bénéficier de cette initiative seront la Côte d'Ivoire, le Gabon et la République Démocratique du Congo, où une seule université sera ciblée. Celle-ci devra en contrepartie former le personnel d'autres universités dans le pays, et jouer le rôle de centre national de cristallographie. Chaque centre national aura libre accès aux publications spécialisées de l'UICr.

L'Union contacte actuellement d'autres sponsors dans le but de généraliser l'Initiative pour la cristallographie à l'Afrique toute entière.

L'Année internationale de la cristallographie devrait également permettre à cette initiative de s'étendre aux pays en développement en Asie et en Amérique Latine.

Pour plus de détails, écrire à : [claude.lecomte@crm2.uhp-nancy.fr](mailto:claude.lecomte@crm2.uhp-nancy.fr)



Prof. Claude Lecomte, Vice-Président de l'UICr, dispensant un cours de cristallographie à l'Université de Dschang au Cameroun en février 2012.  
© Patrice Kenfack/Association camerounaise de cristallographie

## LA PRÉSENCE DE LA SYMÉTRIE DANS L'ART ET L'ARCHITECTURE

Qu'il s'agisse d'un visage humain, d'une fleur, d'un poisson, d'un papillon, voire d'un objet non vivant comme un coquillage, la symétrie envahit le monde naturel. Depuis toujours, elle fascine les civilisations humaines, qui reflètent la symétrie dans leur art et leur architecture, depuis des milliers d'années.

La symétrie se retrouve dans toutes les formes d'expression de la créativité humaine : moquettes et tapis, poteries, céramiques, dessins, peintures, poésies, sculptures, architecture, calligraphie, etc. Il y a de la symétrie dans l'alphabet chinois par exemple. La symétrie dans l'art et l'architecture chinois est une manifestation de la philosophie chinoise cherchant l'harmonie à travers l'équilibre.

L'art et l'architecture peuvent montrer différentes formes de symétrie. Il est dit d'un motif qui se répète à l'infini qu'il présente une symétrie de translation. Le motif pouvant être unidimensionnel, comme la frise ci-dessous, ou bidimensionnel, comme les animaux ailés de l'image ci-contre.

*Symbole chinois correspondant au bonheur, prononcé Shuangxi*

En symétrie bilatérale, les côtés gauche et droit sont des images miroirs l'une de l'autre. Le papillon en est un exemple naturel. La symétrie bilatérale a toujours été une caractéristique commune de l'architecture, des exemples concrets à travers l'histoire de l'humanité étant le **Taj Mahal** en Inde (voir photo), la Cité interdite en Chine ou encore le Temple maya de **Chichen Itza** au Mexique (voir photo). La symétrie bilatérale est aussi répandue dans l'art, bien que la symétrie parfaite soit rare en peinture.

Si une figure peut subir une rotation autour d'un axe sans changer sa forme originale, on dit qu'elle présente une symétrie de rotation. Les pyramides de Giza en Egypte, par exemple, présentent une symétrie de rotation d'ordre 4. L'intérieur du dôme de la **Mosquée de Lotfollah** en Iran (voir photo) montre une symétrie de rotation d'ordre 32 autour du point localisé au centre de la figure.

Les modèles géométriques ont envahi l'art de nombreuses civilisations. Quelques exemples sont les tableaux de sable des indiens Navajo en Amérique du Nord, les **Kolams du sud de l'Inde** (voir photo), le batik indonésien, l'art des aborigènes d'Australie et les mandalas du Tibet.



*Tête de bronze Yoruba de la ville nigériane d'Ife, datant du 12<sup>e</sup> siècle de notre ère  
Photo : Wikipédia*

*Motif bidimensionnel de Maurits Cornelius Escher (Pays Bas)  
© M C Escher Foundation*



*Taj Mahal en Inde, achevé en 1648, aujourd'hui site du Patrimoine mondial de l'UNESCO  
Photo : Muhammad Mahdi Karim/Wikipédia*



*Temple Maya de Chichen Itza au Mexique, qui a connu son apogée entre les 6<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> siècles de notre ère ; aujourd'hui, ce site fait partie du Patrimoine mondial de l'UNESCO. © S. Schneegans/UNESCO*

Aux alentours du 7<sup>e</sup> siècle, les civilisations islamiques commencèrent à utiliser les modèles géométriques dans les mosaïques et autres formes d'art afin de lier visuellement la spiritualité à la science et à l'art. L'art islamique pourrait avoir inspiré l'École occidentale de l'abstraction géométrique du 20<sup>e</sup> siècle ; deux adeptes de cette école furent **Maurits Cornelis Escher** et **Bridget Riley** (voir photo). Escher en serait devenu un adepte à la suite d'une visite au Palais Maure de l'Alhambra en Espagne.

Tout au long de l'année 2014, l'Association marocaine de cristallographie organise une exposition itinérante sur la Cristallographie et l'art géométrique dans le monde arabo-islamique. Pour en savoir plus, écrire à Abdelmalek Thalal : [abdthlal@gmail.com](mailto:abdthlal@gmail.com)



On trouve des Kolams comme celui-ci à Tamil Nadu, dessinés en poudre de riz ou en craie devant les maisons du sud de l'Inde, dans le but d'apporter la prospérité dans la maisonnée. Ces motifs peuvent être renouvelés de façon journalière.  
Photo : Wikipédia

Plafond en forme de dôme de la Mosquée de Lotfollah en Iran, aujourd'hui site du Patrimoine mondial de l'UNESCO  
Photo : Phillip Maiwald/Wikipédia



Al-Attarine Madrasa (école) à Fez au Maroc, site du Patrimoine mondial de l'UNESCO. Cette madrasa fut construite par le Sultan marinide Uthman II Abou Saïd vers 1323–1325 de notre ère.  
© A. Thalal



Jeu d'ombre de Bridget Riley, Royaume-Uni, 1990  
Photo : Wikipédia

Frise unidimensionnelle  
Image provenant de l'Association marocaine de cristallographie

# Comment mon pays peut-il participer à la relance de la cristallographie en 2014 et au-delà ?

Tout pays souhaitant développer une industrie basée sur le savoir scientifique ou voulant donner de la valeur ajoutée à ses produits bruts doit posséder une capacité endogène en cristallographie. En effet, l'Année internationale de la cristallographie fournit l'occasion aux pays en voie de développement d'Afrique, des États arabes, d'Amérique latine et des Caraïbes et enfin d'Asie d'impulser une dynamique en faveur de la cristallographie sur ces régions.

*Le mur de protection achevé dans la salle de SESAME, source de lumière synchrotron au Moyen Orient. Ce centre de recherche intergouvernemental, basé en Jordanie, a été mis en place sous l'égide de l'UNESCO et regroupe le Bahreïn, Chypre, l'Égypte, la Jordanie, le Pakistan, l'Autorité palestinienne et la Turquie. Treize autres États sont membres observateurs tels que le Japon et les États-Unis d'Amérique. Le bâtiment de SESAME a été achevé en 2008 et le laboratoire devrait être pleinement opérationnel au début de l'année 2016.*

© SESAME



## Amélioration de la formation et la recherche

La cristallographie est une science interdisciplinaire qui parcourt aussi bien la physique, la chimie, les sciences des matériaux, la géologie, la biologie, la médecine, que les sciences pharmaceutiques. Les scientifiques formés dans n'importe laquelle de ces disciplines sont ainsi des cristallographes potentiels. Tout au long de l'année 2014, l'Union internationale de la cristallographie va encourager de nouveaux pays à devenir membre, ce qui facilitera la coopération internationale dans la formation et la recherche ainsi que l'accès à l'information et à la connaissance en cristallographie.

Une fois formés, les cristallographes ont besoin d'infrastructures appropriées pour appliquer leur savoir-faire. L'UNESCO et l'UICr recommandent donc que les gouvernements mettent en place au moins un centre national de cristallographie, équipé d'un diffractomètre, et qu'ils les dotent d'un support financier durable. Dès que le diffractomètre a fini de mesurer les intensités diffractées par le cristal, les chercheurs du centre de cristallographie peuvent alors prendre le relai en résolvant et modélisant sa structure. En tant que partenaires de l'Année internationale de la cristallographie, les fabricants de diffractomètres garantissent la mise à disposition, quasiment gratuite, de diffractomètres et participeront à la formation et à la maintenance des équipements.



Il est important que les gouvernements mettent en place des politiques qui facilitent les liens entre le centre national de cristallographie et les universités et industries du pays. Le centre national aura également besoin de tisser des liens avec d'autres centres de cristallographie du monde entier. Tout cela dans le but de conduire une politique de développement durable basée sur la connaissance scientifique.

De même, les gouvernements devraient favoriser des liens entre les centres nationaux de cristallographie et les centres synchrotron existants tels que SESAME en Jordanie (*voir photo*).

En vue de rendre accessible à tous les connaissances issues des progrès scientifiques et technologiques en cristallographie, et de donner plus de visibilité aux publications des cristallographes des pays en voie de développement, l'UICr est en train de lancer un journal de cristallographie en accès libre dénommé *IUCrJ* (*voir photo page 11*).

L'UNESCO et l'UICr encouragent également les gouvernements à mettre en place des centres régionaux et sous-régionaux offrant des possibilités de formation et d'expérimentation en cristallographie, dans le but de rationaliser les ressources en termes de renforcement des capacités institutionnelles.

### Formation des cristallographes de demain

L'heure est venue pour chaque pays de former un nombre suffisant de cristallographes. Les gouvernements peuvent d'ores et déjà entamer la modernisation des programmes scolaires et universitaires, en favorisant une meilleure corrélation entre la cristallographie et les programmes de physique, de chimie, de biologie et de géologie. L'UNESCO et l'UICr sont prêts à assister les gouvernements dans la révision et le développement de ces programmes.

Les gouvernements sont également invités à exprimer leur intérêt pour les laboratoires de démonstration de cristallographie « IUCr-UNESCO Open Laboratories », qui ont été spécialement conçus pour les étudiants et les jeunes chercheurs des pays en voie de développement.

L'UICr a aussi développé des projets d'olympiades et de compétitions entre écoles en cristallographie, faisant appel à des connaissances de physique et chimie. Le but étant de montrer les applications pratiques de ces sciences pour le développement de l'agriculture, la conception des médicaments, les nouveaux matériaux « verts », etc. Tous les pays sont invités à indiquer s'ils sont disposés à organiser de telles compétitions à l'échelle nationale.



# Participer à l'Année internationale de la cristallographie

Les 195 États membres de l'UNESCO sont invités à contacter l'équipe du Programme international relatif aux sciences fondamentales de l'UNESCO ou l'Union internationale de la cristallographie afin d'établir ensemble un programme de mise en place national des activités de l'Année internationale de la cristallographie 2014.

## Union internationale de la cristallographie

Prof. Gautam Desiraju,  
Président : [desiraju@sscu.iisc.ernet.in](mailto:desiraju@sscu.iisc.ernet.in)

Prof. Claude Lecomte,  
Vice-Président : [claudelcomte@crm2.uhp-nancy.fr](mailto:claudelcomte@crm2.uhp-nancy.fr)

Dr Michele Zema,  
Directeur du Projet de l'Année internationale de la cristallographie : [mz@iucr.org](mailto:mz@iucr.org)

## UNESCO

Prof. Maciej Nalecz, Directeur,  
Directeur, Secrétaire exécutif du Programme international relatif aux sciences fondamentales de l'UNESCO : [m.nalecz@unesco.org](mailto:m.nalecz@unesco.org)

Dr Jean-Paul Ngome Abiaga, Spécialiste adjoint du programme : [jj.ngome-abiaga@unesco.org](mailto:jj.ngome-abiaga@unesco.org)

Dr Ahmed Fahmi,  
Spécialiste du programme : [a.fahmi@unesco.org](mailto:a.fahmi@unesco.org)



*La cristallographie aide à déterminer la combinaison idéale d'aluminium et de magnésium dans les alliages utilisés dans la fabrication des avions. En effet, trop d'aluminium et l'avion pèserait trop lourd, trop de magnésium et il serait plus inflammable.*

© Shutterstock/IM\_photo

Le programme des manifestations de l'Année, ainsi que des ressources pédagogiques, sont disponibles sur le site internet officiel :

[www.iycr2014.org](http://www.iycr2014.org)



Pour plus d'informations au sujet de l'Année internationale de la cristallographie 2014, veuillez contacter :

#### Union internationale de la cristallographie

Prof. Gautam Desiraju,  
Président : desiraju@sscu.iisc.ernet.in

Prof. Claude Lecomte,  
Vice-Président : claude.lecomte@crm2.uhp-nancy.fr

Dr Michele Zema,  
Directeur du Projet de l'Année internationale de la cristallographie : mz@iucr.org

#### UNESCO

Prof. Maciej Nalecz, Director,  
Directeur, Secrétaire exécutif du Programme international relatif aux sciences fondamentales de l'UNESCO : m.nalecz@unesco.org

Dr Jean-Paul Ngome Abiaga,  
Spécialiste adjoint du programme :  
jj.ngome-abiaga@unesco.org

Dr Ahmed Fahmi,  
Spécialiste du programme : a.fahmi@unesco.org

[www.iycr2014.org](http://www.iycr2014.org)

