

Formes vivantes : du minéral à l'animé, de l'animé au minéral

Living forms: From mineral to animate, from animate to mineral

Annick Lesne¹

¹ Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée, LPTMC, Paris, France.
Institut de Génétique Moléculaire de Montpellier, IGMM, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France.
lesne@lptmc.jussieu.fr

RÉSUMÉ. De nombreux scientifiques ont étudié l'apparition des formes vivantes à partir du minéral. Des notions fondamentales ont ainsi émergé, allant de la caractérisation des matériaux du vivant à leur auto-organisation par des processus actifs, consommant de l'énergie pour produire des structures ordonnées. Dans un cheminement inverse, les artistes céramistes ont exploré les différentes façons de reproduire les formes vivantes dans la matière minérale, pour dépasser la dualité entre animé et inanimé, entre vivant et inorganique. De nouveaux points de rencontre entre les formes vivantes et la céramique se situent aujourd'hui dans les matériaux bio-inspirés et les morphogenèses organiques.

ABSTRACT. Many scientists have investigated the emergence of living forms from minerals. Fundamental notions arose, from the characterisation of organic materials to their self-organisation through active processes, consuming energy to produce ordered structures. Along the opposite path, ceramicists have explored the different ways to recreate living forms using mineral matter, going beyond the opposition between animated and inanimate entities, between life and inorganic matter. Novel confluences between living forms and ceramics now appear, for instance bioinspired materials and organic morphogenesis.

MOTS-CLÉS. auto-organisation, bio-inspiration, céramique, minéral, morphogenèse, organique.

KEYWORDS. Bio-inspiration, Ceramics, Mineral, Morphogenesis, Organic, Self-organisation.

Introduction : morphogenèse et céramique

Les scientifiques ont abondamment exploré les scénarios possibles d'apparition de la vie à partir du minéral. L'un des scénarios les plus plausibles repose sur la structure et les propriétés particulières des argiles, capables de confiner des molécules entre leurs feuillets et de favoriser les réactions conduisant à des structures moléculaires plus complexes (Maurel & Lambert, 2019). La chimie a depuis longtemps distingué les spécificités de la matière organique, à base de carbone et d'eau, formant les briques du vivant. D'autres études ont documenté les processus de bio-minéralisation, suivant lesquels des organismes vivants produisent des structures minérales, coquilles, squelettes ou carapaces. Nous allons envisager une autre question, celle de la morphogenèse, où l'enjeu est de comprendre comment une forme émerge de l'informe ou de l'uniforme (Bourgine & Lesne, 2006). Certains aspects de la morphogenèse dans le vivant fourniront un contre-point pour discuter comment la céramique peut appréhender les formes vivantes, un défi magnifiquement illustré dans l'exposition *Formes vivantes* qui s'est tenue au musée national Adrien Dubouché de Limoges en 2019-2020.

Formes dirigées ou formes auto-organisées

Les sciences naturelles distinguent deux catégories fondamentales de formes (fig. 1). Il y a d'une part les formes qui se déploient à partir d'un plan préétabli ou dont un maître d'œuvre conduit la genèse de façon centralisée. Les exemples sont variés : empreintes ou fossiles s'expliquant par une forme préexistante (fig. 2A), cônes volcaniques ou canyons s'expliquant par une action extérieure, nids ou maisons produits par l'activité dédiée d'un individu.

Il y a d'autre part les formes qui émergent spontanément, par un processus d'auto-organisation de éléments qui les constituent. La modalité la plus simple est l'auto-assemblage, par exemple de complexes macromoléculaires. Des structures stables et ordonnées peuvent se former spontanément lorsque l'énergie de l'assemblage est inférieure à la somme des énergies des éléments pris isolément, suffisamment inférieure pour compenser la réduction d'entropie correspondant à la structure ordonnée (le critère technique pour déterminer la stabilité d'une structure est la minimisation de son énergie libre $F=U-TS$, où U est l'énergie, T la température absolue et S l'entropie, d'autant plus grande que le nombre de configurations possibles de la structure est élevé).

Des structures ordonnées peuvent également apparaître loin de l'équilibre. Elles découlent alors de la dynamique interne du système, éventuellement modulée par l'environnement (température, nature du substrat, conditions aux limites du système). Un exemple emblématique de forme auto-organisée est celui des structures de Turing, suivant le nom du mathématicien qui en a proposé le mécanisme en 1952 (Turing, 1952) : un mélange initialement homogène de deux réactifs chimiques peut spontanément se ségréger en formant un motif périodique, en taches ou en bandes. Pour cela, certaines conditions doivent être réunies sur les réactions chimiques (couplage d'un activateur et d'un inhibiteur) et sur les propriétés de diffusion des réactifs (l'inhibiteur doit diffuser beaucoup plus vite que l'activateur). Ces structures ont depuis été observées et leur mécanisme validé dans des systèmes chimiques expérimentaux (Lesne, 2012). Ce sont des exemples typiques de ce que le chimiste et physicien Ilya Prigogine (prix Nobel de chimie en 1977) a appelé des structures dissipatives. L'ordre apparaît alors grâce à une consommation continue de matière ou d'énergie (Berrada & Lesne, 2017). Au-delà de ces cas typiques, tout un continuum de situations mêlant auto-assemblage (à l'équilibre) et auto-organisation (loin de l'équilibre) reste encore à explorer (Halley & Winkler, 2008).

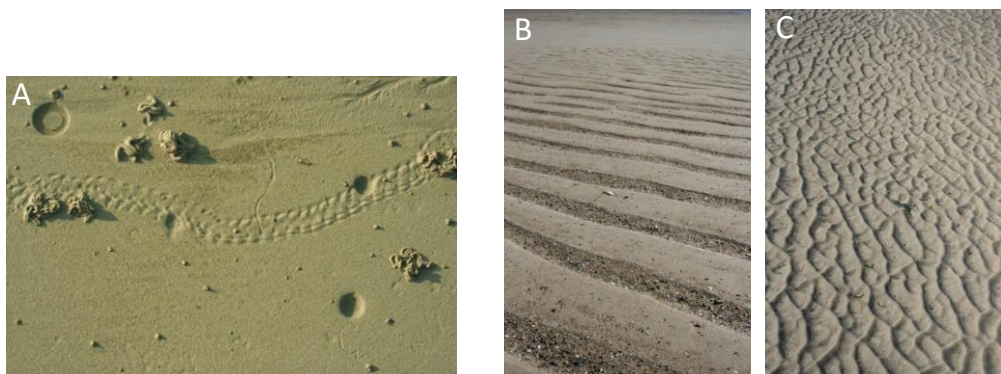


Figure 1. Deux catégories de formes. (A) ici les motifs visibles sur le sable sont des empreintes ou bien une conséquence de l'action d'un organisme individuel (un ver de sable). (B, C) ici, au contraire, les motifs réguliers ou désordonnés résultent de l'auto-organisation des grains de sable en interaction entre eux et avec l'eau environnante.

Des formes vivantes auto-organisées

Les formes auto-organisées sont omniprésentes aussi bien dans la nature inanimée que dans la matière vivante. Mais la reconnaissance du rôle de l'auto-organisation dans le vivant est assez tardive. Il fallait d'abord renoncer à invoquer un Grand Architecte, des idées platoniciennes, ou le déploiement d'embryons préformés pour expliquer l'origine des formes vivantes. La notion d'auto-organisation s'est ensuite opposée à l'idée que tous les composants d'un organisme se développent et s'assemblent sous l'action d'un programme génétique. La présence de structures auto-organisées a d'abord été acceptée pour des formes anecdotiques, par exemple l'explication par un mécanisme à la Turing des motifs périodiques observés chez certaines espèces animales ou végétales, comme les taches du léopard, fig.2B (Liu et al., 2006) et l'arrangement régulier des épines d'un cactus ou des follicules d'où naissent les plumes d'une poule (Lesne, 2012). D'autres mécanismes d'auto-

organisation ont été mis en évidence, par exemple pour expliquer la forme des lichens, **Fig. 2C** (Mathiesen et al., 2011). Le séquençage du génome et une meilleure compréhension des mécanismes suivant lesquels les protéines codées par certains gènes contrôlent l'expression d'autres gènes ont amené l'idée qu'information génétique et auto-organisation étaient en fait des ingrédients complémentaires dans l'origine des formes vivantes (Karsenti, 2018). C'est dans le génome que se trouve la recette pour construire les protéines particulières intervenant dans les réactions métaboliques et les mécanismes de formation des tissus et organes.

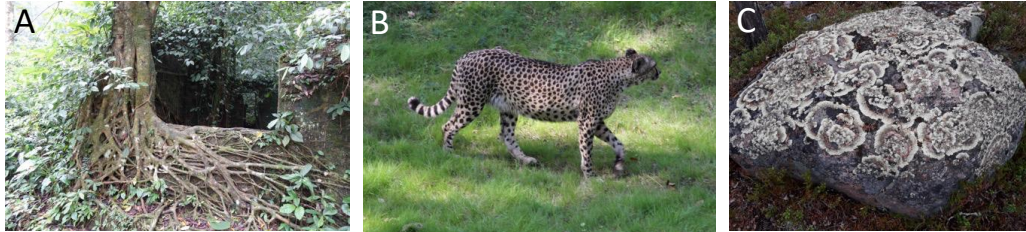


Figure 2. *Formes vivantes. (A) la forme du figuier n'est ici que le reflet de la forme de son support. (B) les taches du léopard s'expliquent par le mécanisme proposé par Turing, combinant réactions locales et diffusion spatiale des réactifs. (C) d'autres mécanismes d'auto-organisation rendent compte de la morphologie que présentent les assemblages de lichens.*

Un exemple démontré d'auto-organisation à l'intérieur de la cellule est le fuseau mitotique (fig. 3). Lors de la division d'une cellule en deux cellules filles (ce qu'on appelle la mitose), les chromosomes sont dupliqués et chaque cellule fille doit recevoir exactement un jeu de chromosomes, pas un de plus, pas un de moins. C'est le fuseau mitotique qui assure cette bonne ségrégation. Il est composé de filaments, les microtubules, capables de s'allonger ou de raccourcir, ce qui permet à leurs extrémités de s'accrocher à des complexes macromoléculaires (d'un côté au centrosome, fixe, correspondant au pôle de la cellule, de l'autre aux kinétochores assurant la jonction avec les chromosomes). Les microtubules peuvent de plus se déplacer l'un par rapport à l'autre grâce à l'action de protéines agissant comme de véritables moteurs moléculaires, agrippés à un filament et se déplaçant sur l'autre en provoquant un mouvement relatif. Le fuseau mitotique est ainsi une structure auto-organisée et dynamique, perpétuellement en train d'ajuster sa forme pour assurer la bonne répartition des chromosomes dupliqués entre les cellules filles lors de la division cellulaire (Karsenti, 2018).

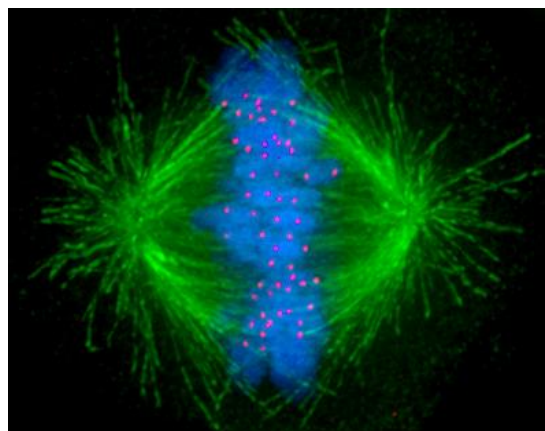


Figure 3. *Le fuseau mitotique, une structure auto-organisée à l'intérieur de la cellule en train de se diviser. En bleu, les chromosomes qui viennent juste de se dupliquer ; en vert, des filaments appelés des microtubules, en rouge, des complexes protéiques, les kinétochores, sur lesquels s'attachent les microtubules et qui jouent un rôle actif dans la ségrégation des chromosomes entre les deux cellules filles.*

Les formes vivantes s'expliquent donc par la conjonction de la génétique et d'une dynamique interne, contrôlée par des mécanismes de régulation et le couperet de la viabilité fonctionnelle de l'organisme. Un point remarquable est la reproductibilité des formes vivantes, malgré la part énorme de hasard existant au niveau microscopique dans les mouvements est les rencontres entre les molécules. Pour reprendre le titre d'un ouvrage d'Henri Atlan sur l'organisation du vivant ([Atlan, 1979](#)), les formes vivantes se situent entre le cristal et la fumée (deux exemples extrêmes d'auto-organisation purement minérale), résultant de mécanismes complexes et multi-échelles d'auto-organisation assujettis au génome, lequel garde en archive non seulement les instructions permettant de fabriquer les protéines régulatrices adéquates, mais aussi les conditions dans lesquelles elles doivent être mise en production et utilisées par l'organisme.

De l'animé au minéral

Les artistes céramistes explorent depuis longtemps les différentes façons de reproduire les formes vivantes dans la matière minérale. Sur cet aspect, la céramique porte une symbolique forte, depuis la création biblique d'Adam à partir de glaise jusqu'à la légende du Golem, être d'argile animé par la puissance de trois lettres hébraïques inscrites sur son front ([Ackerman, 2017](#)). A l'inverse, les contes montrent les personnes ayant failli dans leur quête et les transgresseurs d'interdits changés en statue de pierre. Le passage de l'animé au minéral est la trace la plus fidèle et la plus durable qui nous reste d'êtres disparus, qu'il s'agisse de fossiles ou d'empreintes. Ammonites fossilisées et forêts pétrifiées évoquent concrètement un monde révolu, et les empreintes de pied ponctuent l'histoire de l'humanité, depuis la grotte de Pech Merle, il y a quinze mille ans, jusqu'à la surface de la Lune.

Formes vivantes et céramique

Artefact par excellence, la céramique reproduit les formes vivantes en suivant d'autres lois, en utilisant d'autres matériaux et suivant d'autres processus. La morphogenèse des formes naturelles est autonome, intimement liée aux processus de leur formation et aux matériaux impliqués. Les formes céramiques montrent au contraire la possibilité d'une certaine indépendance de la forme vis-à-vis de son substrat : de la même argile peuvent naître algues et grenouilles, arbres et oiseaux. Ici la production humaine s'écarte de la morphogenèse naturelle, où la forme ne se pense pas sans le substrat dans lequel elle s'inscrit, ni sans les mécanismes qui la produisent.

Un défi relevé par l'artiste céramiste est de reproduire la morphologie perceptible en suivant une morphogenèse totalement différente. Les formes sont modelées par l'artiste selon d'autres contraintes, celles venant du matériau et de sa cuisson. La création céramique peut jouer avec de multiples paramètres: la forme envisagée et ses volumes, mais aussi la plasticité initiale de son matériau ([Debono, 2020](#)), la rugosité de sa surface, et bien sûr ses couleurs. La cuisson est une autre forme de gestation, nourrie par le feu et la chaleur. On retrouve cependant que les formes résultent de la confrontation de forces et de matières ([Lesne & Mozziconacci, 2019](#)), et certaines pièces d'art nouveau soulignent tout particulièrement les tensions et les lignes de forces qui animent les végétaux.

La maîtrise de l'artiste permet d'atteindre assez de vraisemblance et de cohérence pour évoquer pleinement le vivant. C'est peut-être ce qui explique la fascination qu'exercent les formes vivantes céramiques, depuis les images de nos livres d'école montrant Bernard Palissy brûlant ses meubles pour réaliser ses merveilleux plats emplis de feuillages et d'animaux jusqu'aux œuvres les plus récentes. Le naturalisme, en particulier, a porté à sa perfection l'imitation exacte de la nature au niveau de l'apparence visuelle ([Hameau & Harthorne, 2019](#)).

Un autre défi est d'évoquer le mouvement dans une image fixe, renouvelant dans la matière et les trois dimensions les explorations des peintres et les photographes. L'émotion vient d'avoir su capturer, de façon durable mais tout aussi fragile, ce qui n'est qu'un instant de vie suspendu, fig.4.

La tension naît du mouvement arrêté, de la vie capturée dans une autre forme de fragilité. Les formes céramiques diffusent une nostalgie de la vie et du mouvement, qui les rendent d'autant plus précieuses.



Figure 4. *La capture du mouvement. Paire d'oiseaux de paradis (quetzals), porcelaine de Meissen, Johann Joachim Kändler, 1733.*

Les créations en céramique soulignent ainsi l'ambiguïté des formes lorsqu'on se limite à leur apparence, et l'existence de multiples chemins générateurs. Mais c'est l'artiste le demiurge, donnant à la forme ses fonctions, son pouvoir évocateur, sa place dans un univers de réminiscences et de métamorphoses. Par la vraisemblance avec laquelle elles évoquent le vivant, les céramiques donnent à voir la beauté de l'objet naturel en l'amplifiant par sa re-crédation. Elles offrent un double émerveillement, devant la perfection esthétique du vivant et devant celle recréée par l'artiste céramiste.

De nouvelles confluences

Aujourd'hui de nouveaux points de rencontre entre vivant et céramique sont apparus. L'exposition *Formes vivantes* présentait les prothèses de sternum et les prothèses crâniennes conçues par l'entreprise I. Ceram, à Limoges. L'intérêt du matériau céramique est d'être particulièrement bio-compatible et apte à remplacer le tissu osseux, grâce à sa micro-structure et à sa plasticité (Brie et al., 2013, Champion et al., 2019). Ces qualités du matériau céramique permettent également de l'utiliser pour remplacer les exosquelettes coralliens, une opération initiée par la même entreprise I. Ceram. L'expérimentation en cours à l'aquarium de Limoges permet d'envisager de réparer ainsi la grande barrière de corail. Ces avancées mettent la céramique à l'intérieur du vivant. Il n'y a qu'un pas entre prothèses et homme augmenté. Le futur verra peut-être s'animer les chimères en céramique qui depuis le 19^{ème} siècle mêlent imaginaire organique et matière minérale (Hameau et Harthorne, 2019).

Céramiques organiques

L'imitation du vivant peut aller encore plus loin, et reproduire non seulement les formes et leurs usages, mais aussi les mécanismes de leur apparition. Il est devenu possible d'envisager une céramique organique, produisant des formes élaborées suivant les mêmes principes générateurs que

les formes du vivant (Lesne, 2013). On peut imaginer reproduire dans la céramique des mécanismes de croissance ou des processus de pétrification ; manipuler les contraintes mécaniques, comme la gravité ou la tension de surface, pour les utiliser ou s'en jouer ; ou encore, en revenant aux notions présentées au début de ce texte, recréer des mécanismes d'auto-organisation entre les substances colorées utilisées à la surface des céramiques, pour y faire naître des motifs spontanés. Pour reprendre les termes de (Lavaud, 2020), qui propose une exploration artistique de l'émergence de formes par des phénomènes d'auto-organisation, il s'agira « d'intégrer à l'œuvre le processus vital plutôt que son résultat ».

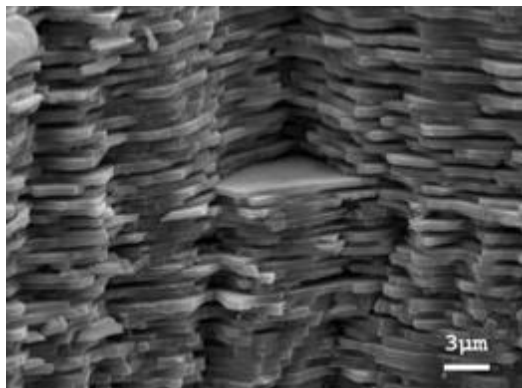


Figure 5. Image par microscopie électronique d'un fragment de nacre naturelle. La structure microscopique en lamelles imbriquées, qui explique la solidité de la nacre, peut aujourd'hui être reproduite dans des matériaux céramiques artificiels.

Les réalisations déjà accessibles sont encore plus fantastiques, par exemple les céramiques auto-réparatrices exploitant une capacité de mobilité de leurs éléments (Hager, 2017). Les mécanismes d'auto-assemblage au niveau moléculaire commencent à être maîtrisés, permettant d'obtenir des matériaux complexes dont la structure interne est contrôlée à de multiples échelles, depuis le niveau atomique jusqu'au niveau macroscopique. C'est par exemple le cas de la nacre artificielle, obtenue par la congélation d'une suspension d'une poudre céramique (ce qu'on appelle un colloïde). La congélation rejette les particules de la poudre entre les cristaux lamellaires de glace, où elles s'assemblent. La structure finale de la céramique, poreuse et organisée comme la nacre naturelle en couches minces à l'échelle micrométrique (fig. 5) est obtenue en éliminant l'eau par sublimation (transition directe de la glace en vapeur). On peut aussi remplacer l'eau par une autre substance pour obtenir un matériau composite, résistant aux fissures, beaucoup moins fragile que la céramique traditionnelle (Deville et al., 2006, Muñoz et al., 2020). Les formes et matériaux céramiques inspirés du vivant n'ont pas fini de nous émerveiller.

Références

- Ackerman A. (coord.) Golem ! Avatars d'une légende d'argile, Hazan, 2017
- Atlan H. Entre le cristal et la fumée : essai sur l'organisation du vivant, Le Seuil, Paris, 1979.
- Berrada H., Lesne A. “ Des formes mouvantes, des formes éternelles ”, Revue PALAIS n°25, Le Rêve des Formes, Juin 2017, pp. 146–158. Texte réédité aux dans Hicham Berrada, Éditions Liénart, 2018.
- Bourgine P., Lesne A. (coords.) Morphogenèse : l'origine des formes, Belin, Paris, 2006.
- Brie J., Chartier T., Chaput C., Delage C., Pradeau B., Caire F., Boncoeur M.-P., Moreau J.J. “ A new custom made bioceramic implant for the repair of large and complex craniofacial bone defects ”. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 41, 2013, pp. 403–407.
- Champion E., Damia C., Magnaudeix A., Pascaud-Mathieu P. “ Les céramiques médicales ”, catalogue de l'exposition Formes Vivantes, dirigé par Jean-Charles Hameau et Céline Paul, Silvana Editoriale, 2019, pp. 184–187.

- Debono M.-W. “ Plis et replis de la matière : un complexe de plasticité ”, Arts et Sciences, 4, 2020, p. 0571.
- Deville S., Saiz E., Nalla R.K., Tomsia A.P. “ Freezing as a path to build complex composites ”, Science, 311, 2006, p. 515.
- Hager M.D. “ Self-healing materials ”, Handbook of Solid State Chemistry, 2017, pp. 201–225.
- Halley J.D., & Winkler D.A. “ Consistent concepts of self-organization and self-assembly ”, Complexity, 14, 2008, pp. 10-17.
- Hameau J.C., Harthorne K. “ Naturalismes ”, catalogue de l'exposition Formes Vivantes, dirigé par Jean-Charles Hameau et Céline Paul, Silvana Editoriale, 2019, pp. 28–33
- Karsenti E. Aux sources de la vie, Flammarion, 2018.
- Lavaud S. “ Emergillience ”, Arts et Sciences, 1, 2017, p. 0180. Arts et Sciences, 4, 2020, p. 0505.
- Lesne A. “ Les motifs et les structures du vivant ”, DocSciences, 14, numéro spécial sur Alan Turing, 2012. Disponible en ligne : <https://interstices.info/alan-turing-les-motifs-et-les-structures-du-vivant/>
- Lesne A. “ Vers une architecture organique ”, Catalogue de l'exposition Naturaliser l'architecture, coordonné par M.A. Brayer et F. Migayrou, Editions HYX, Orléans, 2013, pp. 188–197,
- Lesne A., Mozziconacci J. “ Formes mathématiques, formes physiques, formes vivantes ” in Le Rêve des Formes. Arts, Sciences ... et Cie, dirigé par A. Fleischer et A. Prochiantz, Le Seuil, 2019, pp. 107–112.
- Liu R.T., Liaw S.S., Maini P.K. “ Two-stage Turing model for generating pigment patterns on the leopard and the jaguar ”, Physical Review E, 74, 2006, p. 011914.
- Mathiesen J., Mitarai N., Sneppen K., Trusina A. “ Ecosystems with mutually exclusive interactions self-organize to a state of high diversity ”, Physical Review Letters, 107, 2011, p. 188101.
- Maurel M.C., Lambert J.F. “ Naissance de la vie sur des argiles ”, catalogue de l'exposition Formes Vivantes, dirigé par Jean-Charles Hameau et Céline Paul, Silvana Editoriale, 2019, pp. 34–37.
- Muñoz M., Cerbelaud M., Videcoq A., Saad H., Boule A., Meille S., Deville S., Rossignol F. “ Nacre-like alumina composites based on heteroaggregation ”, J. European Ceramic Society, 40, 2020, p. 5773–5778.
- Turing A.M. “ The chemical basis of morphogenesis ”, Phil. Trans. Roy. Soc. B, 237, 1952, pp. 37–72.

Crédits photographiques

Figures 1A, 1B, 1C, 2A, 2C : © Annick Lesne

Figure 2B : © Thaïs Kjellberg (aimable autorisation)

Figure 3 : Wikimedia Commons, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kinetochore.jpg>

Figure 4 : Quetzal, porcelaine de Meissen, CC0, via Wikimedia Commons

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bird_of_paradise_\(quetzal\)_\(one_of_a_pair\)_MET_DP-12314-001.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bird_of_paradise_(quetzal)_(one_of_a_pair)_MET_DP-12314-001.jpg)

Figure 5 : auteur Fabian Heineman, Wikimedia Commons,

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bruchfläche_eines_Perlmutterstücks.JPG

Biographie

Annick Lesne est directrice de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Physicienne de formation, elle partage son activité entre le Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée (Sorbonne Université & CNRS, Paris) et l'Institut de Génétique Moléculaire de Montpellier (Université de Montpellier & CNRS). Ses recherches portent sur les mécanismes physiques qui participent au contrôle des formes et des fonctions des systèmes vivants.