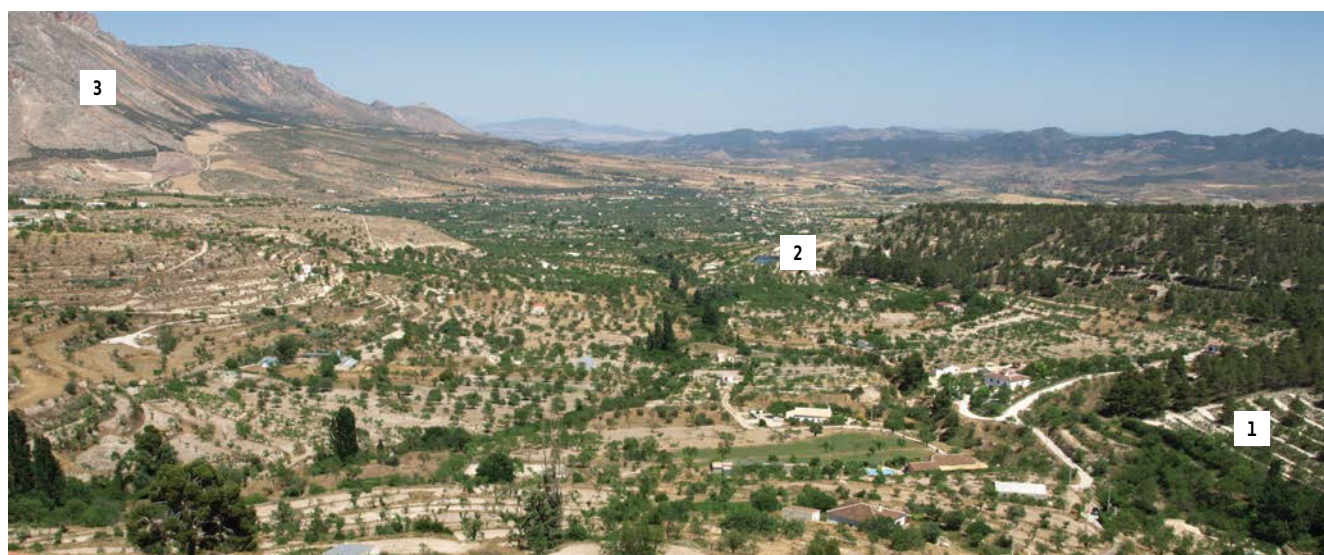




Vélez Blanco, en Andalousie, est un village agricole, où se pratique depuis mille ans un système de partage de l'eau introduit par les Maures. Les terrasses cultivées (1) reçoivent de l'eau par l'intermédiaire d'un vieux réseau de canaux,

qui aboutit aujourd'hui dans un réservoir moderne (2). La colline Muela (3) est à l'origine des sources qui alimentent ce réseau, mais leurs étiages baissent depuis que les forages se multiplient dans la région.

historiques donnent un aperçu de l'organisation de la gestion de ces réservoirs. Contrairement aux cascades de réservoirs des zones rurales, créées et gérées par la population paysanne, les grands bassins étaient gérés par l'administration royale, donc de façon centralisée. Puisqu'ils ne s'asséchaient généralement pas, même si les saisons des pluies du printemps et de l'automne apportaient peu d'eau, ils atténuaient les effets d'un déficit saisonnier en eau.

Aujourd'hui, environ 30 000 bassins sont en usage au Sri Lanka dans une région dont la taille est comparable à celle de l'Occitanie. On investit toujours afin de réaliser de nouveaux réservoirs, de sorte que les réseaux de bassins constituent l'une des composantes importantes du paysage et de la culture de ce pays.

MILLE ANS DE GESTION CONSENSUELLE D'UNE « VEGA »

En Europe aussi existent des terroirs où l'on continue à utiliser les techniques d'irrigation de l'Antiquité ou du Moyen Âge. L'un d'eux est Vélez Blanco, en Andalousie, dans le sud-est de la péninsule Ibérique. Des Romains d'abord, puis des Goths, des Maures et enfin des Espagnols y ont vécu. Le village et son paysage attendant de jardins (des *vegas*) offrent aux chercheurs une occasion unique d'étudier comment un système d'irrigation a pu à la fois fonctionner pendant des siècles tout en s'adaptant aux conditions sociales et techniques changeantes.

La *vega* de Vélez Blanco est une zone de champs en terrasses dont l'irrigation est gérée en commun par leurs propriétaires, tous des habitants de la commune. Plus de 100 kilomètres de canaux reliés à plusieurs

sources souterraines distribuent gratuitement de l'eau dans les champs d'après une rotation complexe et proportionnelle à la surface à irriguer. L'eau provient de sources qui surgissent au pied du mont Maimón, et c'est leur permanence qui explique la fondation du village. Outre cet approvisionnement de base, les agriculteurs disposent aussi de la possibilité d'acheter un volume d'eau supplémentaire aux enchères. C'est surtout au printemps, pour les semailles, ou pendant les mois d'été chauds et secs que la demande augmente et que les prix montent. Le produit des ventes aux enchères de l'eau sert à l'entretien et à la rénovation du réseau de canaux, ce qui rend le système pratiquement autonome.

D'origine mauresque, cette façon de gérer l'eau est pratiquée à Vélez Blanco depuis plus de mille ans. Toutefois, comme en beaucoup d'endroits en Espagne, ce système traditionnel pourrait s'effondrer. Une première raison est liée à l'exode rural : depuis le xx^e siècle, Vélez Blanco a perdu 75 % de sa population. Ce sont surtout les jeunes qui partent... Ensuite, la multiplication dans le sud de l'Espagne de forages équipés de pompes électriques, la plupart illégaux, fait baisser la nappe phréatique et assèche les sources.

Ces problèmes espagnols sont à l'image de ceux du monde : l'eau, surtout dans les régions arides, est une ressource rare, comme l'est aussi la prudence dans sa gestion ! Les quatre exemples que nous avons présentés prouvent que dans le passé, les populations humaines ont été capables de se procurer de l'eau même dans des conditions difficiles. Leur exemple devrait nous aider à mieux utiliser cette ressource précieuse et de plus en plus rare. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Berking et al., **Heavy rainfalls in a desert(ed) city : A climate-archaeological case study from Sudan**, dans L. Giosan et al., *Climates, Landscapes, and Civilizations*, American Geophysical Union, pp. 163-168, 2013.

D. L. O. Mendis, **Environment and conflict : A kuhnian paradigm-based approach to understanding some socio-cultural and economic causes of problems and conflicts in modern irrigation projects in Southern Sri Lanka**, dans *Water for People and Nature*, Ministry of Irrigation and Water Management (dir.), Sri Lanka Water Heritage, pp. 95-122, 2003.

L'ESSENTIEL

> Les mollusques construisent des coquilles de formes complexes avec une précision mathématique.

> La modélisation mathématique montre qu'il suffit de suivre trois règles simples pour reproduire ces formes.

> Ces résultats aident à comprendre pourquoi de nombreuses espèces de mollusques non apparentées sécrètent des coquilles aux formes similaires.

LES AUTEURS



DEREK E. MOULTON
professeur de
biomathématiques à
l'université
d'Oxford,
en Grande-Bretagne



ALAIN GORIELY
professeur
de modélisation
mathématique
à l'université
d'Oxford



RÉGIS CHIRAT
paléontologue et maître
de conférences
à l'université
Claude-Bernard, à Lyon

Comment les coquillages acquièrent leur forme

Spirales, épines, surfaces côtelées... : les coquilles des mollusques ont des géométries complexes et d'une étonnante régularité. Comment ces formes sont-elles produites ? La modélisation mathématique montre que quelques processus mécaniques simples suffisent à engendrer les caractères observés.



Vue aux rayons X d'un peigne
de Vénus (*Murex pecten*),
gastéropode marin de la famille
des Muricidés.

Les mollusques sont de fantas-tiques architectes. Ils se construisent des structures solides qui protègent leur corps mou des prédateurs et des éléments : les coquilles, qui sont d'une robustesse, d'une durabilité et d'une beauté hors du commun. Beaucoup de ces coquillages présentent des formes complexes et spectaculaires, des spirales logarithmiques garnies d'épines bien ordonnées ou d'autres ornements, d'une régularité mathématique presque parfaite. Les mollusques n'ont pourtant aucune notion en mathématiques, évidemment. Les chercheurs se sont donc demandé comment ces humbles créatures produisent des motifs aussi complexes avec une telle précision.

Depuis plus d'un siècle, les scientifiques savent que les cellules, les tissus et les organes doivent obéir aux mêmes forces physiques que le reste de la matière. Mais pendant une bonne partie du xx^e siècle, les biologistes se sont attachés à comprendre comment le code génétique régit la formation de motifs biologiques et à déterminer comment ces motifs fonctionnent. Au cours des dernières décennies, cependant, les chercheurs se sont mis à appliquer la modélisation mathématique, appuyée sur la physique, pour tenter de comprendre comment apparaissent les formes du vivant. Dans cette optique, nos propres travaux ont livré ces dernières années des indices passionnants sur la façon dont les coquillages acquièrent des structures si remarquables.

En utilisant les outils de la géométrie différentielle, la partie des mathématiques qui étudie les courbes et les surfaces, nous avons déterminé que les formes complexes des coquillages découlent de quelques règles simples que suivent les mollusques lorsqu'ils bâtissent leur demeure. Ces règles interagissent avec les forces mécaniques produites au cours de la croissance du coquillage et engendrent une grande diversité de motifs. Nos découvertes contribuent à expliquer comment des caractéristiques singulières telles que les épines sont apparues de façon indépendante dans tant de lignées de gastéropodes (le groupe de mollusques le plus diversifié). Ces organismes n'ont nul besoin de subir les mêmes modifications génétiques pour acquérir le même type d'ornements, car les lois de la physique font l'essentiel du travail.

C'est au manteau du mollusque qu'il incombe de construire la coquille. Cet organe fin et mou sécrète couche après couche une substance riche en carbonate de calcium au niveau de l'ouverture du coquillage. Il lui suffit de suivre trois règles élémentaires pour former la spirale caractéristique des coquilles d'escargots, par exemple, et de nombreuses autres espèces de mollusques.

La première règle est l'*expansion* : en déposant uniformément davantage de matériau qu'à

l'incrément de croissance précédent, le mollusque crée une ouverture un peu plus large à chaque itération. Ce processus engendre un cône à partir d'un cercle initial. La deuxième règle est la *rotation* : en déposant légèrement plus de matériau d'un côté de l'ouverture, le mollusque finit par opérer une rotation complète de cette ouverture, ce qui construit un tore (la forme d'une chambre à air de pneu) à partir d'un cercle initial. La troisième règle est la *torsion* : le mollusque fait tourner les points où a lieu le dépôt. Si l'on n'effectue que les opérations *expansion* et *rotation*, on obtient un coquillage planispiralé comme celui des nautilus. Ajoutez la torsion, et le résultat est ce qu'on appelle une coquille hélicospirale comme celle des escargots.

Pour certains bâtisseurs de coquille, c'est la fin de l'histoire, une demeure toute en élégance et en simplicité. Pour d'autres, quelques fioritures sont de mise. Pour comprendre comment se forment des ornements tels que les épines, il nous faut examiner les forces produites au cours de la croissance du coquillage.

Le processus de sécrétion du coquillage repose sur un système mécanique intéressant. Le manteau est attaché à la coquille par ce qu'on



L'application de trois règles élémentaires suffit pour reproduire les spirales observées



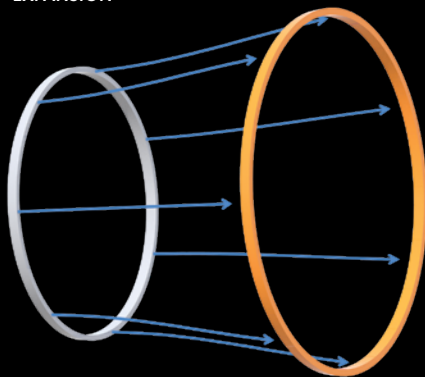
nomme la zone générative, une région de matériau sécrété mais pas encore calcifié. C'est dans cette interaction entre le manteau et la coquille que réside le potentiel de formation de motifs. Tout décalage entre le manteau et l'ouverture de la coquille va imposer une contrainte mécanique au tissu du manteau. Si le manteau est trop petit pour l'ouverture, il devra s'étirer pour y rester attaché. Si le manteau est trop grand, il devra se comprimer. Et si la zone générative se déforme à cause de ces contraintes, le nouveau matériau sécrété par le manteau à ce stade adoptera la déformation du contour et se solidifiera, ce qui exercera une influence accrue sur le manteau à l'incrément de croissance suivant.

Pour résumer, si la coquille ne croît pas exactement au même rythme que le manteau >

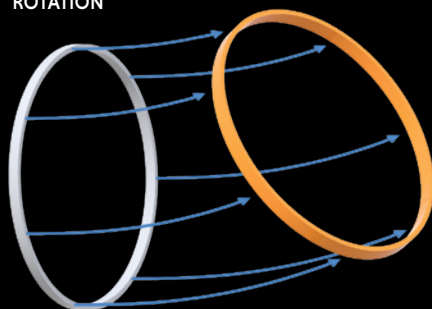
Des spirales

Les spirales des coquilles de mollusques s'obtiennent en suivant trois règles simples. La première est l'*expansion* : à mesure que le mollusque sécrète ses couches successives de matériau pour construire la coquille, il dépose de façon uniforme davantage de matériau à chaque incrément de croissance et crée ainsi une ouverture de plus en plus large. La deuxième règle est la *rotation* : en déposant légèrement plus de matériau sur un côté de l'ouverture, le plan de celle-ci tourne et une forme torique se constitue. La troisième règle est la *torsion* : les points où se dépose le matériau tournent le long du contour. Les diverses combinaisons de ces règles de base produisent les différentes formes spiralées.

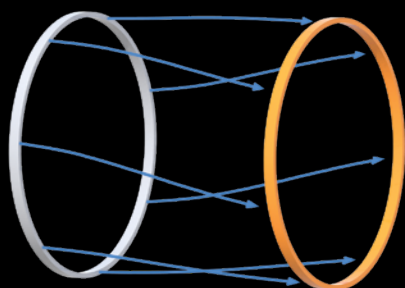
EXPANSION



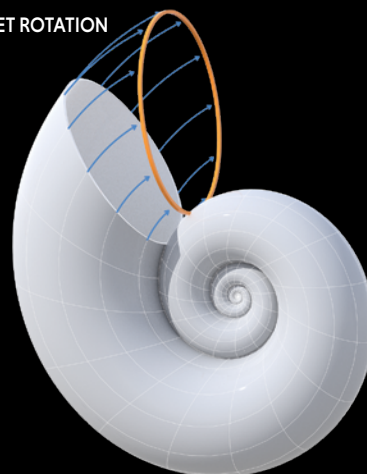
ROTATION



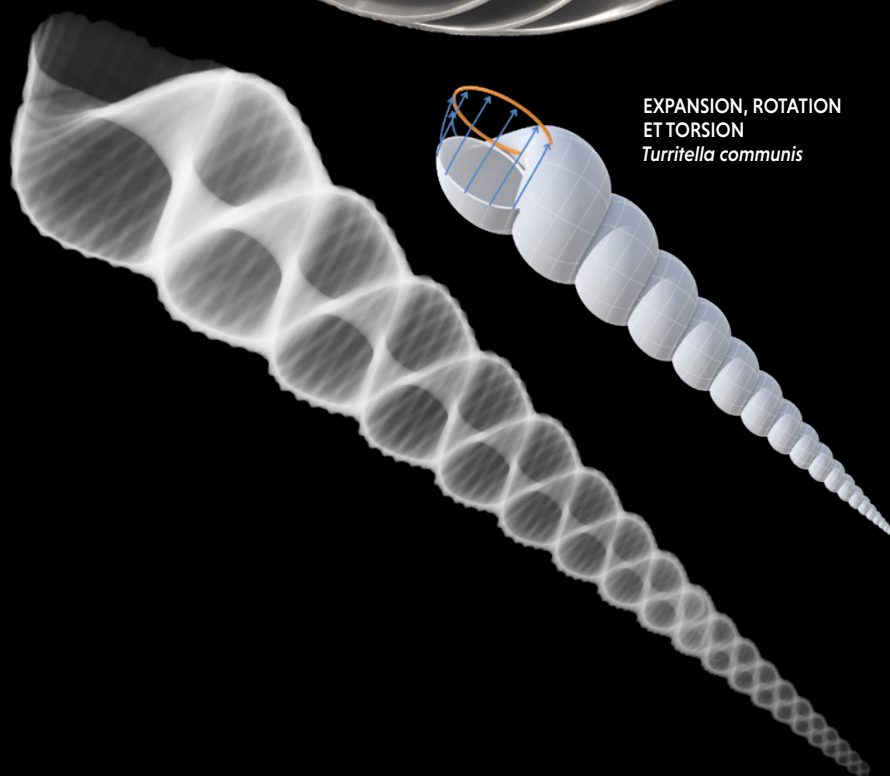
TORSION



EXPANSION ET ROTATION
Nautilus



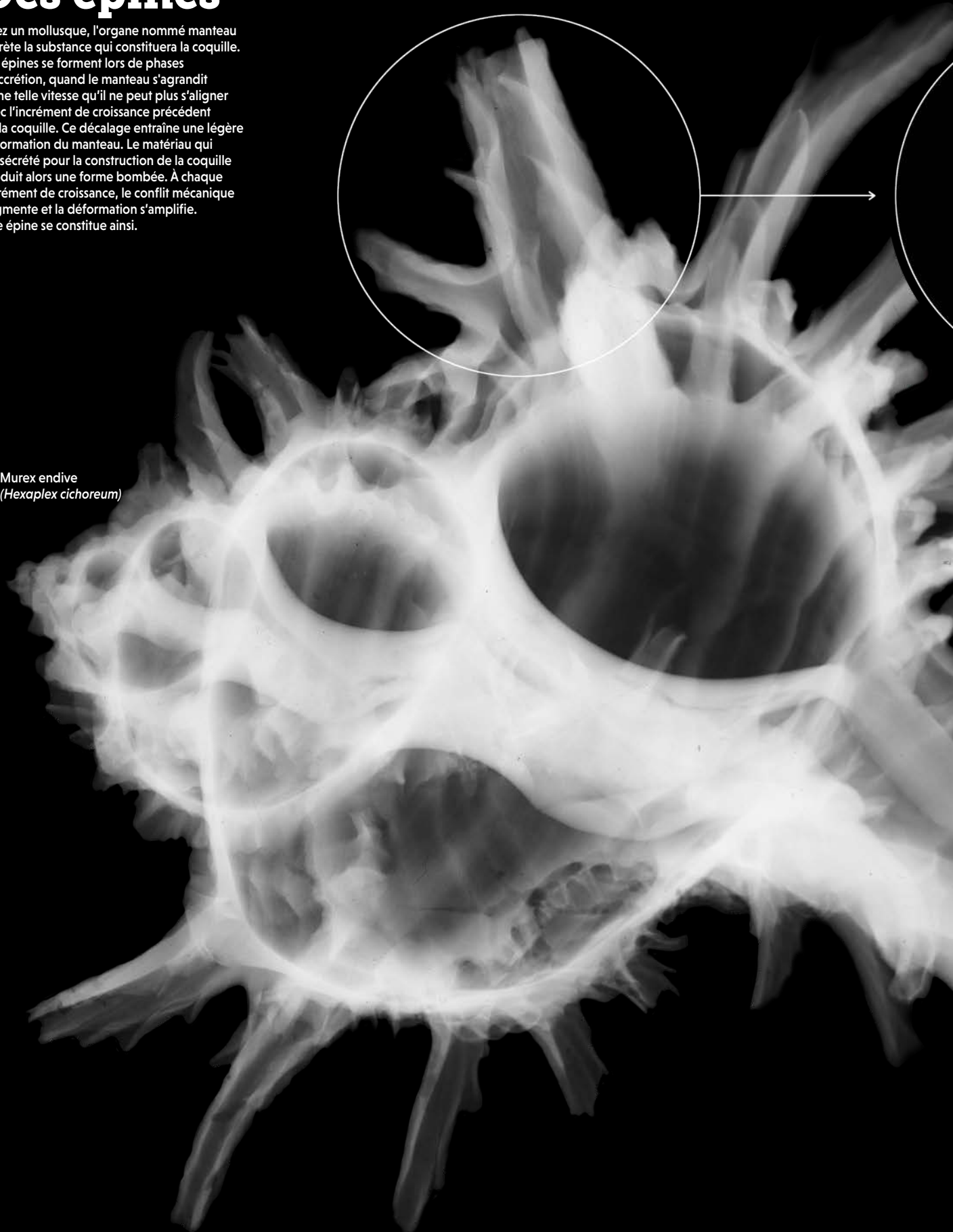
EXPANSION, ROTATION
ET TORSION
Turritella communis

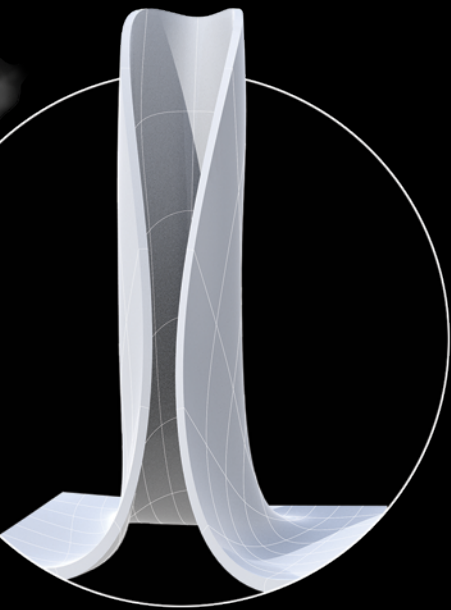


Des épines

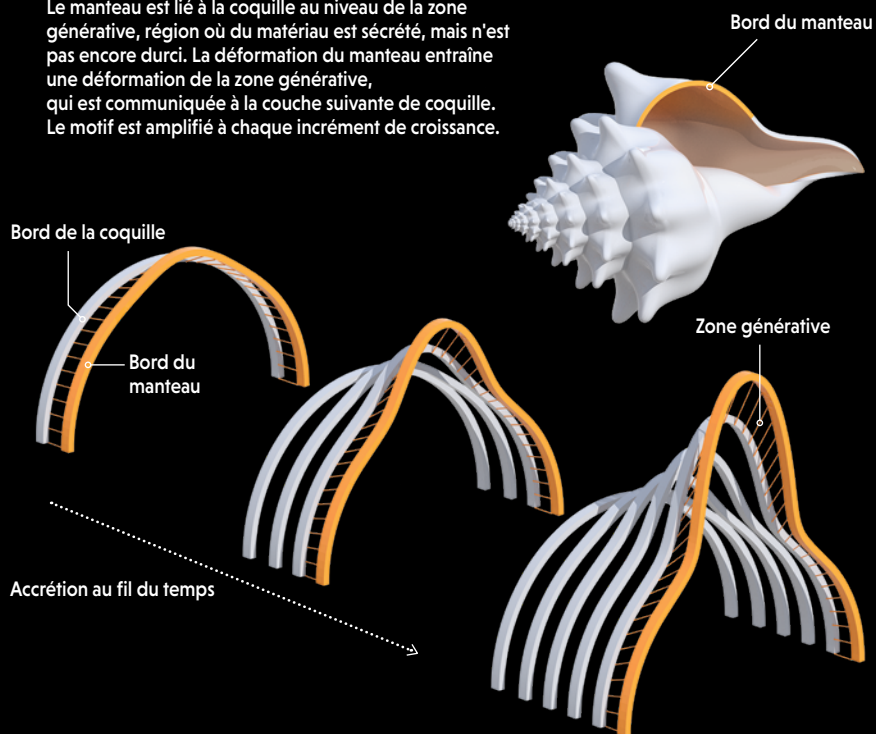
Chez un mollusque, l'organe nommé manteau sécrète la substance qui constituera la coquille. Les épines se forment lors de phases d'accrétion, quand le manteau s'agrandit à une telle vitesse qu'il ne peut plus s'aligner avec l'incrément de croissance précédent de la coquille. Ce décalage entraîne une légère déformation du manteau. Le matériau qui est sécrété pour la construction de la coquille produit alors une forme bombée. À chaque incrément de croissance, le conflit mécanique augmente et la déformation s'amplifie. Une épine se constitue ainsi.

Murex endive
(*Hexaplex cichoreum*)

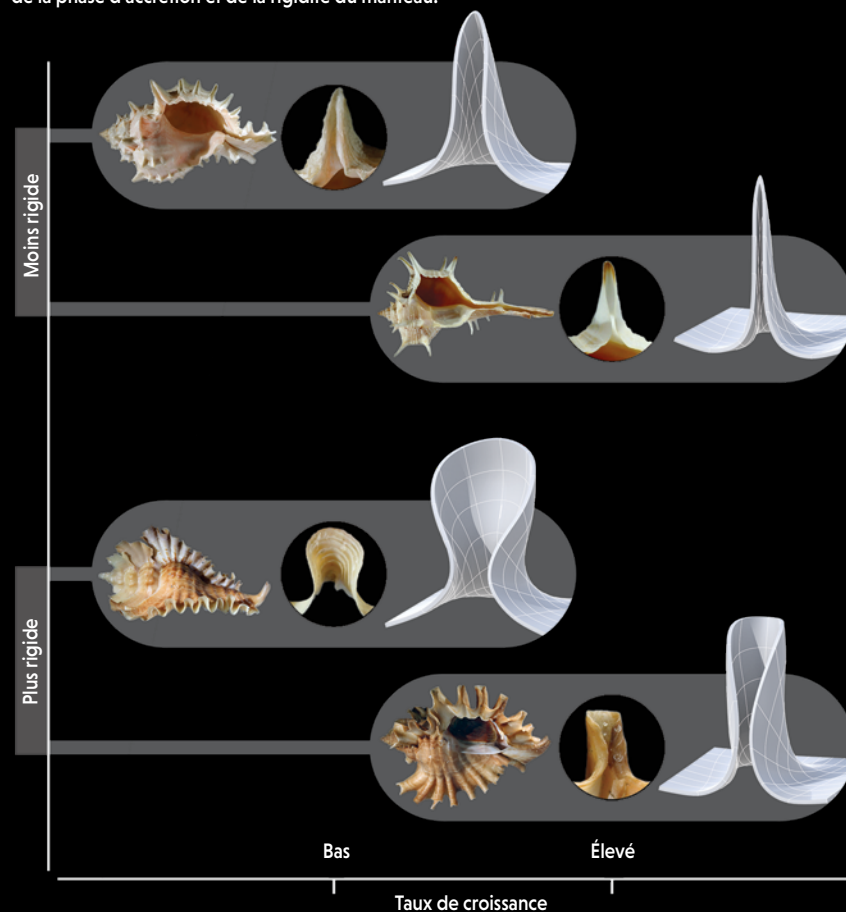




Le manteau est lié à la coquille au niveau de la zone générative, région où du matériau est sécrété, mais n'est pas encore durci. La déformation du manteau entraîne une déformation de la zone générative, qui est communiquée à la couche suivante de coquille. Le motif est amplifié à chaque incrément de croissance.



La forme de l'épine dépend principalement du taux de croissance du manteau au moment de la phase d'accrétion et de la rigidité du manteau.



> du mollusque, des déformations apparaissent, ce qui engendre des caractéristiques que nous identifions comme des ornements.

Les épines constituent le type d'ornementation le plus marqué. Elles pointent généralement à angle droit par rapport à l'ouverture du coquillage et s'étendent souvent jusqu'à plusieurs centimètres au-delà de la surface de la coquille. Ces projections se forment à intervalles réguliers, correspondant aux poussées de croissance du manteau. Lors d'une poussée de croissance, le manteau se développe si vite qu'il acquiert un périmètre supérieur à celui de l'ouverture de la coquille. Ce décalage entraîne un léger bombement du manteau. Le matériau qu'il sécrète prend alors la forme d'une petite bosse. À l'étape suivante, le manteau s'est encore agrandi et est de nouveau trop large par rapport à l'ouverture, ce qui a pour effet d'amplifier le pli initial. Nous avons fait le raisonnement que ce processus répété de croissance et d'interaction mécanique engendre une rangée d'épines, dont le motif précis est principalement déterminé par le taux de croissance lors de la poussée et par la rigidité du manteau.

Afin de tester cette idée, nous avons développé un modèle mathématique de manteau qui

croît sur un contour qui se modifie à chaque incrément de croissance. En effectuant des essais de notre modèle avec les taux de croissance et les propriétés du matériau mesurés sur les mollusques, on observe l'émergence de toute une gamme de formes d'épines, similaires à celles observées sur les coquillages réels. Notre hypothèse en sort donc confortée.

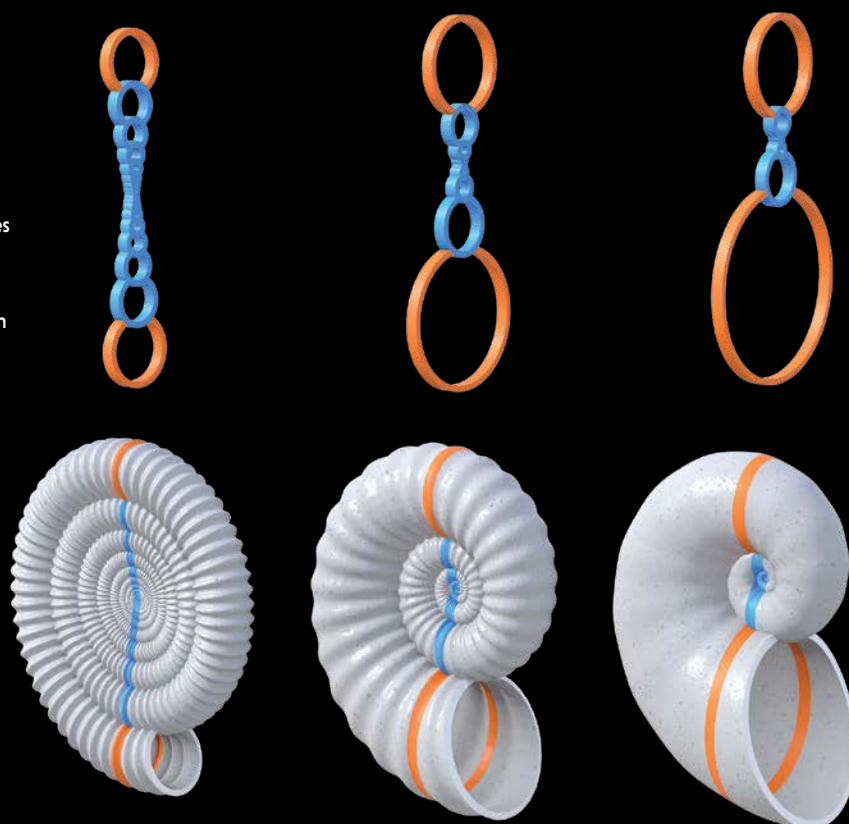
COQUILLES CÔTELÉES

Les épines ne sont pas le seul ornement possible des coquilles des mollusques. Un autre type de motif est présent sur les coquilles des ammonites, groupe de mollusques céphalopodes aujourd'hui disparu et apparenté aux actuels nautilus, poulpes et leurs cousins. Les ammonites ont dominé dans les mers pendant 335 millions d'années avant de disparaître il y a environ 65 millions d'années. L'abondance de leurs fossiles, ainsi que la grande diversité de leurs formes et leur taux d'évolution élevé en ont fait le groupe d'invertébrés fossiles le plus étudié.

La caractéristique la plus frappante d'une coquille d'ammonite, au-delà de sa forme de spirale logarithmique plane, est son caractère côtelé: la spirale présente des côtes qui se succèdent régulièrement. Cette ornementation

Des côtes

Les coquilles des ammonites, un groupe de mollusques éteint, présentent des côtes régulières qui se forment parallèlement au bord du coquillage. Les modélisations mathématiques indiquent que ce motif d'ornementation est le produit de forces opposées exercées par le manteau et la zone générative, qui forment un système oscillatoire de tension et de compression. Une lente expansion de l'ouverture du mollusque conduit à des côtes denses (à gauche), tandis qu'une expansion rapide conduit à des coquilles lisses (à droite).



découle sans doute du même conflit mécanique qui produit les épines, mais le motif est complètement différent. Les forces sont les mêmes, mais s'exercent avec des amplitudes différentes, et sur une géométrie différente.

L'ouverture de l'ammonite est circulaire chez de nombreuses espèces. Si le rayon du manteau est supérieur au rayon de l'ouverture actuelle, le manteau sera comprimé, mais pas assez pour engendrer le degré d'instabilité élastique nécessaire pour produire les épines. Au lieu de cela, le manteau pousse vers l'extérieur, et le rayon de la coquille augmente lors de l'incrément de croissance suivant. Mais ce mouvement vers l'extérieur est contrecarré par la zone générative, qui agit comme un ressort antagoniste ayant tendance à maintenir l'orientation de la coquille telle qu'elle est.

Nous avons supposé que l'effet de ces deux forces opposées est un système oscillatoire: le rayon de la coquille augmente, ce qui réduit la compression du manteau, mais, ce faisant, il grandit trop et met le manteau en état de tension. Celui-ci tire alors vers l'intérieur pour réduire la force de tension, ce qui finit par diminuer trop le rayon de l'ouverture, jusqu'à mettre le manteau dans un état de compression. Une description mathématique de cet «oscillateur morphomécanique» a confirmé notre hypothèse: ce modèle oscillant produit une succession régulière de côtes, avec une longueur d'onde et une amplitude qui augmentent au cours de la croissance et du développement du mollusque. Le modèle prédit fidèlement de nombreuses formes connues d'ammonites.

La modélisation mathématique prédit également que plus le taux d'expansion de la coquille est grand (c'est-à-dire plus l'augmentation de la taille de l'ouverture de la coquille est rapide), moins les côtes sont prononcées. Ces résultats aident à expliquer l'observation selon laquelle une courbure accrue de l'ouverture est corrélée à des côtes plus marquées, tendance que les paléontologues ont remarquée depuis plus d'un siècle.

Cette relation entre le taux d'expansion de l'ouverture et l'aspect plus ou moins côtelé apporte également une explication mécanique et géométrique simple à une énigme de longue date relative à l'évolution des mollusques. Il s'agissait de comprendre pourquoi les coquilles des nautilus fossiles (famille des Nautilidés) sont restées à peu près lisses depuis au moins 200 millions d'années, à l'instar de la coquille de l'actuel genre *Nautilus*, ce qui a conduit un certain nombre d'observateurs à suggérer que ce groupe n'aurait que peu évolué sur cette période. En effet, les rares espèces de nautilus qui subsistent aujourd'hui dans les océans Indien et Pacifique sont souvent qualifiées de fossiles vivants. Cependant, notre modèle biophysique de croissance montre que la nature lisse des

coquilles de Nautilidés est simplement la conséquence mécanique d'une expansion rapide de l'ouverture. La lignée des Nautilidés a peut-être évolué davantage que ne le suggère la morphologie de leur coquille, mais comme les motifs ornementaux caractéristiques utilisés par les

Les côtes de la coquille des ammonites seraient le produit d'un système oscillatoire

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Delahaye, **L'algorithme des coquillages**, *Pour la Science* n° 485, pp. 80-85, mars 2018.

A. Goriely, **The Mathematics and Mechanics of Biological Growth**, Springer, 2017.

A. Erlich et al., **Morphomechanics and developmental constraints in the evolution of ammonites shell form**, *Journal of Experimental Zoology B*, vol. 326(7), pp. 437-450, 2016.

R. Chirat et al., **Mechanical basis of morphogenesis and convergent evolution of spiny seashells**, *PNAS*, vol. 110(15), pp. 6015-6020, 2013.

paléontologues pour distinguer les espèces font défaut dans ce groupe, le taux d'évolution réel des Nautilidés reste difficile à estimer.

Il nous reste beaucoup à apprendre sur la façon dont les mollusques bâtissent leurs formidables demeures. Une courte visite d'une belle collection de coquillages donne à voir plusieurs motifs que les scientifiques ne sont pas encore en mesure d'expliquer.

Par exemple, plus de 90% des gastéropodes sont dextres, c'est-à-dire que si l'on place la pointe de leur coquille vers le haut, l'ouverture se trouve du côté droit. Moins de 10% sont senestres, c'est-à-dire que leur coquille s'enroule dans l'autre sens, vers la gauche. Les scientifiques commencent tout juste à explorer les mécanismes qui conduisent à cette prédominance de la forme dextre.

On ne connaît pas non plus l'origine de certaines ornementsations d'un raffinement extrême, comme le motif plus ou moins fractal d'épines que l'on trouve sur un certain nombre d'espèces de mollusques de la famille des Muricidés (les murex). Par ailleurs, même si nous savons que les facteurs environnementaux influent sur le taux de croissance des coquillages, on connaît mal l'impact de ces variables sur leur forme.

Ces énigmes et d'autres concernant les mollusques à coquilles, organismes modèles pour explorer des questions plus larges sur la formation des motifs dans la nature, montrent que nous avons encore fort à faire. Mais la compréhension des forces physiques mises en jeu dans le développement de ces animaux est à l'évidence l'une des clés nécessaires pour les élucider. ■



L'ESSENTIEL

> Plus de 500 fragments d'ADN existent chez les chimpanzés et d'autres mammifères, mais pas chez les humains : ils ont été perdus au cours de l'évolution.

> Trois de ces séquences contiendraient des « interrupteurs » qui activent des gènes.

> La perte de l'un aurait favorisé la croissance du cerveau. Un autre aurait facilité la marche debout.

> Le troisième aurait contribué à l'évolution de nos comportements vers une concurrence moins intense entre les hommes, et plus de coopération et d'attachement entre hommes et femmes.

L'AUTEUR



PHILIP L. RENO
professeur de sciences
biomédicales au Collège
de médecine ostéopathique
de Philadelphie

L'ADN perdu qui a fait l'homme

Cerveau volumineux, posture debout, stratégie reproductive favorisant le couple... Ces caractéristiques des humains seraient apparues grâce à la disparition, au fil de l'évolution, de fragments clés de notre génome.



Rencontre des grands singes lors d'une visite au zoo ne laisse pas indifférent. D'un côté, leur ressemblance avec nous est frappante. Leurs expressions faciales et la façon dont ils saisissent des objets sont étrangement similaires aux nôtres. Mais, d'un autre côté, chimpanzés, bonobos, orangs-outans et gorilles sont si différents de nous. Notre marche debout, les capacités de notre cerveau et d'autres caractères nous démarquent sans conteste. Quels événements déterminants, au cours de l'évolution, nous ont rendus si spécifiquement humains? Pourquoi sont-ils survenus? Et comment?

Pendant des décennies, les anthropologues et les biologistes évolutionnistes ont buté sur ces questions. Mais aujourd'hui les outils modernes de la génétique leur ouvrent de nouvelles perspectives. Ils ont ainsi montré que, contrairement à ce que l'on pourrait croire, certaines caractéristiques parmi celles qui nous distinguent de nos plus proches parents ne proviennent pas d'ajouts à nos gènes. Au contraire, elles résultent de disparitions de morceaux clés d'ADN.

De nombreuses recherches en laboratoire, dont les miennes, ont suivi la trace de certains de ces segments d'ADN perdus en comparant les génomes humains avec ceux d'autres mammifères et d'humains archaïques: les Néandertaliens et nos cousins moins connus, les hommes de Denisova. Nous avons découvert que pendant les 8 millions d'années écoulées depuis que la lignée humaine a dévié de celle des chimpanzés, les génomes de nos ancêtres se sont délestés de fragments d'ADN qui activent des gènes clés pendant le développement embryonnaire. Les Néandertaliens partagent ces pertes: elles se sont donc produites tôt dans notre histoire évolutive.

En fait, la perte de ces séquences d'ADN serait liée à des traits exclusivement humains: des cerveaux volumineux, une marche debout et des habitudes particulières d'accouplement.

L'ÉPINOCHÉ QUI AVAIT PERDU SES NAGEOIRES

J'ai commencé à m'intéresser à l'évolution humaine dans les années 2000, lors de mon doctorat auprès de l'anthropologue Owen Lovejoy, à l'université d'État de Kent, en étudiant les différences entre les squelettes mâles et femelles chez nos parents humains éteints. J'espérais poursuivre mes recherches dans ce domaine pour comprendre ce qui, dans nos gènes et programmes de développement embryonnaire, avait changé au cours de notre histoire évolutive, et j'ai eu la chance d'obtenir un postdoctorat auprès de David Kingsley, de l'université Stanford, qui travaillait justement sur ces questions.

Entre autres travaux, l'équipe de David Kingsley avait identifié des modifications de l'ADN impliquées dans l'évolution de poissons, les épinoches. Notamment, la disparition d'un fragment d'ADN chez les épinoches d'eau douce s'était révélée avoir causé la perte des nageoires pelviennes épineuses chez cette espèce. Ce morceau d'ADN perdu contenait une sorte d'interrupteur nécessaire à l'activation, dans certaines cellules et à un stade précis du développement, d'un gène impliqué dans le développement de l'épine pelvienne.

Si un tel scénario s'était produit chez les épinoches, pourquoi pas chez les humains? De subtils changements du lieu et du moment où



Les génomes des humains et des chimpanzés diffèrent de 100 millions de bases



s'activent les gènes au cours du développement auraient alors favorisé l'apparition, au cours de l'évolution, de caractères propres à l'espèce humaine.

Inspirés par ces travaux sur l'épinoche, nous sommes partis en quête de tels interrupteurs qui auraient disparu chez les humains au cours de l'évolution. Aujourd'hui, on dispose de génomes séquencés d'humains et de singes, ainsi que d'outils statistiques pour les analyser, ce qui a rendu possibles nos expériences. Avec certains collègues de l'équipe de David Kingsley, nous nous sommes associés à Gill Bejerano, biologiste et informaticien de l'université Stanford, et au doctorant Cory McLean pour concevoir nos expériences.

Retrouver des fragments manquants d'ADN n'est pas une tâche facile, car les génomes sont vastes. Le nôtre contient 3,2 milliards de bases (les constituants de l'ADN), parmi lesquelles environ 100 millions diffèrent entre les humains et les chimpanzés. Comment réaliser notre expérience? Pour comprendre notre approche, quelques précisions sont nécessaires.

Dans le génome d'une espèce, les segments d'ADN qui jouent un rôle important sont préservés de façon très fidèle au cours de l'évolution. En outre, plus deux espèces sont proches, plus leurs séquences génétiques sont >

ALLUMER ET ÉTEINDRE LES GÈNES

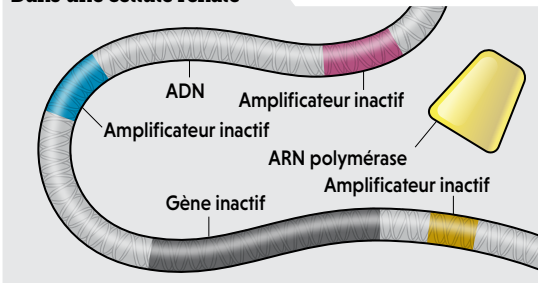
Toutes les cellules du corps humain contiennent les mêmes gènes, mais ceux-ci ne s'expriment ni dans toutes les cellules ni en permanence. Des différents profils d'expression dépendent la croissance et le fonctionnement des diverses parties du corps. Les interrupteurs qui activent l'ADN, nommés amplificateurs, participent au contrôle de ces profils d'expression. Parfois, plusieurs amplificateurs modulent l'expression d'un même gène, changeant ses effets d'un endroit à un autre. Les interrupteurs présents chez d'autres animaux, mais disparus chez les humains, sont peut-être à l'origine de caractères propres à notre espèce.

COMMENT UN AMPLIFICATEUR AGIT

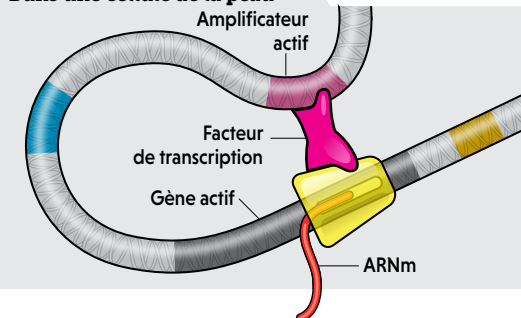
Imaginons un gène contrôlé par trois amplificateurs, dont le statut (actif ou inactif) est différent dans une cellule rénale (à gauche) et dans une cellule de la peau (à droite). La cellule rénale ne produit pas de facteur de transcription, une molécule nécessaire à l'activation des amplificateurs et à l'action de l'ARN polymérase (en jaune), une enzyme

qui décode l'ADN. La cellule de la peau, en revanche, produit un facteur de transcription (en rose) qui se lie à l'amplificateur rose. Le gène est alors activé et l'ARN polymérase se met en marche, transmettant, sous la forme d'une molécule d'ARN messager (ARNm, en rouge) les instructions du gène à la cellule.

Dans une cellule rénale



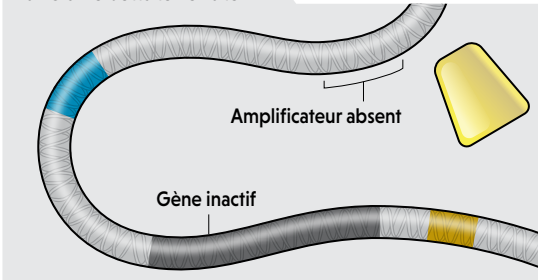
Dans une cellule de la peau



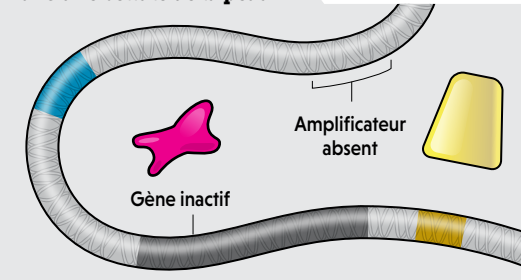
QUAND UN AMPLIFICATEUR DISPARAÎT

Si l'amplificateur rose est absent, le gène dans la cellule rénale (à gauche) est toujours inactif. En revanche, dans la cellule de la peau (à droite), le gène précédemment actif est maintenant inactif

Dans une cellule rénale



Dans une cellule de la peau



NOS INTERRUPTEURS DISPARUS

Pour trouver des interrupteurs disparus chez les humains, les chercheurs comparent leur ADN non codant avec celui de chimpanzés, de macaques et de souris. Certaines séquences, présentes chez toutes ces espèces, sont sans doute importantes pour tous les mammifères (triangles). D'autres, absentes chez la souris, ne sont importantes que pour les primates (cercles). Des modifications observées seulement chez les humains ont peut-être joué un rôle clé dans notre évolution (rectangles). Enfin, des séquences présentes chez les souris, chimpanzés et macaques, mais absentes chez les humains ont pu contribuer à l'apparition de caractéristiques humaines uniques (pentagones).

