

**L**es 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<sup>e</sup> 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



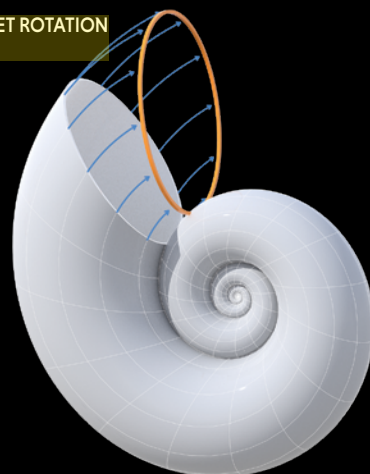
nomme la zone générative, une région de matériau sécrété mais pas encore calcifié. C'est dans cette interaction entre le manteau et la coquille que réside le potentiel de formation de motifs. Tout décalage entre le manteau et l'ouverture de la coquille va imposer une contrainte mécanique au tissu du 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 >

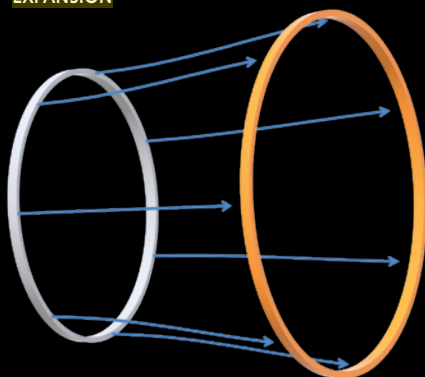
# Des spirales

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.

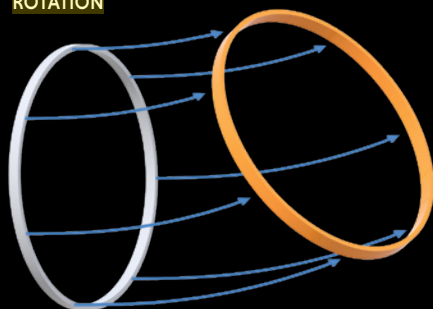
EXPANSION ET ROTATION  
Nautilus



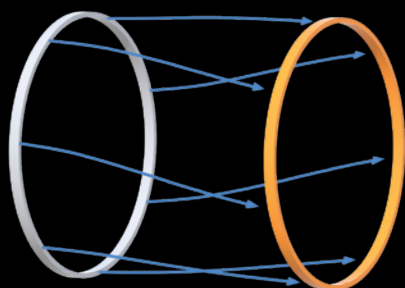
EXPANSION



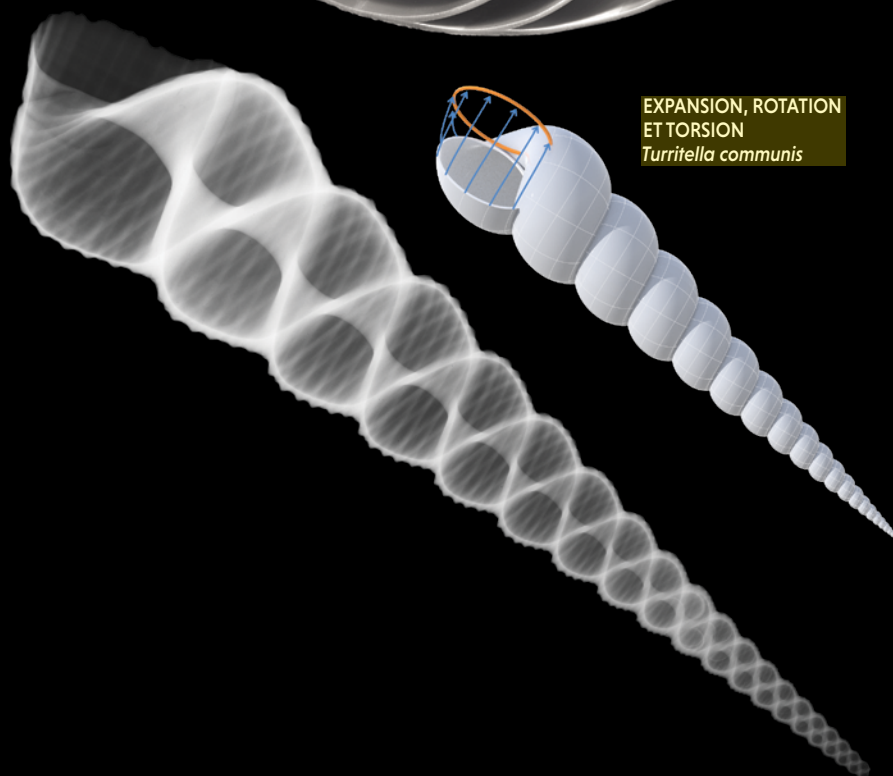
ROTATION



TORSION



EXPANSION, ROTATION  
ET TORSION  
*Turritella communis*

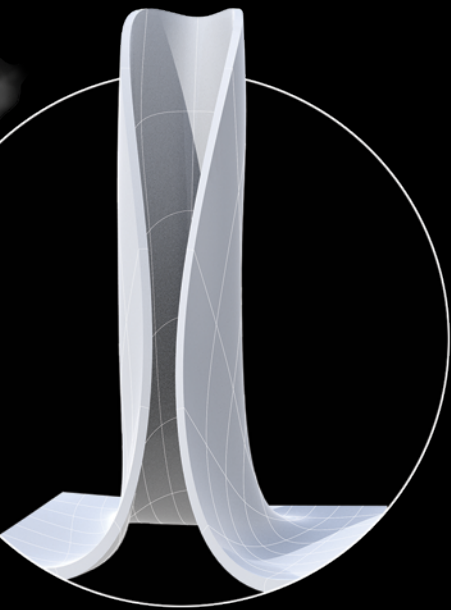


## Des épines

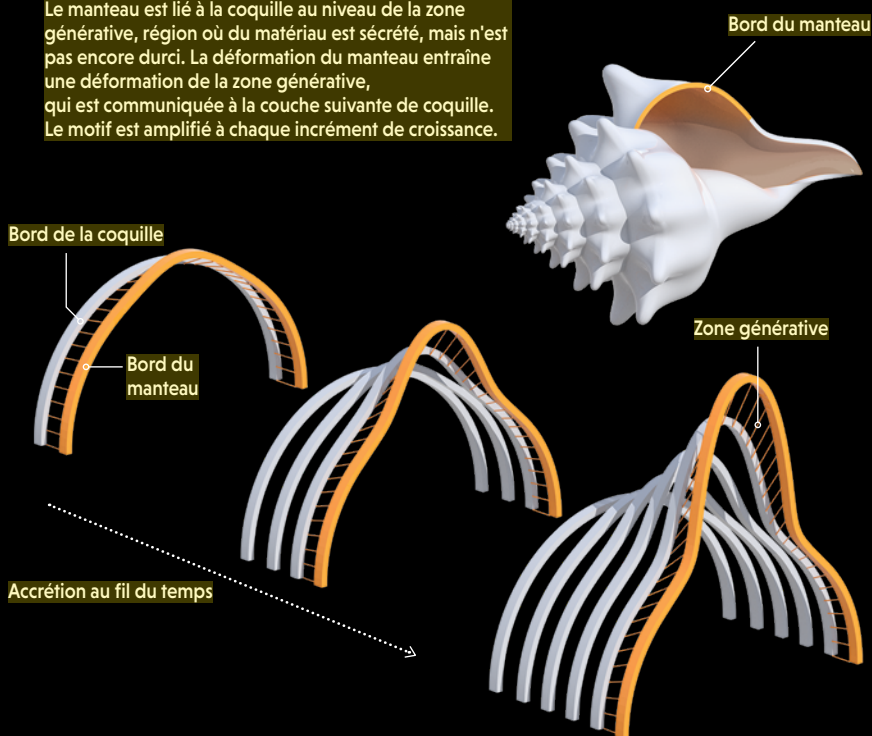
Chez un mollusque, l'organe nommé manteau sécrète la substance qui constituera la coquille. Les épines se forment lors de phases d'accrétion, quand le manteau s'agrandit à une telle vitesse qu'il ne peut plus s'aligner avec l'incrément de croissance précédent de la coquille. Ce décalage entraîne une 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*)

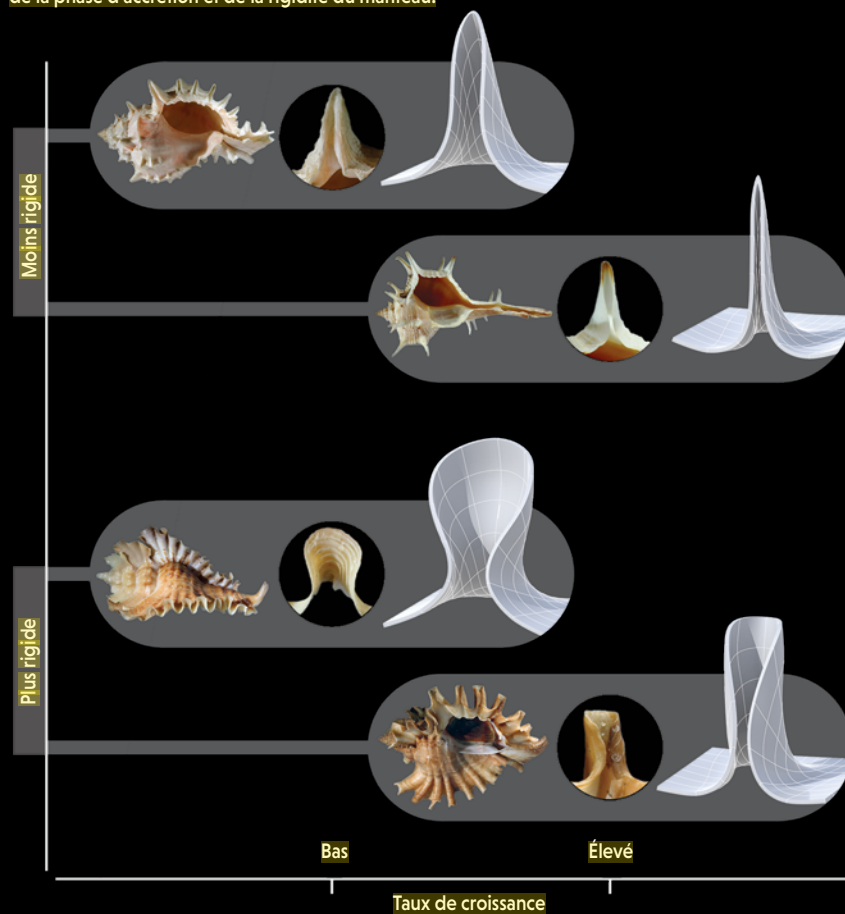




Le manteau est lié à la coquille au niveau de la zone générative, région où du matériau est sécrété, mais n'est pas encore durci. La déformation du manteau entraîne une déformation de la zone générative, qui est communiquée à la couche suivante de coquille. Le motif est amplifié à chaque incrément de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

