



Photo Yves Lefèvre

Les spicules formant la charpente squelettique de 90 % des éponges sont minéralisés sous forme de silice amorphe. Ici, éponges (accompagnées de cnidaires et ascidies, etc.) dans le détroit de Pantar (archipel d'Alor), en Indonésie.

Les biominéralisations, témoins de l'évolution du vivant

Stéphanie Auzoux-Bordenave^{1*}, Nadia Ameziane², Aïcha Badou¹,
Sophie Berland² Jean-Marie Caraguel³, Isabelle Domart-Coulon⁴,
Pascal-Jean Lopez², Gilles Luquet², Sophie Martin⁵, Marc de Rafélis⁶,
Loïc Segalen⁶ & Jean-Yves Sire⁷

1. UMR 7208 « Biologie des organismes et des écosystèmes aquatiques », Station de biologie marine/Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), 29 900 Concarneau, bordenav@mnhn.fr (auteur correspondant), aicha.badou@mnhn.fr

2. UMR 7208, MNHN, 43, rue Cuvier, 75005 Paris, ameziane@mnhn.fr, berland@mnhn.fr, pjlopez@mnhn.fr, gluquet@mnhn.fr

3. Bureau d'étude Fish-Pass, Rennes, ZA des Trois-Prés, 35890 Laille, jm.caraguel@wanadoo.fr.

4. UMR 7245 « Molécules de communication et adaptation des micro-organismes », Département RDDM, MNHN, 57 rue Cuvier 75005 Paris, icoulon@mnhn.fr

5. Laboratoire Adaptation et Diversité en milieu marin, Station biologique de Roscoff UPMC, 29682 Roscoff Cedex, sophie.martin@sb-roscoff.fr

6. UPMC-ISTeP « Biominéralisations et Environnements sédimentaires » UMR7193, 4, place Jussieu, 75005 Paris, rafelis@ccr.jussieu.fr, loic.segalen@upmc.fr

7. Université Pierre & Marie Curie, UMR 7138 « Systématique, adaptation, évolution », 7, quai Saint-Bernard, 75005 Paris, jean-yves.sire@upmc.fr

Les mots écrits en vert dans le texte renvoient au lexique page 50.

Au cours de l'évolution biologique qui a débuté sur Terre il y a plus de 3,5 milliards d'années, les organismes vivants ont développé la capacité d'associer des éléments minéraux à des molécules organiques pour former des structures minéralisées rigides. Ce phénomène, que l'on nomme la biominéralisation, est à l'origine de la formation des plaques calcaires des algues unicellulaires, des squelettes externes de nombreux « invertébrés » ou bien encore du squelette des vertébrés. Le vivant possède la faculté de modeler la cristallisation des minéraux sous différentes formes dont voici quelques exemples significatifs parmi les trois règnes. Une faculté étudiée de près dans divers domaines comme l'écologie, la géologie, les nanotechnologies...

Tableau montrant la diversité des formations biominéralisées et leurs fonctions au sein des trois règnes du vivant.

Les animaux, les plantes, les champignons et les bactéries élaborent environ 70 types de biominéraux différents, amorphes ou cristallins¹, majoritairement à base de calcium, qui jouent des rôles variés dans la structure de l'organisme, la défense, la perception sensorielle ou encore la prise de nourriture (cf. tableau ci-dessous). Les plus répandus sont le phosphate de calcium (CaPO₄), le carbonate de calcium (CaCO₃), et la silice (SiO₂).

Chaque espèce exerce un contrôle biologique strict du (ou des) processus de biominéralisation, ce qui se reflète pour chacune, par exemple pour l'élaboration du squelette, dans la diversité de ses formes et de sa composition. Ainsi, en ce qui concerne le calcium, l'organisme vivant élabore des molécules spécifiques liant ce minéral comme certaines protéines acides, des polysaccharides et des lipides. Ces composants, sécrétés principalement dans l'espace extracellulaire,

Minéral	Polymorphe	Organismes	Structure/Fonction
Carbonate de calcium	Calcite	Coccolithophoridés, foraminifères, mollusques, crustacés, échinodermes, mammifères	Paroi cellulaire, plaques calcaires, coquilles, exosquelette, organe visuel, capteur de gravité
	Aragonite	Cnidaires, mollusques, téléostéens	Exosquelette, otolithes (capteur de gravité)
	Vatérite	Ascidies, mollusques	Spicules
	Amorphe	Plantes, crustacés, échinodermes, mollusques, vertébrés	Squelette, réserves de calcium
Phosphate de calcium	Hydroxyapatite	Vertébrés	Endosquelette, dents, réserves de calcium
	Phosphate d'octa-calcium	Vertébrés	Précurseurs osseux
	Amorphe	Mollusques, vertébrés	Réserves de calcium, précurseurs osseux
Oxalate de calcium		Plantes supérieures	Réserves de calcium
Sulfates	Gypses (calcium)	Cnidaires	Capteur de gravité
	Barite (baryum)	Cyanophycées	Capteur de gravité
	Célestite (strontium)	Acanthaires	Exosquelette
Silice	Opale	Diatomées, porifères	Exosquelette, spicules
Oxyde de fer	Magnétite	Bactéries, téléostéens, tortues	Capteur de champ magnétique, dents
	Ferrihydrite	Eucaryotes	Protéines de stockage du fer

forment une matrice organique qui sert de support pour la minéralisation et conditionne l'orientation, la croissance des biominéraux et le type de réseau cristallin. C'est pourquoi, selon la nature des molécules organiques, le carbonate de calcium cristallise sous la forme de calcite dans le squelette des échinodermes, mais sous forme d'aragonite dans la nacre des mollusques.

Voici un éventail de cas de biominéralisations chez les organismes vivants.

Spicules des éponges

Les éléments (spicules) qui forment la charpente squelettique de 90 % des espèces d'éponge sont minéralisés sous forme de silice (SiO_2) amorphe combinée à de la matrice organique, leur donnant des propriétés structurales (résistance et flexibilité) et optiques (conduction de la lumière) qui sont aussi remarquables que la diversité de leur formes. Arrangés précisément dans l'espace avec des fibres organiques et éventuellement un ciment minéralisé (siliceux ou carbonaté), les spicules forment un squelette hiérarchisé caractéristique utilisé pour l'identification morphologique des espèces. Au centre du spicule siliceux se trouve un filament axial riche en une enzyme (la silicatéine) qui, en interaction avec d'autres protéines et du collagène, assure la « croissance » de la silice. L'étude des mécanismes d'auto-assemblage de ces biosilicates trouve des applications en science des matériaux et dans diverses nanotechnologies.

L'exosquelette des coraux constructeurs de récifs

Les **scléractiniaires** construisent un exosquelette calcifié continu, participant à la formation des récifs coralliens qui peuvent couvrir plusieurs milliers de kilomètres carrés dans les océans. La croissance du squelette se fait de manière cyclique, par addition régulière d'incréments. Le biominéral est un composite mêlant une phase minérale de CaCO_3 cristallisé sous la forme d'aragonite et une phase orga-



Photo Nicolas Tolstoj/JACANA

nique. La biominéralisation est extracellulaire, contrôlée par un tissu spécialisé, le calicoderme, recouvrant étroitement le squelette et sécrétant la matrice organique. Le corail utilise le CO_2 qu'il produit par sa respiration comme source de carbonate et puise dans l'eau de mer le calcium, ainsi que les éléments-traces (strontium, magnésium, soufre) qui sont incorporés dans la maille cristalline et à l'interface avec la matière organique. L'association symbiotique avec des **dinoflagellés** photosynthétiques vivant à l'intérieur des cellules de corail augmente de deux à trois fois le taux de croissance squelettique.

La coquille des mollusques, une biocéramique naturelle

Les mollusques élaborent une grande diversité de formations minéralisées dont la majorité

Les couleurs rose à violet de cette espèce de corail mou, l'alcyonaire épineux (Dendronephthya spp.), proviennent des grandes aiguilles calcaires, appelées « sclérites », dispersées à la surface de son corps et à la base des polypes. Cela rend l'ensemble épineux et le protège des prédateurs.

1- Les biominéraux peuvent être classés en deux grandes catégories : lorsqu'ils sont amorphes, c'est-à-dire non cristallisés, leur rôle est souvent associé à des fonctions de stockage et ils constituent des réserves d'éléments minéraux mobilisables pour l'organisme. Lorsqu'ils sont cristallins, ils constituent des matériaux composites particulièrement résistants et flexibles, à la base des charpentes squelettiques. Néanmoins, la silice amorphe forme également un **frustule** résistant.

contient des carbonates ou des phosphates. La structure la mieux étudiée est la coquille calcaire formée par un tissu spécialisé, le manteau. Elle joue un rôle important dans la protection du corps mou, dans le déplacement, la flottabilité ainsi que dans le stockage d'ions vitaux. Sa morphologie et sa composition varient, selon les groupes, de celle unique et spiralée des gastéropodes à celle à deux valves articulées chez les bivalves. Certains mollusques ne possèdent plus qu'une fine coquille interne (os de seiche) voire plus de coquille du tout (limace).

Cette coquille se compose de 95 à 99 % de CaCO_3 et de 1 à 5 % de matrice organique. Selon la nature de la matrice, le CaCO_3 se cristallise sous forme d'aragonite ou de calcite et produit ainsi les différentes couches minéralisées propres à chaque espèce².

Le manteau des huîtres est en nacre, constituée d'aragonite et de conchyoline. Chez l'huître perlière, il est capable de produire une perle en sécrétant de la nacre.

Photo Christophe Valentin/HOA-QUI



Calcification cyclique et stratégies de stockage chez les crustacés

Les crustacés, comme tous les arthropodes, possèdent un exosquelette (ou *cuticule*) inextensible imposant un mode de croissance discontinu associé à des cycles de mue (l'exuviation). Chez la plupart des crustacés, cette cuticule est durcie par calcification pendant la période post-exuviale. Si les espèces marines de crustacés se procurent dans l'eau le calcium nécessaire à la calcification, certaines espèces peuplant les milieux dulçaquicoles et terrestres, dans lesquels la disponibilité du calcium environnemental est très variable, ont développé des stratégies de stockage leur assurant un minimum vital de calcium juste après la mue. La nourriture, incluant parfois l'exuvie, constitue également un apport calcique, mais limité. Quelques espèces développent ainsi cycliquement diverses structures de stockage de calcium (concrétions calcaires au niveau de l'intestin chez certains amphipodes comme les puces de sable, plaques calcaires entre cuticule et épiderme chez certains isopodes tels les cloportes ou dépôts de calcium semi-sphériques appelés « gastrolithes » dans la paroi de l'estomac chez les écrevisses, les homards et les crabes terrestres).

Les crustacés sont donc capables d'élaborer de manière cyclique et majoritairement sous forme de CaCO_3 , deux types de biominéralisations : un squelette externe mais aussi diverses

De la nacre à la perle

La nacre est une formation coquillière très étudiée en raison de son intérêt économique en perliculture et de son utilisation comme substitut osseux en chirurgie réparatrice. Elle se retrouve dans plusieurs classes de mollusques, notamment chez les céphalopodes (nautile), les gastéropodes (ormeau) et chez les bivalves (huîtres). Les huîtres perlières produisent en effet naturellement des perles, en réponse à l'introduction d'un corps étranger dans le manteau : un parasite, parfois un grain de sable. Les cellules du manteau sécrètent alors de la nacre pour isoler ce corps étranger. L'huître à lèvres noires *Pinctada margaritifera*, est à la base de la perliculture en Polynésie. A partir de l'âge de 2 ans, un nucléus est introduit au niveau de la gonade : il s'agit d'une bille de 6 à 8 mm, d'origine coquillière ou en résine de synthèse. Il est greffé en même temps qu'un fragment de manteau prélevé sur une huître donneuse afin d'initier la sécrétion de la nacre. Ce greffon va constituer le sac perlier, à l'origine de la perle.



Photo Xavier Desmier/RAPHO

L'oursin comporte un endosquelette dont les milliers d'ossicules individuels sont juxtaposés et soudés en une structure rigide. Ici, un oursin granuleux (Spherechinus granularis) dans la Réserve naturelle de Scandola, en Corse.

formes transitoires de stockage. Une autre originalité de ces structures de stockage est qu'elles sont essentiellement constituées de CaCO_3 amorphe, qui favorise une remobilisation rapide du calcium stocké en vue de minéraliser d'urgence certains organes vitaux pour la survie de l'espèce.

Squelettogenèse chez les échinodermes

Les Echinodermes sont regroupés en cinq classes : les *Asteroidea* (astéries), *Ophiuroidea*, (ophiures), *Echinoidea* (oursins), *Holothuroidea* (holothuries) et *Crinoidea* (crinoïdes). Ils élaborent un endosquelette qui assure le maintien de leur forme statique, leur protection et la préhension de la nourriture. Il se compose de dizaines de milliers d'ossicules individuels (les plaques) organisés en un réseau tridimensionnel (le stéréome) et liés les uns aux autres par

du **tissu conjonctif**. Ils peuvent être juxtaposés et soudés en une structure rigide (oursin, astérie) ou bien juxtaposés et articulés (ophiure, crinoïde), ou encore isolés et noyés dans le derme (holothurie). L'endosquelette comprend aussi les piquants, les pédicellaires et les dents des oursins. Il s'accroît par l'addition de nouvelles plaques et par la croissance de celles-ci dans toutes les dimensions de l'espace³. La formation du squelette a lieu à l'intérieur même des cellules contenues dans le tissu et en la présence de protéines particulières qui sont spécifiques aux échinodermes. Que ce soit au cours du développement larvaire ou lors de la métamorphose (élaboration définitive du squelette adulte), elle témoigne d'une organogenèse complexe.

Quelques exemples de biominéralisations chez les vertébrés

Le phosphate de calcium (CaPO_4), cristallisé sous forme d'hydroxyapatite, est le composant essentiel des os et des dents des vertébrés, mais on trouve du CaCO_3 dans d'autres formations telles que la coquille des œufs et les otolithes (cf. encadré p. 37).

Le squelette osseux, outre sa fonction structurale, joue un rôle prédominant dans l'équilibre hydro-minéral des organismes. L'os est un tissu composé de 70 % de minéral (CaPO_4) et de 30 % de matrice extra-cellulaire sécrétée par des cellules spécialisées, les ostéoblastes, cellules responsables de la synthèse et de la

2- La coquille des mollusque est généralement composée de plusieurs couches superposées : une couche organique externe, le périostacum, qui protège la surface de la coquille ; une couche minérale externe formée d'un mélange variable de calcite et d'aragonite et une couche interne nacrée, formée de cristaux d'aragonite de forme polygonale, produisant les interférences lumineuses responsables de son aspect irisé.

3- La phase minérale se compose de 95 % de carbonate de calcium et de 5 % de carbonate de magnésium.



Photo Yves Thonnérieux

Chez les vertébrés, les dents sont constituées de phosphate de calcium (ci-dessus un ragondin dont l'espèce est caractérisée par la couleur orange à rouge de ses dents). La coquille des œufs d'oiseaux est formée de calcite (ci-dessous, un œuf éclos de grive musicienne).

minéralisation de la matrice osseuse (cf. encadré p. 36). Les ostéoclastes, un autre grand type cellulaire, s'occupent de la résorption osseuse⁴.

Quant à la coquille des œufs, essentielle à la dissémination des espèces ovipares en milieu terrestre tels les reptiles et les oiseaux : elle protège l'embryon du milieu extérieur et assure le contrôle des échanges d'eau et de gaz ainsi que l'apport de calcium nécessaire au développement embryonnaire. Chez les oiseaux, la coquille, composée de CaCO_3 sous forme de calcite, est une biocéramique poreuse assez solide pour résister aux prédateurs mais pas trop pour faciliter l'éclosion du jeune. Elle est formée en

Photo Valérie Guittet/SNPN



moins de vingt-quatre heures, à la température physiologique (40°C) et sous contrôle hormonal, durant le passage de l'œuf dans les différentes régions de l'oviducte. La calcification débute dans l'isthme de l'utérus par nucléation de premiers cristaux de CaCO_3 sur des sites organiques présents en surface des membranes coquillières. Plusieurs types de macromolécules à forte affinité pour le calcium (glycoprotéines, polysaccharides, protéoglycanes) sont sécrétés par l'utérus au niveau de ces sites de nucléation et vont contrôler le dépôt des couches minéralisées. Le calcium provient à la fois de l'alimentation et de la résorption de l'os médullaire qui sert de réserve de calcium. Les ions bicarbonates, qui sont également nécessaires à la minéralisation de la coquille, proviennent du CO_2 dissous dans le sang.

Par ailleurs, le derme des vertébrés peut se minéraliser et produire des formations squelettiques, souvent lamellaires, constituant un squelette dermique superficiel plus ou moins développé selon les espèces. Chez les vertébrés actuels, l'exosquelette est représenté par les écailles des « poissons », les ostéodermes de certains reptiles et amphibiens et les os dermiques qui participent à la constitution du squelette céphalique et de la ceinture pectorale des gnathostomes (vertébrés pourvus d'une mâchoire).

Minéralisations chez les algues et les végétaux supérieurs

Les biominéralisations comme les carbonates de calcium, les oxalates de calcium, les dépôts

sulfatés et silicates se rencontrent aussi largement chez les organismes photosynthétiques. Il est probable que l'acquisition de ces processus de biominéralisation soit postérieure à l'acquisition de la photosynthèse, estimée à environ un milliard d'années.

Des dépôts de CaCO_3 sont observés dans plusieurs groupes de macroalgues et de microalgues planctoniques, parmi lesquelles les **coccolithophoridés** dont l'accumulation donne la craie. Le rôle mécanique des minéralisations calciques pourrait être impliqué dans la résistance contre le broutage ou la lutte contre les parasites et les virus. Chez les plantes terrestres et les macroalgues, les accumulations de carbonates pourraient jouer un rôle structural, être impliquées dans la régulation de la **pression osmotique** ou encore dans les processus de détoxification.

Des minéralisations à base de silice se retrouvent principalement chez les plantes terrestres et chez certaines microalgues (diatomées) et sont associées à des rôles de défense (maintien de la rigidité des tissus et résistance contre les pathogènes), d'acquisition de la lumière, de flottabilité et de régulation de l'activité enzymatique.

Les plantes telles que les graminées, les bambous ou les prêles sont capables d'accumuler de grandes quantités de silice (jusqu'à 60 % de leur poids sec)⁵.

Impacts des changements environnementaux sur la biominéralisation

Des modifications de l'environnement peuvent perturber le processus de biominéralisation des organismes vivants. On peut citer deux exemples d'impact négatif sur la calcification. Ainsi, chez les coraux, l'association symbiotique avec les dinoflagellés photosynthétiques, décrite précédemment, peut être déséquilibrée puis rompue sous l'effet de changements environnementaux comme les stress thermiques, la pollution ou encore des agents pathogènes,

4- Ainsi, tout au long de la vie, le remodelage osseux est assuré par une alternance de phases de formation (activité ostéoblastique) et de résorption osseuse (activité ostéoclastique) sous contrôle biologique. Les processus de l'ossification sont actuellement bien connus et font l'objet de nombreux travaux de biologie médicale.

5- Au niveau moléculaire, il a été mis en évidence chez différentes espèces de plantes comestibles (riz, blé, concombre) une classe de transporteurs de l'acide silicique apparentée à la famille des aquaporines.

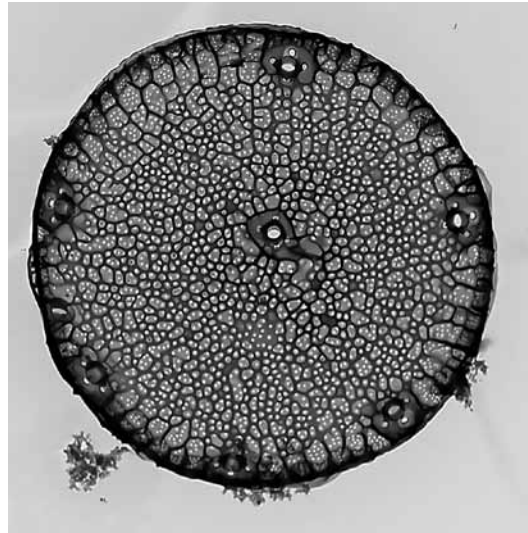


Photo ??????

conduisant à une expulsion des **symbiontes** et révélant le squelette blanc sous les tissus devenus transparents. Or le blanchissement des coraux réduit fortement leur calcification et peut conduire à leur mort.

Photo Elodie Seguin/SNPN



On trouve des minéralisations à base de silice chez les diatomées (en haut), qui sont des microalgues unicellulaires planctoniques, ou bien chez des plantes terrestres telles que les prêles. Ci-dessous, des prêles des marais (Equisetum palustre).



Photo Yves Lefèvre

Mais l'impact le plus significatif est l'effet de l'acidification des océans sur la calcification des organismes marins. Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines émettent dans

l'atmosphère de larges quantités de dioxyde de carbone (CO_2) responsables d'une augmentation de près de 40 % du CO_2 atmosphérique. De nos jours, les océans absorbent environ un quart de ce CO_2 , ce qui entraîne une diminution du pH de l'eau de mer, appelée « acidification des océans », qui est associée à un bouleversement de la chimie des carbonates de l'eau de mer et est donc susceptible d'affecter la physiologie de nombreux organismes marins : les espèces calcifiantes sont alors les plus menacées. La diminution de la teneur en carbonates de l'eau de mer aurait un effet direct sur les organismes qui utilisent le carbonate de calcium pour former leur squelette ou leur coquille. Les organismes calcifiants seraient menacés à tous les stades de leur cycle de vie, en particulier durant les stades précoces du développement. Malgré une réponse variable à l'acidification des océans selon les espèces, les études montrent globalement une réduction de la calcification chez les coraux, les algues calcaires, les mollusques et les échinodermes ; une dissolution des squelettes ou des coquilles calcaires est même parfois rapportée. Au regard des multiples fonctions de la calcification, sa diminution pourrait compromettre la survie des organismes calcifiants en les fragilisant et en réduisant leur avantage compétitif face aux espèces non calcifiantes, bouleversant ainsi la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins.

Des protéines spécifiques contrôlent la formation du minéral

*Des macromolécules spécifiques sont associées aux biominéraux dans la quasi-totalité des **phylums**. Des travaux actuels visent à identifier les protéines minéralisantes dans les différents groupes (mollusques, vertébrés) afin de déterminer si elles ont une origine commune ou si elles ont été recrutées indépendamment au cours de l'évolution.*

*La minéralisation des vertébrés, principalement à base de phosphate de calcium, a constitué un événement crucial pour la diversification du groupe. Des molécules spécifiques et des cellules spécialisées dans leur production étaient sans aucun doute différenciées bien avant l'apparition des premiers tissus minéralisés qui ont été découverts dans les registres fossiles datant d'environ 500 millions d'années. Les matrices organiques des cartilages, des os et des dents (émail et dentine) ont été probablement créées après que les collagènes fibrillaires, composants majeurs des tissus squelettiques, aient été recrutés au cours des périodes qui ont suivi les deux duplications de génome qui précéderent la différenciation des vertébrés. L'émail, comme tissu protecteur d'organes sensoriels situés à la surface de la peau, serait apparu à la même période que les autres tissus minéralisés. La minéralisation de ces tissus n'aurait pu avoir lieu sans la présence de diverses molécules régulant la formation des biominéraux, et appartenant à la famille des **phosphoprotéines** liant le calcium (Secretory Calcium-binding PhosphoProteins ou SCPPs). La famille s'est enrichie par le biais de duplications successives du gène d'origine (SPARC1) pour atteindre aujourd'hui un total de 23 gènes chez l'homme. D'autres protéines sont aussi impliquées dans la minéralisation, la plus connue étant l'ostéocalcine (= protéine osseuse Gla).*

L'acidification des océans réduit la calcification de certains organismes comme les coraux ou les échinodermes. Ici, des étoiles de mer de l'espèce *Acanthaster planci*, espèce invasive en Polynésie française, attaquent un récif corallien de porites dont elles se nourrissent des polypes.

Section mince d'un otolithe provenant d'une plie canadienne (*Hippoglossoides platessoides*) âgée de 23 ans. Chaque anneau représente une année de croissance.

Utilisation des biominéralisations en géochimie et géosciences

Au cours de la vie d'un organisme (de quelques jours à plusieurs dizaines ou centaines d'années), l'évolution métabolique et celle de l'environnement sont susceptibles d'induire des modifications dans la fabrication des biominéraux qu'il produit : variations du taux de croissance ou de la composition chimique. La **sclérochronologie**, l'équivalent aquatique de la **dendrochronologie**, permet de « lire » ces paramètres physico-chimiques, c'est-à-dire le temps enregistré dans certains tissus minéralisés, tels que les squelettes des coraux, les coquilles de mollusques ou encore différentes pièces calcifiées de vertébrés (écailles, vertèbres, otolithes, cf. encadré ci-dessous). L'analyse géochimique de ces biominéralisations, réalisée à l'aide de marqueurs, permet de reconstituer les paramètres de l'environnement (température, salinité, concentration en CO₂, nutriments) qui prévalaient au moment de leur dépôt. Pour le géologue souhaitant effectuer des reconstitutions paléoenvironnementales ou paléoclimatologiques, l'intérêt majeur d'une approche couplée sclérochronologie/géochimie sur des biominéralisations réside dans la résolution temporelle obtenue. Par exemple, l'estimation des températures de l'eau de mer peut se faire à l'échelle de la vie d'un organisme. Sur des coraux

ou sur des huîtres, l'estimation de contrastes thermiques saisonniers à des périodes très reculées (plusieurs millions d'années) de l'histoire de la Terre est possible, à l'heure actuelle, seulement par cette approche.

Cette revue souligne l'importance des biominéralisations dans de nombreux domaines de la recherche actuelle en paléontologie, en préhistoire, en climatologie, en biologie des populations et en écologie. Les formations biominéralisées jouent également un rôle de premier plan dans la biologie et la physiologie des organismes que ce soit dans l'édification du squelette, le stockage d'ions vitaux (Ca⁺⁺), l'équilibre acido-basique ou encore le métabolisme cellulaire (activités enzymatiques).

L'étude des biominéralisations est en plein essor en raison de ses nombreuses applications dans les domaines de la santé humaine (ostéogénèse, pathologies osseuses et dentaires, chirurgie orthopédique...), de la science des matériaux ou des nanotechnologies. L'utilisation en joaillerie de certains biominéraux à haute valeur marchande, comme le squelette axial du corail rouge ou la nacre des mollusques, doit s'accompagner d'une gestion mesurée des ressources naturelles.

S. A.-B., N. A. A. B., J.-M. C., I. D.-C., P.-J. L., G. L., S. M., M. R., L. S., J.-Y. S.

Otolithe, mémoire de l'histoire de vie des poissons

Les otolithes sont des pièces calcifiées situées dans l'oreille interne des poissons qui jouent un rôle dans l'équilibration. Ils sont très utilisés pour estimer les **traits d'histoire de vie** des animaux, car ils présentent une **accrétion permanente** et une stabilité métabolique. Ainsi, tout au long de la vie, l'otolithe enregistre les événements de l'activité physiologique : en zone tempérée, par exemple, l'observation des variations saisonnières permet d'estimer l'âge de l'individu. Au cours de leur formation, ils intègrent de nombreux éléments chimiques présents dans l'environnement, y compris les polluants. Les techniques de **microchimie**, à travers l'analyse de ces éléments, permettent de répondre à de multiples questions : identifier le cours d'eau de naissance d'un poisson migrateur, localiser les épisodes migratoires des poissons **amphihalins** (fluctuations de strontium et calcium notamment), reconstituer la courbe de température du milieu de résidence (isotopes de l'oxygène et du carbone) et par conséquent valider les marques de croissance utilisées pour estimer l'âge. Les otolithes ont des caractéristiques morphologiques propres à chaque espèce de poissons, si bien qu'ils sont très utilisés en taxonomie.

Photo Dr Steven Campana/Bedford Institute of Oceanography (Canada)

