

> s'agissait d'un défi lancé par le physicien Jim Pantaleone, de l'université de l'Alaska à Anchorage. Prenez une carabine (c'est facile aux États-Unis...), placez-la bien verticalement sous un bloc parallélépipédique de bois posé sur un support, et tirez une balle. Est-ce que la hauteur à laquelle s'élève le bloc dépend de la position de l'impact ?

Non, répondra-t-on rapidement. Il s'agit d'un choc mou (la balle reste logée dans le bloc) et juste après le choc, la quantité de mouvement de l'ensemble balle + bloc est égale à la quantité de mouvement initiale de la balle (celle du bloc étant initialement nulle). Cette loi fondamentale permet de calculer sans ambiguïté la vitesse de l'ensemble après l'arrêt de la balle et donc la hauteur qui sera atteinte. Cette prédiction est d'ailleurs parfaitement vérifiée lorsqu'on tire au centre du bloc, ou légèrement à côté.

En revanche, au-delà d'une certaine distance du centre, plus l'impact est décentré, plus le bloc monte haut ! Comment expliquer ce fait ?

UN COUPLE QUI PROPULSE

Lorsque la balle pénètre dans le bois, elle est ralentie et, en vertu de la loi de l'action et de la réaction, pousse sur le bloc jusqu'à ce qu'elle s'y immobilise. La force (variable) qui en résulte met en mouvement le bloc et, plus précisément, accélère son centre de masse. Mais simultanément, cette force exerce un couple qui fait tourner le bloc sur lui-même.

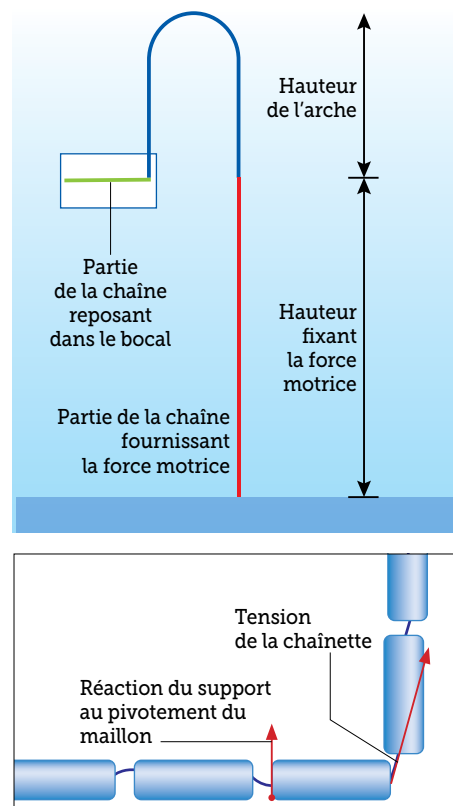
Si ce couple est faible, la rotation du bloc est suffisamment lente pour que la vitesse de l'arête du bloc située du côté opposé à l'impact et en contact avec le support soit verticale : le bloc décolle sans s'appuyer sur le support et monte à la hauteur donnée par la loi de conservation de la quantité de mouvement.

Au contraire, si le couple est important, la rotation induite est rapide et l'arête en question s'enfoncerait dans le support si celui-ci n'était rigide. En pratique, l'arête reste immobile et appuie fortement sur le support tandis que le bloc se met à pivoter autour de cette ligne de contact. Au cours de cette phase très brève, le bloc subit donc de la part du support une force importante, dirigée vers le haut, qui s'ajoute à la force due à l'impact de la balle.

Comme l'angle de rotation du bloc lors de cette phase est faible, les forces qui agissent sont presque verticales. Il s'ensuit que l'accélération du centre de masse est plus importante et le bloc monte donc plus haut qu'avec un impact

LA PROPULSION D'UN MAILLON

Le même effet qui produit un supplément de poussée pour un bloc posé sur un support (voir l'encadré page précédente) est à l'œuvre dans le phénomène de la chaîne-fontaine, où une chaînette semi-rigide se déverse hors d'un bocal. La principale force qui agit ici est la tension de la chaîne, due au poids de la partie suspendue entre le bocal et le sol (en rouge sur le schéma ci-contre). Cette tension est transmise jusqu'au premier segment ou maillon posé horizontalement dans le bocal. Ce maillon subit donc une force quasi verticale au niveau de son extrémité droite. Cela le fait pivoter, d'où une poussée supplémentaire vers le haut due à la réaction du support au niveau de son extrémité gauche.



de balle centré. Dans le cas d'un bloc peu épais, cette situation survient dès que l'on décentre le tir de plus d'un sixième de la longueur de la pièce de bois.

Quel est le rapport avec la chaîne-fontaine ? Les deux ingrédients nécessaires à l'effet précédent, une force initiale décentrée et une rigidité suffisante pour assurer la rotation en bloc du solide posé, sont justement présents au niveau des segments de la chaînette.

C'est particulièrement flagrant avec la chaîne de macaronis : lorsqu'un segment s'apprête à quitter le fond du récipient, il subit à son extrémité, de la part du segment précédent, une force quasi verticale égale à la tension de la chaîne. Sa rotation, due au couple exercé, est entravée par le support, d'où une force supplémentaire qui agit sur son autre extrémité. Le segment acquiert donc une accélération et une vitesse supérieures à celles qu'il aurait acquises sous l'effet de la seule tension de la chaîne. Celle-ci peut ainsi s'élever et donner l'illusion d'une fontaine d'un nouveau genre.

Il existe d'autres phénomènes apparentés. Par exemple, une chaîne qui tombe sur une table verra sa vitesse de chute augmenter, et si l'on tire rapidement sur une chaîne à plat, une partie se redressera et présentera une ondulation caractéristique. Nos lecteurs en dénicheront-ils d'autres ? ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Pantaleone et R. Smith, **A bullet-block experiment that explains the chain fountain**, *The Physics Teacher*, vol. 56, pp. 294-297, 2018.

J. Pantaleone, **A quantitative analysis of the chain fountain**, *American Journal of Physics*, vol. 85, pp. 414-421, 2017.

J. S. Biggins, **Growth and shape of a chain fountain**, *Europhysics Letters*, vol. 106, article 44001, 2014.

La vidéo de Steve Mould :
https://www.youtube.com/watch?v=_dQJBBklpQQ

L'Anthropocène: une urgence, un défi !

L'Anthropocène
décodé pour
les humains
N. Wallenhorst



Nathanaël Wallenhorst - 204 p. - 16€

Un ouvrage
pour comprendre
cette nouvelle ère,
qui pourrait voir tout
basculer.

Où en est notre planète?
Et comment agir –
cette fois dans le bon
sens !?

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr



L'AUTEUR



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

POURQUOI LES ZÈBRES SONT-ILS ZÉBRÉS ?

Depuis Charles Darwin et Alfred Wallace, les biologistes de l'évolution s'interrogent sur l'éventuel avantage sélectif que les rayures apportent aux zèbres. Un siècle et demi plus tard et après dix-huit hypothèses, la solution semble en vue.

En 1871, dans *La Filiation de l'homme*, Charles Darwin s'étonne: «Le zèbre est rayé d'une manière qui le rend très visible, et ses rayures ne lui apportent aucune protection dans les plaines ouvertes de l'Afrique du Sud.» Vingt ans plus tard, dans *Natural Selection and Tropical Nature*, le naturaliste Alfred Wallace s'interroge: «Il est quelque peu hâtif de déclarer que les rayures ne fournissent aucune protection.» Certes, mais laquelle? Les hypothèses fusent. On peut les rassembler suivant cinq catégories: diminuer la prédation (camouflage, confusion visuelle...); servir de motif coloré d'avertissement, car les zèbres peuvent mordre; faciliter les interactions sociales; contrarier les attaques des mouches hématophages (taons, mouches tsé-tsé...); réguler la température corporelle. Ces dernières années, l'équipe de Tim Caro, à l'université de Californie à Davis, et celle de Gábor Horváth, à l'université de Budapest, se sont consacrées à éliminer la quasi-totalité de ces hypothèses par le jeu d'expériences subtilement montées.

Une hypothèse clé à tester était le rôle visuel des zébrures contre les prédateurs.

Pour cela, les zèbres devaient être vus non par des yeux humains, mais par ceux de leurs prédateurs. C'est ainsi qu'en 2015, Tim Caro et ses collègues ont traité les images prises sur le terrain, en Tanzanie, en utilisant des filtres qui simulent l'apparence des zèbres pour des lions ou des hyènes tachetées. Ils ont constaté alors qu'au-delà de 50 mètres le jour, de 30 mètres en pénombre et de 9 mètres par nuit sans lune, ces prédateurs ne détectent plus les rayures, contrairement à la vision humaine. Or, à ces distances, ils sentent et entendent les zèbres, ce qui tend à prouver que les zébrures ne procurent aucun camouflage. Par une démarche analogue, l'équipe a de même éliminé l'hypothèse de la couleur d'avertissement en plaine.

En 2018, l'équipe de Gábor Horváth a de son côté éliminé l'hypothèse de la thermorégulation en montrant que la température moyenne d'équidés ou de bovins reste à peu près la même, que l'animal soit blanc, noir, gris, marron ou zébré. Enfin, une étude comparée du comportement social et de la cognition chez les chevaux et les zèbres a permis d'affirmer que les rayures ne jouent aucun rôle dans la reconnaissance des individus entre eux.



Cette espèce est en danger. Le nombre d'individus a diminué de 54 % en 30 ans, passant de 5 800 à la fin des années 1980 à 2 680 actuellement.



Hervé Le Guyader a récemment publié: **L'Aventure de la biodiversité**, (Belin, 2018).

En 1882, Menelik II, alors roi du Shewa, en Éthiopie, offrit un zèbre à Jules Grévy, président de la République française. Confié à la ménagerie du Jardin des Plantes, il fut identifié par le zoologue Émile Oustalet comme une espèce inconnue et reçut le nom du président.

EN CHIFFRES

1,9 mètre

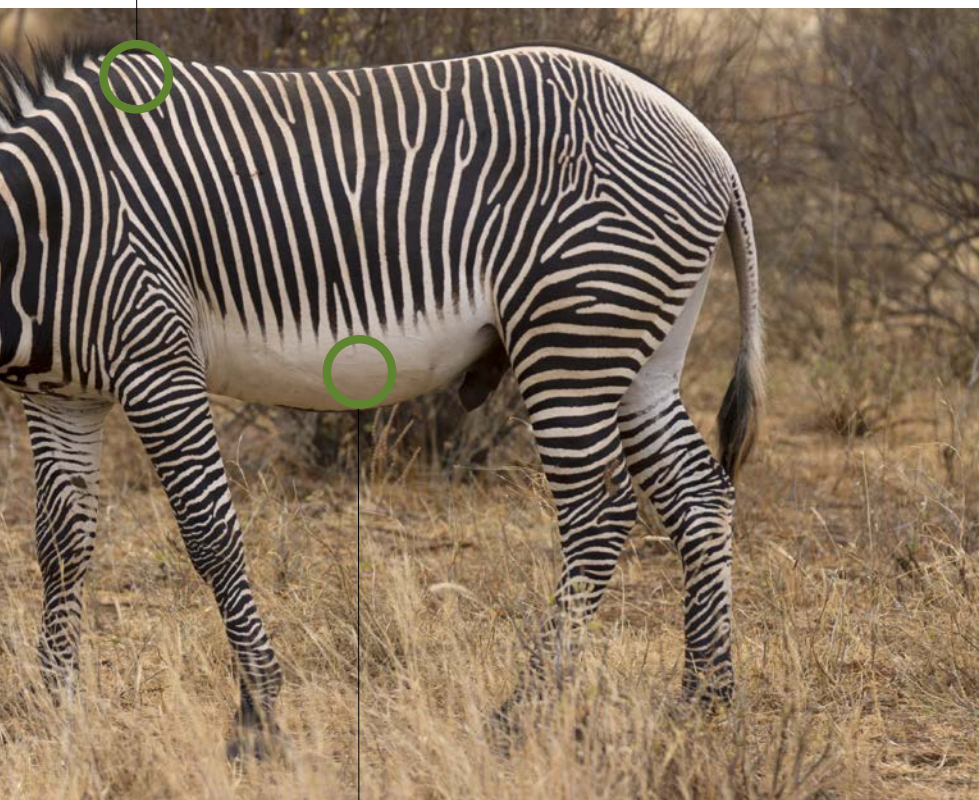
Le zèbre de Grévy est le plus grand des zèbres. Les mâles mesurent jusqu'à 1,9 mètre de hauteur au garrot (3 mètres de la tête à la queue) et pèsent jusqu'à 450 kilogrammes.

80

C'est le nombre moyen de rayures du zèbre de Grévy. Il a les rayures les plus fines de tous les zèbres : les bandes noires, de largeur comprise entre 25 et 38 millimètres, sont espacées de 20 millimètres.

3

On connaît 3 espèces de zèbres : le zèbre de montagne *Equus zebra* avec 2 sous-espèces (*E. z. hartmannae* et *E. z. zebra*), le zèbre de plaine ou zèbre de Burchell, *Equus quagga*, avec 6 sous-espèces (le quagga éteint *E. q. quagga*, *E. q. burchellii*, *E. q. boehmi*, *E. q. borensis*, *E. q. chapmani* et *E. q. crawshayi*) et le zèbre de Grévy, *Equus grevyi*, qui vit dans les régions arides du sud de l'Éthiopie et du nord du Kenya.



Les zèbres de Grévy s'éloignent parfois de plus de 35 kilomètres d'un point d'eau à la recherche de nourriture, même durant la saison sèche.



Zèbre de Grévy (*Equus grevyi*)
Taille : 1,45 à 1,90 m (mâle)
Poids : 350 à 450 kg (mâle)

Restait une hypothèse : les mouches ! Dès 1981, Jonathan Waage, de l'université Brown, aux États-Unis, remarquant que le territoire du zèbre de Burchell, une sous-espèce du zèbre de plaine, coïncide avec celui des mouches tsé-tsé, ou glossines, a fait l'hypothèse que les zébrures détournent ces dernières. Il a alors construit des modèles rayés permettant de capturer les glossines et constaté que ceux en mouvement capturaient moins d'insectes que ceux restés au repos. En 1988, John Brady et William Shereni, de l'université de Londres, ont repris ces pièges et montré que les glossines et les taons se posaient sur des leurres dont les rayures étaient larges, évitant ceux à rayures étroites.

En 2014, Tim Caro effectue à nouveau ces études en les raffinant. Tout d'abord, il mesure avec précision la largeur des rayures des animaux. Celle-ci varie

suivant les espèces de zèbres, mais aussi suivant la situation des rayures sur le corps. Les plus étroites se situent sur la face (1,2 centimètre en moyenne) et sur les pattes (1,35 centimètre en moyenne), les plus larges, sur la croupe (3,9 centimètres en moyenne). Or même les rayures les plus larges tombent dans la gamme de taille que les glossines évitent.

LA PISTE DES MOUCHES

Parallèlement, Tim Caro reprend la comparaison des territoires des zèbres et des mouches hématophages que Jonathan Waage avait entreprise. Il ne se contente pas d'étudier les glossines et rajoute les nombreuses espèces de taons d'Afrique. En effet, si les glossines sont connues pour transmettre, lors de leur piqûre, un parasite responsable de la maladie du sommeil – un trypanosome –, les taons sont aussi très actifs. Ils transmettent notamment le rhume équin, la maladie africaine du cheval, l'anémie infectieuse équine et d'autres trypanosomiasés. Toutes ces maladies graves deviennent vite fatales pour les zèbres, beaucoup plus que pour les autres ongulés. Par conséquent, on peut penser que tout mécanisme de protection contre ces mouches apparaissant chez des individus serait alors très vite sélectionné au fil de l'évolution.

De plus, il ne suffit pas de considérer les maladies que les insectes transmettent. Il faut aussi tenir compte de la perte de sang subie par les animaux après de ➤

➤ nombreuses attaques. Ainsi, des mesures réalisées sur des bovins aux États-Unis font état de pertes de l'ordre d'un demi-litre de sang par jour lorsque les taons sont nombreux. Tim Caro constate alors que l'ensemble des territoires des glossines et des taons recouvrent ceux des différentes espèces de zèbres. Qui plus est, les seuls zèbres pas ou peu rayés, les quaggas, aujourd'hui disparus, vivaient là où ces insectes hématophages étaient absents.

UNE QUESTION DE POLARISATION

Les insectes hématophages apparaissent donc comme le facteur sélectif majeur pour l'évolution des zébrures. Mais par quel mécanisme les zébrures protégeraient-elles de ces mouches? Tim Caro élimine la piste de l'épaisseur de la fourrure. Pour les trois espèces de zèbres, celle-ci ne dépasse pas 2 millimètres, alors qu'elle est de 8 millimètres pour le cheval de Przewalski ou 13 millimètres pour l'antilope sing-sing, sachant que les trompes des glossines et des taons mesurent environ 4 millimètres. La couleur est donc bien le facteur déterminant.

Or les insectes sont capables de détecter la lumière polarisée, car dans leurs cellules visuelles, les molécules photoréceptrices ont toutes la même orientation, à la différence des cônes et des bâtonnets de la rétine des mammifères, où l'orientation de ces molécules est aléatoire. En 2012, Gábor Horváth réalise donc des expériences sur des modèles de zèbre en tenant compte de la polarisation de la lumière réfléchie par leur parure (et en vérifiant qu'elle est similaire à celle de la lumière réfléchie par de vrais zèbres).

Il montre que l'attractivité des modèles dépend du degré de polarisation de la lumière qu'ils réfléchissent: un modèle uni noir ou brun, qui réfléchit une lumière très polarisée linéairement, attire les mouches; un modèle blanc, qui réfléchit une lumière peu polarisée, les attire peu. Et un modèle zébré les attire d'autant moins que la largeur de ses zébrures est faible. Or plus les zébrures sont étroites et moins la lumière globalement réfléchie par les bandes noires et blanches est polarisée. Par ailleurs, le résultat est similaire avec un modèle uniformément gris ayant des zébrures polarisées, signe que c'est bien le degré de polarisation de la parure qui influe sur les mouches. Le mystère des zèbres semble donc résolu! Pas si simple: Tim Caro ne réussit pas à trouver des résultats similaires sur le terrain.

Mais une autre approche originale s'est fait jour. Les zébrures pourraient jouer le

L'ILLUSION DU ZÈBRE

Quand un zèbre se déplace vite, ses zébrures donnent l'impression que sa partie postérieure se déplace vers le haut tandis que sa partie antérieure se déplace vers l'arrière, comme si l'animal se désagrégeait. L'illusion d'optique est encore plus forte lorsqu'un groupe de zèbres avance, comme ci-contre. Les couleurs indiquent les directions de déplacement que l'on perçoit du fait de cette illusion d'optique: si certaines parties des animaux vont bien vers l'avant (en rouge), d'autres semblent partir vers l'arrière (en vert) ou vers le haut (en ocre). De quoi désorienter les mouches! voire les prédateurs...



Image perçue par les insectes

rôle d'un camouflage dynamique, c'est-à-dire quand l'animal est en mouvement. Tout le monde connaît l'illusion d'optique que l'on a au cinéma, quand on voit tourner une roue de carrosse «à l'envers». Elle s'explique par le nombre d'images à la seconde et par la persistance visuelle. Une autre illusion d'optique célèbre est l'enseigne des barbiers, courante aux États-Unis et dans d'autres pays anglo-saxons: un poteau recouvert de bandes bleue, blanche et rouge disposées en hélice. Lorsque le poteau tourne, on a l'impression qu'il se déplace vers le haut.

En 2014, Martin How et Johannes Zanker, neurophysiologistes respectivement à l'université du Queensland (Australie) et à l'université de Londres, ont réalisé un travail minutieux sur les zébrures. Les flancs d'un zèbre de plaine portent dans sa partie antérieure des raies verticales, tandis que celles de la partie postérieure sont approximativement inclinées à 45 degrés. Pour Martin How et Johannes Zanker, les zébrures antérieures miment l'illusion de la roue, les postérieures, celle de l'enseigne de barbier, lorsque le déplacement est rapide (voir l'encadré ci-dessus). L'insecte qui s'approche de l'animal «voit» l'avant de l'animal se déplacer vers l'arrière et la partie postérieure aller vers le haut, comme si le zèbre se cassait en morceaux. C'est également sans doute vrai pour un lion, en situation rapprochée, qui est prêt à sauter sur sa proie. Polarisation? Illusion d'optique? Les explications ne sont pas antagoniques, mais le problème semble encore garder quelque secret... ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Horváth et al., **Experimental evidence that stripes do not cool zebras**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 9351, 2018.

A. Melin et al., **Zebra stripes through the eyes of their predators, zebras, and humans**, *PLoS One*, vol. 11(3), article e0151660, 2016.

T. Caro et al., **The function of zebra stripes**, *Nature Communications*, vol. 5, article 3535, 2014.

M. J. How et J. M. Zanker, **Motion camouflage induced by zebra stripes**, *Zoology*, vol. 117, pp. 163-170, 2014.

Á. Egri et al., **Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes**, *J. exp. Biol.*, vol. 215, pp. 736-745, 2012.