

Clac végétal et uppercut de crevette

Certains animaux ou plantes effectuent des mouvements étonnamment rapides, en mettant à profit la mécanique de surfaces courbes semi-rigides.

Pour capturer sa proie ou la tuer, il faut agir vite et fort. Comment le faire lorsqu'on est une plante carnivore, dépourvue de muscles, ou une crevette ? En stockant l'énergie sous forme élastique et en la libérant d'un coup. La dionée attrape-mouches (*Dionaea muscipula*) ferme ainsi ses mâchoires végétales en un dixième de seconde, tandis que la crevette-mante *Odontodactylus scyllarus* assène son « coup de poing » en deux millisecondes (voir les figures 1 et 2). Point commun de ces deux champions de rapidité : ils stockent l'énergie en déformant une paroi élastique courbée.

Dionée : une fermeture... éclair !

Le piège de la dionée se compose de deux feuilles se faisant face. Quand un insecte se pose sur l'une des faces internes de ces mâchoires végétales, celles-ci se referment brusquement et capturent la proie – qui sera ensuite lentement digérée. Comment cette plante produit-elle un mouvement, aussi rapide de surcroît ? Par un mécanisme analogue à celui à l'œuvre dans les fleurs qui s'ouvrent le matin pour se refermer le soir.

Grâce au phénomène d'osmose, les cellules végétales contrôlent leur teneur en eau et leur pression interne en modi-

fiant la concentration intracellulaire de certains ions. Lorsque la concentration ionique à l'intérieur d'une cellule augmente, de l'eau est aspirée vers l'intérieur de la cellule à travers ses parois : la cellule se gonfle. Ce phénomène est réversible, et quand la concentration ionique diminue, la cellule se dégonfle. Dans un pétale, ces deux effets se produisent simultanément : les cellules d'une des faces du pétale se gonflent tandis que celles de l'autre face se dégonflent. La face aux cellules dégonflées devient concave, celle aux cellules gonflées convexe. Ainsi, les modifications de pression cellulaire se traduisent par des mouvements macroscopiques.

Qu'en est-il des cellules de la dionée ? Des observations récentes ont révélé quelques particularités. Les cellules de la face externe des deux feuilles du piège sont très allongées et disposées le long de la surface de la feuille, perpendiculairement à l'axe qui joint les deux feuilles. Les parois de ces cellules sont en outre renforcées par des microfibrilles latérales qui font obstacle à un gonflement uniforme. Tout changement de volume de ces cellules se traduit essentiellement par un allongement. Les cellules de la face interne ne se déformant que très peu, il s'ensuit une modification de la courbure de la feuille, initialement convexe (recourbée vers l'intérieur).

Quand un malheureux insecte touche un cil de la dionée, des cellules mécano-transductrices créent un signal qui sti-



1. La « puce », jouet en forme de calotte que l'on retourne, inverse sa courbure brusquement, ce qui lui permet de sauter en l'air et de réjouir les enfants. Avant cette transition brutale, la surface élastique s'est lentement déformée, jusqu'à atteindre le seuil de la transition. La

dionée, plante carnivore, utilise un phénomène analogue : l'insecte posé sur la face interne de la feuille déclenche une réaction physiologique qui déforme peu à peu les feuilles. Au bout d'un tiers de seconde, la courbure des feuilles franchit un seuil et le piège se referme en un dixième de seconde.

mule les cellules et les fait grossir par osmose. La courbure de la feuille change jusqu'à s'inverser brusquement, piégeant l'insecte entre les deux feuilles.

Mais pourquoi donc cette fermeture est-elle si fulgurante, beaucoup plus rapide que ne le permettraient les transferts d'eau à travers les membranes cellulaires ? Tout s'éclaire quand on fait le rapprochement avec l'inversion de courbure de la puce, ce petit jouet élastique de forme hémisphérique qui saute en l'air quand on le retourne (voir la figure 1). Le principe mécanique à l'œuvre est identique.

Prenons l'exemple d'une feuille plane ; on peut la plier facilement dans un sens ou dans l'autre. Ce n'est pas le cas avec une surface courbe, telle une calotte de sphère. Lorsqu'on cherche à aplatir cette surface en réduisant la courbure selon une direction, on constate qu'elle se replie dans la direction perpendiculaire, ce qui engendre des forces s'opposant à la déformation recherchée.

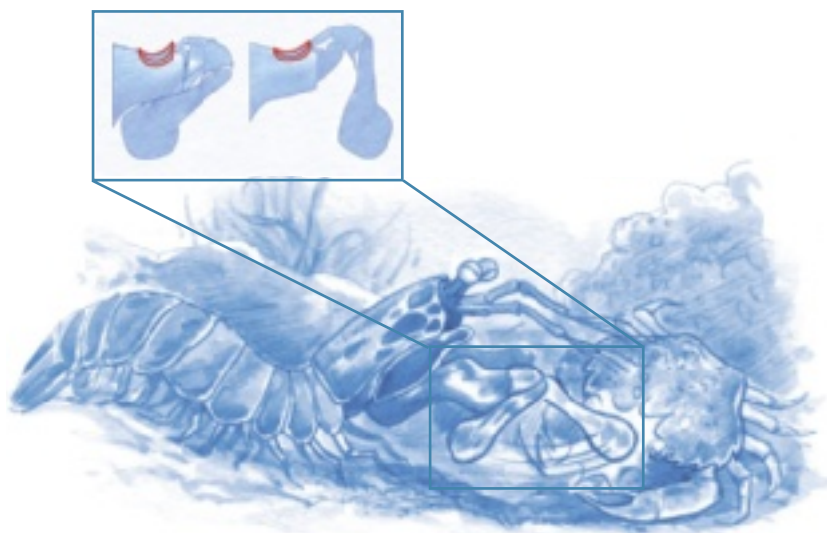
La dynamique de la déformation consistant à inverser la courbure dépend de la nature du matériau. Si celui-ci est très élastique, les forces d'opposition engendrées sont modérées, et par conséquent la courbure diminue et s'inverse progressivement. En revanche, si l'élasticité du matériau est faible, de fortes contraintes naissent et le matériau passe brusquement d'une forme à une autre, de la même façon qu'une poutre en compression ploie soudainement. C'est l'instabilité dite de flambage, transition brutale entre deux formes extrêmes stables.

La vitesse de ce basculement est régie par un seul paramètre, déterminé par les caractéristiques géométriques du matériau (épaisseur, longueur, courbures initiales). Elle est d'autant plus grande que l'épaisseur du matériau est faible et sa longueur, ou sa courbure, élevée. Toutefois, cette rapidité a un prix, car le délai entre l'amorce du mouvement et le basculement augmente aussi.

Pour en revenir à la dionée, la nature est bien faite : la géométrie de ses feuilles correspond au seuil d'instabilité de leurs surfaces. Cet excellent compromis correspond à une phase préparatoire d'un tiers de seconde et à une fermeture en un dixième de seconde. Que la feuille soit moins rigide et la fermeture serait trop lente, qu'elle soit plus rigide et la phase préparatoire durerait trop longtemps : l'insecte s'échapperait.

Une propriété analogue est utilisée par la crevette-mante, qui s'attaque à des crabes et autres petits animaux en perçant leur carapace. Elle a certes des muscles, mais ceux-ci ne peuvent expliquer ses performances spectaculaires. La vitesse de sa frappe varie entre 14 et 24 mètres par seconde, son bras a une vitesse de rotation comprise entre 670 et 990 radians par seconde, tandis que l'accélération peut atteindre 60 à 114 kilomètres par seconde carrée, soit quelque 10 000 fois l'accélération de la pesanteur, le tout ne durant que 2,4 millisecondes !

La puissance nécessaire par unité de masse est de l'ordre de $4,7 \times 10^5$ watts par kilogramme. Elle est au moins 100 fois



2. La crevette-mante assène un coup de patte en deux millisecondes. Pour frapper aussi rapidement, la crevette a au préalable emmagasiné de l'énergie élastique dans un élément de carapace en forme de selle de cheval (en rouge dans le schéma). La frappe correspond à une détente brutale de ce « ressort », relayée par un système de bras articulés pour amplifier le mouvement.

supérieure à celle qu'un muscle peut fournir. Il faut donc au préalable stocker cette énergie. Pourquoi pas sous forme élastique ? Là encore, la tension nécessaire est bien plus élevée que celle supportée par un tendon ou un muscle. Le « ressort » mis en jeu doit par conséquent travailler en compression. Pour agir rapidement, il ne doit pas être massif tout en étant résistant.

L'énergie de la crevette stockée dans une selle de cheval

Une tige ne conviendrait pas, à cause des risques de flambage. Alors quoi ? Comme la dionée, la crevette-mante stocke son énergie dans une surface élastique – ici en forme de selle de cheval. Dans une première étape, cette surface est progressivement déformée au moyen de muscles, et empêchée de reprendre sa forme initiale grâce à un dispositif à cliquet. Dans une seconde étape, le « ressort » se détend et un système mécanique complexe de bras articulés transforme cette détente de faible amplitude en mouvement de grande ampleur. Les deux leviers successifs sont très dissymétriques : le premier, très court, amorce un mouvement de rotation que le second, beaucoup plus long, transforme en mouvement linéaire. La frappe est tellement rapide qu'elle produit de la cavitation, c'est-à-dire l'apparition de bulles au sein de l'eau, phénomène qui participe sans doute à l'endommagement de la carapace de la proie.

Y. FORTERRE *et al.*, *How the Venus flytrap snaps*, in *Nature*, vol. 433, pp. 421-425, 2005.

S. N. PATEK *et al.*, *Deadly strike mechanism of a mantis shrimp*, in *Nature*, vol. 428, pp. 819-820, 2004.