

droitier la voit tourner dans le sens contraire des aiguilles d'une montre), le frottement, solide, entre la boule et la piste provoque une force latérale, régie par les lois de Coulomb: dès qu'il y a glissement entre la boule et la piste, la force de frottement est égale au produit du poids de la boule par le coefficient de frottement entre la boule et la piste. Comme cette force est constante, les lois de la dynamique montrent que la trajectoire de la boule est une parabole, mais dès que le glissement cesse et que la force s'annule, elle devient rectiligne uniforme (à vitesse constante). Dans ces conditions, il est théoriquement possible d'avoir une trajectoire qui s'achève avec les 6° désirés sans que la boule ne sorte de la piste et ne tombe dans les gouttières. Mais la sensibilité de la déviation à la valeur du coefficient de frottement et la brièveté de la phase parabolique, compte tenu des vitesses (de translation et de rotation) qu'on peut donner à la boule, la rendent impossible à obtenir en pratique.

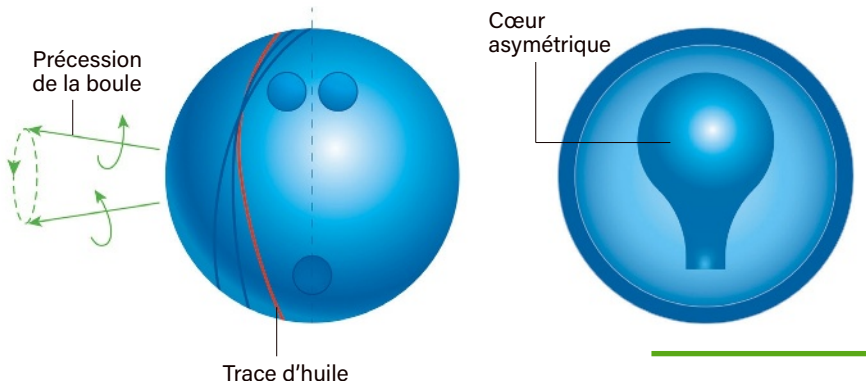
DE L'HUILE, MAIS PAS TROP

C'est là qu'un élément invisible à l'œil non averti intervient: la tête de piste (c'est-à-dire le début) est recouverte d'huile. L'objectif est d'abord de réduire le plus possible la force de frottement lors de l'impact de la boule avec la piste juste après le lancer. Malgré une piste et une boule déjà traitées pour réduire le frottement, sans huile, l'échauffement local atteindrait 500 °C et serait destructeur à la longue. Huiler la piste réduit encore plus les frottements et donc l'échauffement, mais complique alors l'exécution d'une trajectoire courbe. C'est pourquoi la piste n'est pas huilée sur toute sa longueur. En pratique, il existe de très nombreuses façons de répartir l'huile qui rendent le jeu plus facile (on huile plus le milieu que les bords, ce qui rabat les boules vers le centre) ou plus difficile (huilage uniforme sur toute la largeur). Le résultat est que la trajectoire de la boule se déroule en 3 phases: une partie rectiligne, où la boule glisse sur l'huile tout en tournant sur elle-même, puis une trajectoire parabolique (appelée la *hook*, c'est-à-dire le «crochet») sur la piste sèche, et enfin une trajectoire rectiligne, où la boule se met à rouler sans glisser.

Tout semble réglé, mais hélas, le diable se niche dans les détails: durant toute sa trajectoire sur la partie huilée, la

LES SECRETS D'UNE BOULE

Lors de la première phase de la trajectoire, les endroits de la surface de la boule qui entrent en contact avec la piste se recouvrent d'huile (à gauche). Pour éviter que ces surfaces n'entrent à nouveau en contact avec la piste et permettre aux boules d'« accrocher » dès qu'elles atteignent la zone non huilée, celles-ci sont conçues de sorte que leur axe de rotation effectue un mouvement de précession. Pour cela le cœur des boules est constitué d'un noyau, composé d'un matériau dense, qui n'a pas de symétrie sphérique (à droite).



surface de la boule qui entre en contact avec la piste se couvre d'huile. Puisque la boule est animée d'un mouvement de rotation, il s'agit d'un cercle. Mais une fois arrivée sur la partie sèche de la piste, c'est cette même surface qui entre en contact avec le bois: la boule va continuer à glisser et ne va pas aussi bien accrocher que si elle aussi était sèche. Ce n'est que lorsque toute l'huile accumulée se sera redéposée sur la piste que la boule accrochera vraiment.

La solution à cela est de se débrouiller pour que la surface de la boule qui entre en contact avec la piste soit toujours «sèche». Comment? Avec une boule dont l'intérieur n'est pas homogène. Au centre de la boule se trouve un noyau plus dense que le reste et de forme non sphérique. Cela engendre un mouvement de précession: l'axe de rotation de la boule n'est plus fixe. Le résultat est que c'est toujours une portion de surface sèche qui entre en contact avec la piste. Résultat, le *hook* se produit dès que la boule arrive sur la partie sèche de la piste. On trouve toute une diversité de formes de noyaux. Ajoutez à cela les différentes possibilités de revêtement extérieur, de leur état de surface... et vous disposerez d'un choix considérable de boules, que vous soyez expert ou non. De quoi réussir un jeu parfait, soit douze *strikes* consécutifs, et mériter un total... respect! ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Frohlich, *What makes bowling balls hook?*, *American Journal of Physics*, 2004.

D. C. Hopkins et J. D. Patterson, *Bowling Frames: Paths of a Bowling Ball*, *American Journal of Physics*, 1977.

L'AUTEUR

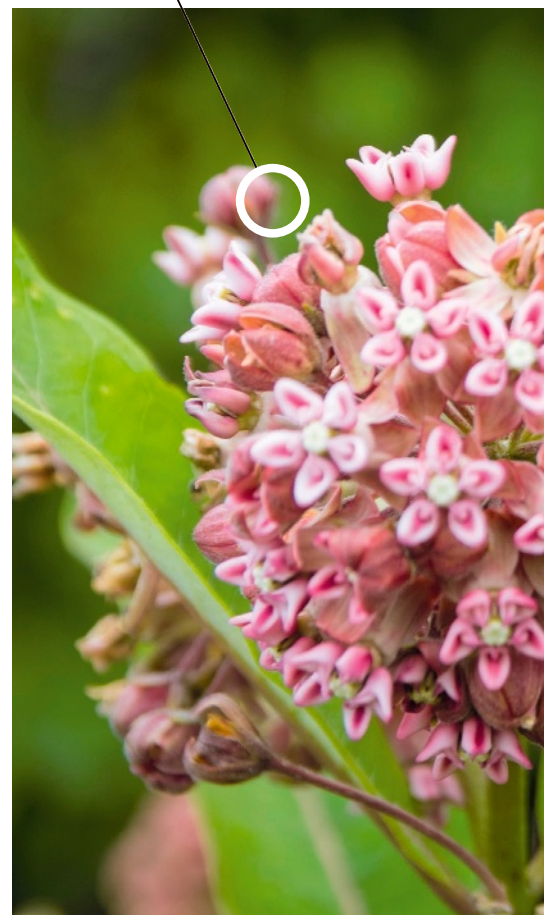


HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite
de biologie évolutive
à Sorbonne Université,
à Paris

LE MONARQUE, LE CARDINAL ET L'ASCLÉPIADE

Insensible au poison que l'asclépiade produit, le papillon monarque non seulement se nourrissait de ses fleurs sans dommage, mais était devenu toxique pour ses prédateurs. Le cardinal à tête noire, cependant, n'avait pas dit son dernier mot...

La plupart des espèces d'asclépiades sont toxiques pour nombre d'animaux. Le genre *Asclepias* compte plus de 200 espèces principalement réparties sur les continents africain et américain.



Le monarque (*Danaus plexippus*) est le célèbre papillon qui effectue des migrations sur le continent nord-américain, des grands lacs dans le nord-est des États-Unis jusqu'au Mexique. Ce lépidoptère de grande taille, coloré, est toxique pour ses éventuels prédateurs – surtout des oiseaux. Et pour cause. La chenille se nourrit essentiellement sur des asclépiades, des plantes à latex abondant (d'où leur dénomination anglaise de *milkweed*, «herbe à lait»). Or celles-ci synthétisent une molécule très toxique pour le cœur: un glycoside (un sucre associé à une autre molécule) qui bloque la pompe sodium-potassium ($\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$), une enzyme plantée dans la membrane cellulaire et responsable, chez les animaux, du maintien au repos des cellules excitables ou de leur retour au repos après excitation.

Un tel poison paraît une précieuse protection contre les herbivores. Pourtant,

les monarques n'en ont cure: non seulement ils ne sont pas intoxiqués, mais ils stockent le glycoside, lequel, maintenant, les protège contre d'éventuels prédateurs. Enfin c'est ce qu'on pensait, mais récemment, Simon Groan, de l'université de Californie à Riverside, et Noah Whiteman, de l'université de Californie à Berkeley, se sont aperçus que plusieurs prédateurs des monarques utilisent le même mécanisme pour déjouer à leur tour la protection de ces insectes. On ne change pas une recette qui fonctionne...

LA BOTTE DU MONARQUE: PAS SI SECRÈTE ?

Depuis longtemps, les zoologistes savent que différents oiseaux se nourrissent de monarques, comme le cardinal à tête noire (*Pheucticus melanocephalus*) et l'oriole d'Abeillé (*Icterus abeillei*), ainsi que des mammifères, notamment la souris à oreilles noires (*Peromyscus melanotis*).



Hervé Le Guyader
a récemment publié:
**Ma galerie
de l'évolution**
(Le Pommier, 2021).



Monarque (*Danaus plexippus*)
Envergure des ailes : 9-10 cm

Si la vie larvaire du monarque a lieu exclusivement sur des asclépiades, le papillon adulte diversifie sa nourriture.

EN CHIFFRES

4 000 KM

À l'automne, le papillon monarque parcourt jusqu'à environ 4 000 kilomètres lors de sa migration du nord-est de l'Amérique au centre du Mexique.

4,5 CM

La chenille du monarque subit cinq mues avant de se métamorphoser en papillon, chaque stade larvaire qu'elles délimitent durant trois à cinq jours. À la dernière mue, elle mesure jusqu'à 4,5 centimètres de long, contre 2 à 6 millimètres à la première.

78 %

L'enzyme Na⁺-K⁺-ATPase, cible du poison de l'asclépiade, est très conservée dans le règne animal. Ses séquences protéiques présentent 78 % d'identité entre insectes et mammifères, et 87 % d'identité entre les insectes.

Le cardinal à tête noire (environ 19 centimètres de long) est l'un des prédateurs du monarque. Oiseau migrateur, il rejoint comme le papillon le centre du Mexique à l'automne, mais en provenance du nord-ouest de l'Amérique.



Mais c'est une chose d'observer que des prédateurs sont insensibles à la toxine, une autre de prouver qu'ils utilisent le même mécanisme.

D'abord, quel est ce mécanisme? C'est une difficile enquête, amorcée par différents laboratoires américains au début de ce siècle, qui a permis de décrypter l'action du glycoside sur l'enzyme. La toxine se lie à une boucle de cette protéine, ce qui bloque son activité (voir l'encadré page 94). Or, chez le monarque, l'enzyme présente une très faible affinité pour le glycoside, en raison – au moins partiellement – de la substitution, dans une boucle spatialement proche de la première, de l'acide aminé en position 122 (les acides aminés

sont les constituants des protéines), une asparagine, par un autre (une histidine).

D'autres insectes étant aussi connus pour résister au glycoside, en 2012, Susanne Dobler, à l'université de Hambourg, en Allemagne, et ses collègues ont voulu savoir si le mécanisme en jeu était le même. Ils ont donc étudié, outre le monarque, 17 insectes insensibles provenant de quatre branches différentes de l'arbre du vivant. À leur grande surprise, ils n'ont trouvé la même substitution d'acide aminé que chez un seul coléoptère. Chez les autres insectes, les substitutions différaient. Ainsi, pour acquérir une telle adaptation, les insectes, dont les branches ont divergé depuis 300 millions d'années, ont suivi des

chemins évolutifs différents, ce que l'on appelle des « convergences ».

Pourtant, en examinant chez les 18 insectes les substitutions sur l'ensemble de la boucle qui, chez le monarque, présente une mutation en position 122, l'équipe a repéré que chez 11 d'entre eux, l'acide aminé en position 111 (normalement une glutamine) est remplacé par un autre. Elle a alors décidé d'expérimenter sur des cellules de drosophile et d'y réaliser des substitutions aux positions 122 et 111. Elle a ainsi constaté qu'introduire une valine en 111 et une histidine en 122 accroissait de manière inattendue la résistance au glycoside, bien plus que la somme des deux