

L'ESSENTIEL SUR LES STRUCTURES CRISTALLINES DANS LES ORGANISMES BIOLOGIQUES

Description

Les structures cristallines, couramment présentées à travers l'exemple des minéraux des roches, existent aussi chez de nombreux organismes vivants. La coquille d'œuf ou des mollusques, les os, les raphides sont autant d'exemples qui montrent la diversité de ces structures particulières en lien avec leurs fonctions : protection, résistance à la pression, osmorégulation... Elles interviennent aussi dans certaines pathologies (calculs rénaux) et sont en lien avec certaines questions vives de société (protection de l'environnement, recherche biomédicale...).

Mots-clés

Structures cristallines, cristaux, minéralisation, ossification, protection, coquille, raphides, glandes à sels, calculs rénaux, calcite, aragonite, oxalate de calcium, cristaux liquides.

Références au programme

1.2 : Des édifices ordonnés : les cristaux

Savoirs

Des structures cristallines existent aussi dans les organismes biologiques (coquille, squelette, calcul rénal, etc.).

Introduction

Les cristaux sont très présents dans notre quotidien : sel, neige, gemmes... Ils sont composés d'unités structurales organisées en un réseau ordonné et périodique à partir d'un motif élémentaire appelé maille. On retrouve des structures cristallines aussi au sein des organismes vivants : squelette interne ou externe, excroissances minérales, permettant d'assurer de nombreuses fonctions de support, de protection, de résistance. Aujourd'hui, l'étude des structures cristallines des organismes vivants recouvre de nombreux champs d'investigation : la médecine (calculs rénaux, ossification, cristaux liquides), le développement durable (les coraux), l'alimentation (coquille d'œuf), les techniques d'étude (cristallisation de virus ou de molécule organique), la gemmologie (perles huîtres)... Il est question ici d'illustrer certains de ces champs par quelques exemples concrets en insistant sur les fonctions induites, les modalités de mise en place et les applications ou conséquences possibles pour l'homme.

Contenus scientifiques

Particularités des structures cristallines d'origine biologique

Pour caractériser ces structures, il est intéressant de :

1. **mettre en relation la structure particulière et la fonction.** Les exemples détaillés ci-dessous illustrent quelques fonctions inhérentes à ces structures. Il peut s'agir d'une fonction de soutien des tissus mous (exosquelette des échinodermes, squelette interne osseux), de protection (coquilles de mollusques, épines d'oursin), de régulation de l'homéostasie (tissus osseux, glandes à sel), de défense (poils urticants, raphides, perles huîtres), de nutrition (émail, dentine), de relation (cristaux liquides des scarabées, otolithes des poissons).
2. souligner **l'aspect dynamique des processus de minéralisation et déminéralisation** qui contribuent au développement des organismes (ex : ossification, développement de la coquille) mais qui peut aussi conduire à des dysfonctionnements de l'organisme (ex : décalcification osseuse) ou des écosystèmes (massif corallien).
3. souligner la possibilité de mise en place de **structures cristallines à partir d'éléments minéraux** (ex : calculs rénaux) **mais aussi de molécules organiques** dans un contexte pathologique (ex : structure cristalline de l'hémoglobine HbS) ou de recherche (ex : cristallographie de la molécule d'ADN).

La singularité des biocristaux comparés aux cristaux abiotiques provient notamment du **contrôle biologique** exercé par les tissus, cellules et molécules organiques lors de la phase de nucléation et de croissance de ces structures cristallines.

Conséquences du contrôle biologique sur la nature des structures cristallines

En milieu abiotique, la cristallisation des minéraux aboutit à une structure organisée, périodique, constituée à partir d'une unité structurale, la maille. Au sein des organismes vivants, la cristallisation est modifiée sous l'action conjointe des tissus (quand ils existent), des cellules et des molécules organiques (parfois organisées en matrice). Ainsi, le carbonate de calcium (CaCO_3) peut cristalliser sous forme de calcite ou d'aragonite en fonction du tissu : on parle de cristal polymorphe. Un même polymorphe peut aussi présenter une structure particulière en fonction de sa position dans le tissu.

Les tissus des êtres vivants permettent un contrôle de la cristallisation : exemple de la coquille des mollusques. Dans le cas de l'huître perlière (*Pinctada sp.*), la coquille est constituée de deux couches, une couche externe de prismes de calcite et une couche interne de nacre (aragonite). Dans le cas de la nacre, la libération de polysaccharides notamment par le manteau favorise la fixation de calcium et la formation d'agrégats à l'origine de la première étape de la minéralisation : la nucléation. La croissance de l'aragonite est ensuite contrôlée par des molécules organiques qui lui confèrent sa structure particulière en plaques polygonales empilées et ses aspects irisés sur le côté interne de la coquille. Coté externe, c'est une enveloppe particulière, le périostracum qui est impliquée dans la nucléation et la minéralisation de la calcite sous forme prismatique (Nouet 2014).

Des cellules spécialisées participent à la biocristallisation : exemple des spicules d'éponges.

Les spicules d'éponges sont des structures calciques ou siliceuses pouvant jouer le rôle de soutien, d'adhérence et de protection. La minéralisation est permise par une étape de nucléation puis de croissance sous le contrôle de cellules particulières (les sclérocytes) et de l'activité de certaines enzymes (la silicatéine pour les spicules siliceux) en lien avec des protéines comme le collagène. Ce contrôle biologique participe à la réalisation de spicules pouvant présenter une, deux, trois ou quatre pointes (Auzoux-Bordenave et al. 2013).

Les molécules organiques permettent une modification des propriétés du cristal : exemple

des épines d'oursins. Les épines d'oursin sont composées d'environ 95 % de calcite cristallisée et de 5 % d'un mortier alliant du CaCO_3 amorphe et des molécules organiques. Cette composition hybride confère à l'épine une résistance accrue par rapport à un cristal inorganique qui présenterait des fragilités inhérentes aux plans de clivage du minéral. Résistante, l'épine d'oursin peut aussi se casser et se morceler en cas de pénétration dans un tissu étranger (Perl-Treves 1998).

Ainsi, il apparaît deux formes principales de mise en place des structures cristallines chez les êtres vivants : l'une sous contrôle des molécules organiques, de cellules ou de tissus spécialisés conduisant à des propriétés et des structures particulières, l'autre se rapprochant d'une minéralisation abiotique suite à une concentration en soluté, le biocristal obtenu se rapproche alors du cristal inorganique (coquille d'œuf).

Par ailleurs, les êtres vivants peuvent aussi favoriser la formation de cristaux qui ne sont pas dans leur organisme mais dans leur environnement proche. C'est le cas des stromatolithes, roches formées par la précipitation de CaCO_3 suite à l'activité photosynthétique des cyanobactéries dans un biofilm encroûtant.

Quelques exemples de structures cristallines dans les organismes

Le tissu osseux de l'endosquelette. On distingue deux types d'os : l'os spongieux et l'os compact. L'os compact est composé d'une unité structurale appelée ostéon organisée autour d'un canal de Havers contenant un vaisseau sanguin et un nerf. L'ostéon est composé d'un empilement de lamelles composées de matrice organique (appelée ostéoïde riche en collagène) qui se trouve ensuite minéralisée par des cristaux de phosphate de calcium hydraté ou hydroxyapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$). Ce sont des cellules particulières, les ostéoblastes qui sont à l'origine de cette matrice organique et de sa minéralisation ultérieure par l'action d'enzymes comme la phosphatase alcaline (minéralisation) ou la pyrophosphatase (deminéralisation) (Heath et al. 2015). Les ostéoblastes évoluent ensuite en ostéocytes. Au microscope polarisant, il est possible de voir les différentes lamelles riches en calcite donnant un aspect irisé à l'image. D'un point de vue fonctionnel, le collagène permet une résistance à la traction et les structures cristallines permettent une résistance à la compression et à la flexion (Peycru et al. 2006). L'imprégnation de cristaux dans le tissu osseux permet à l'os d'exercer une fonction de soutien pour les tissus mous. Le tissu osseux participe aussi à la régulation du taux de calcium plasmatique (calcémie). Il s'agit d'une régulation hormonale sous l'action de la parathormone et de la calcitonine. L'hormone parathyroïdienne stimule l'activité de cellules dégradant l'os (les ostéoclastes) libérant ainsi du calcium dans le sang alors que la calcitonine inhibe l'activité des ostéoclastes. Ostéoclastes et ostéoblastes participent donc au remodelage de l'os.

L'émail et la dentine sont des structures minérales calcifiées. L'émail est composé de cristaux d'hydroxyapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$. L'émail plus minéralisé que la dentine est aussi plus friable. Les analyses isotopiques et l'étude des micro-usures sont sources de renseignement sur la composition du régime alimentaire pour les paléontologues. La synthèse de l'émail est initiée par des cellules particulières, les améloblastes.

La coquille des œufs de poule. Chez la poule, il faut environ 20h pour la fabrication d'un œuf. La minéralisation de la coquille est l'une des plus rapides du monde vivant. La coquille est composée essentiellement de carbonate de calcium, d'eau et de protéines spécifiques qui contrôlent la fabrication de la coquille. Des équipes de l'INRA travaillent à identifier les gènes impliqués dans la synthèse de la coquille d'œuf en vue d'améliorer ses propriétés mécaniques.

Les poils urticants. La paroi pectocellulosique des végétaux peut aussi être imprégnée de structures cristallines. Cette minéralisation peut être soit une calcification (CaCO_3) soit une silicification (SiO_2). Les poacées par exemple ont des parois incrustées de silice. L'ortie possède des poils urticants. Ceux-ci possèdent à leur extrémité une pointe en silice qui se rompt facilement lors d'un contact épidermique. Les poils libèrent ainsi des substances urticantes : l'histamine, la sérotonine, l'acétylcholine, l'acide formique responsables d'une sensation de démangeaison (prurit), des rougeurs de la peau (érythème dû à une vasodilatation), d'une sensation de brûlure et de la présence d'une urticaire (marquée par un œdème dermique).

Les raphides. De nombreuses plantes comme la misère possèdent des raphides d'oxalate de calcium au niveau des feuilles. Ces structures cristallines limiteraient le broutage mais aussi la toxicité d'une concentration élevée en calcium soluble dans le milieu.

Les glandes à sels. Certaines plantes, dites halophytes, sont adaptées aux milieux riches en sel. Différents mécanismes expliquent cette tolérance au sel : la séquestration de sel dans des compartiments intracellulaires (plantes succulentes comme la salicorne), la formation d'excroissances appelées trichomes riches en sels (comme le quinoa), ou la formation de cristaux de sel par des glandes à sels (certaines plantes de mangroves, comme le palétuvier, *Avicennia sp.*). Les glandes à sel permettent la sécrétion d'une solution riche en sel (hypertonique) pouvant conduire à la formation de cristaux de sels (NaCl) à la surface des feuilles, conséquence d'une évaporation de l'eau. Il s'agit d'un mécanisme très coûteux en énergie permettant de maintenir l'équilibre hydrominéral de la plante (Shabala, Bose, et Hedrich 2014). Certains animaux reptiles ou oiseaux halophiles (tolérants au sel) possèdent également des glandes à sel permettant des sécrétions d'osmolarité supérieure à celle de l'eau de mer (jusqu'à 2000m Osm.L^{-1}) (Rieutort 1999). Ces glandes ne fonctionnent pas en permanence comme le rein mais uniquement lors d'un stress osmotique. Elles se situent au niveau de l'encéphale et libèrent leur sécrétion au niveau de cavités nasales, buccales ou orbitaires pouvant former des cristaux comme autour du nez des lézards (Eckert et al. 1999).

Les cristaux d'acide urique. Chez les la plupart des oiseaux, on retrouve aussi des structures cristallines impliquées dans la sécrétion azotée : les cristaux d'acide urique. Cette excrétion solide d'acide urique (uricotélie) limite les pertes en eau comparée à l'excrétion d'azote sous forme d'urée (uréotélie). Les cristaux d'acide urique, en forme d'épines, pouvant potentiellement léser le néphron, elles sont recouvertes de protéines de type albumine formant des balles d'urate moins dangereuses.

Les otolithes des poissons. Présents chez certains poissons téléostéens, les otolithes sont des cristaux de calcite de l'oreille interne permettant l'équilibration. Ils ont une croissance continue dont la structure et la composition dépendent des conditions physiologiques de l'animal et environnementales (température, salinité...). Les otolithes sont des structures de choix pour reconstituer certains paléoenvironnements par sclérochronologie. La sclérochronologie est une science qui étudie le taux de croissance des biocristaux afin d'identifier les conditions de minéralisation.

Apprentissages à construire : l'observation au service de la science

Dans le cadre des savoirs et savoir-faire du programme, il peut être intéressant de montrer que **la connaissance des structures cristallines des organismes vivants se fait notamment par l'observation et l'identification de ces structures « sur des échantillons ou des images »**. Par exemple, en classe, l'utilisation d'un microscope polarisant, couramment utilisé pour observer les minéraux des roches, peut être utilisé pour observer des raphides, des coquilles, des coupes d'os...eux-mêmes composés de structures cristallines minérales. Les images de diffraction aux rayons X peuvent être utilisées pour observer le cristal d'une molécule d'ADN obtenue par cristallographie. Un microscope électronique à transmission peut être utile pour observer la structure cristalline de l'hémoglobine drépanocytaire désoxygénée. Le microscope électronique à balayage permet d'observer la disposition de cristaux de calcite et d'aragonite d'une coquille de mollusques.

Compléments éventuels

Aspects interdisciplinaire et historique : la définition d'un cristal

La définition de cristal a évolué au cours des découvertes et du développement des technologies. D'après le dictionnaire de physique (De Boeck), un cristal est un solide dont les constituants (atomes, molécules ou ions) sont assemblés de manière régulière, par opposition au solide amorphe comme le verre. Cette définition géométrique du cristal repose sur la structure périodique du matériau traduisant une répétition dans l'espace de la position des atomes. La diffraction d'un matériau est un moyen relativement simple d'accéder à des informations sur la structure de ce matériau. Ainsi, la structure de l'ADN a pu être élucidée par le biologiste James Watson et le cristallographe Francis Crick à partir de diagramme de diffraction aux rayons X obtenu par Rosalind Franklin (ce qui a valu aux deux premiers un prix Nobel en 1962).

Importance sociétale : dysfonctionnement de l'organisme et des écosystèmes, recherche biomédicale et impact économique

Un exemple de dysfonctionnement de l'organisme : les calculs rénaux. Les plus courants sont composés d'oxalate de calcium. Les aliments riches en oxalate (chocolat, thé noir...) ou en calcium (produits laitiers, fruits à coques...) favorisent ce type de calculs. Normalement évacuées par miction, ces structures cristallines particulières peuvent engendrer de fortes douleurs (coliques néphrétiques) au niveau de l'abdomen. La lithiase urinaire est la pathologie associée à la formation de ces calculs rénaux.

Un exemple de dysfonctionnement d'un écosystème : les récifs coralliens. Chez les coraux, un tissu spécifique (le calicoderme) contrôle la sécrétion cyclique d'une matrice mêlant cristaux d'aragonite et composés organiques à l'origine de l'exosquelette des coraux. Le carbone provient du CO₂ libéré par respiration et le calcium de l'eau de mer. Des algues symbiotiques (des zooxanthelles) peuvent accélérer la minéralisation. Les coraux forment des récifs qui représentent un écosystème particulier à l'origine de nombreux services écosystémiques. Ainsi, la grande barrière de corail australienne, inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1981, regroupe quelques 1500 espèces de poissons, 4000 espèces de mollusques et 400 espèces de coraux. Des modifications environnementales peuvent être à l'origine de perturbations de la biominéralisation du squelette calcaire des coraux. Une eutrophisation, une pollution, l'agriculture intensive ou un stress thermique peuvent-être à l'origine d'une expulsion du symbiote du corail laissant apparaître le squelette calcaire blanc de ce dernier. Ces perturbations peuvent conduire à la mort du corail. De 1985 à 2012, la moitié de la surface corallifère a disparu. De plus, l'augmentation anthropique du CO₂ atmosphérique conduit à une dissolution du CO₂ dans l'eau et une acidification des océans. Il s'ensuit une diminution de la minéralisation des espèces calcifiantes dont les coraux mais aussi les mollusques, échinodermes... et parfois une dissolution du calcaire déjà minéralisé.

Un exemple d'application médicale : les matériaux inspirés des cristaux liquides biologiques. Les cristaux liquides biologiques, connus depuis 1888, possèdent à la fois des propriétés des matériaux liquides (fluidité) et solides (propriétés optiques). La plupart des cristaux liquides biologiques ont une organisation particulière en forme d'hélice dite cholestérique. Cette structure est impliquée dans de nombreux phénomènes biologiques : résistance des os, des écailles de poissons ou de la carapace de certains arthropodes (chitine cholestérique), compaction de l'ADN, couleur irisée de certains organismes vivants (scarabées, poissons, fruits). La recherche sur ces cristaux liquides est prometteuse pour obtenir des matériaux biomimétiques comme des cornées artificielles pouvant servir d'implants avec un risque de rejet moindre.

Un exemple d'application économique : la perle de culture. L'huître noire (*Pinctada margaritifera*) participe en Polynésie à l'industrie perlière. La présence d'un corps étranger (grain de sable) initie une étape de nucléation et la cristallisation de nacre tout autour de l'intrus le rend inoffensif. Dans les parcs de culture, une microbille recouverte d'un fragment de manteau d'huître donneuse est introduite dans la cavité palléale pour favoriser la formation de perles.

Pour aller plus loin : bibliographie et sitographie

- Stéphanie Auzoux-Bordenave, Nadia Ameziane, Aicha Badou, Sophie Berland, J.-M. Caraguel, Isabelle Domart-Coulon, Pascal Jean Lopez, et al. 2013. « Les biominéralisations, témoins de l'évolution du vivant ». *Le Courrier de la Nature* 275: 29-37.
- Roger Eckert, David Randall, Warren Burggren et Kathleen French. 1999. *Physiologie animale. Mécanisme et adaptation*. 4e édition. Bruxelles : De Boeck.
- John W. Heath, Alan Stevens, Barbara Young, Pierre Validire, et Patricia Validire-Charpy. 2015. *Atlas d'histologie fonctionnelle de Weather*. 2e édition. De Boeck.
- Abraham L. Kierszenbaum, Pierre Validire, et Patricia Validire-Charpy. 2015. *Histologie et biologie cellulaire : Une introduction à l'anatomie pathologique*. Bruxelles, De Boeck.
- Julius Nouet. 2014. « Caractérisations physico-chimiques des biominéraux carbonatés de Mollusques actuels et fossiles : le cas des structures entrecroisées ». <http://www.theses.fr/178026816>.

Retrouvez éducol sur



- Danièle Perl-Treves. 1998. « Les cristaux du monde vivant ». *La recherche*, La recherche, n° 305 (janvier) : 34-38.
- Pierre Peycru, Bernard Augere, Jean-Claude Baehr, Didier Grandperrin, et Christiane Perrier. 2006. *Biologie : Tout-en-un - BCPST 1re année*. 1re. Paris : Dunod.
- Michel Rieutort. 1999. *Physiologie animale, tome 2 : Les grandes fonctions*. Revue et mise à jour, 2e. Paris : Masson.
- Sergey Shabala, Jayakumar Bose, et Rainer Hedrich. 2014. « Salt Bladders: Do They Matter ? » *Trends in Plant Science* 19 (11) : 687-91.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.09.001>.
- Os compact (microscope polarisant) : <http://acces.ens-lyon.fr/acces/formation/formavie/formavie-2010/images-formavie-2010/CORTPOL.jpg/view>
- Observation de structures cristallines au microscope polarisant (Inserm) : <https://www.images.inserm.fr/fr/asset/search/Microscopie+en+lumi%C3%A8re+polaris%C3%A9e/page/1/sorting/mostviewed>
- Comparaison aragonite et calcite dans une coquille de mollusque : <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/mineraux-et-ressources-minerales/vesta/les-cristaux-du-vivant-calcite-et-aragonite-de-la-coquille-des-mollusques>
- Coquille d'œuf de poule (INRA) : [http://www.inra.fr/Grand-public/Alimentation-et-sante/Tous-les-dossiers/L-oeuf/La-coquille/\(key\)/5](http://www.inra.fr/Grand-public/Alimentation-et-sante/Tous-les-dossiers/L-oeuf/La-coquille/(key)/5)
- La grande barrière de corail (site UNESCO) : <https://whc.unesco.org/fr/list/154/>
- Les cristaux liquides biologiques (CNRS) : <https://lejournal.cnrs.fr/articles/tous-les-cristaux-liquides-sont-dans-la-nature>
- Les biominéralisations (Muséum National d'Histoire Naturelle, Le courrier de la Nature, n° 275, mai, juin 2013) : https://borea.mnhn.fr/sites/default/files/pdfs/CN_275-PJL.pdf