

> l'autre selon un chemin de longueur minimale, il faut choisir un déplacement perpendiculaire aux deux. Cela correspond à suivre la direction de la bissectrice aux segments AC et BC et, de façon plus globale, à suivre les courbes orthogonales aux ellipses de foyers A et B, c'est-à-dire des hyperboles.

LA DÉCHIRURE SE PROPAGE PERPENDICULAIREMENT AU PLI, SAUF SI...

La même approche permet d'expliquer ce qui se passe en présence d'un pli, tel celui que présente une feuille dont on détache un ruban. Plus concrètement, faisons deux entailles rectilignes perpendiculaires au bord de la feuille et tirons sur la languette ainsi formée, en maintenant le reste de la feuille à plat. En l'absence de toute élasticité, la languette reste plane et rejoint la feuille le long du pli qui relie les extrémités des deux déchirures.

Ici, d'après le critère d'extension minimale, les déchirures doivent se propager perpendiculairement au pli. Autrement dit, dans ce cas précis, les deux déchirures restent parallèles et forment un ruban de largeur constante.

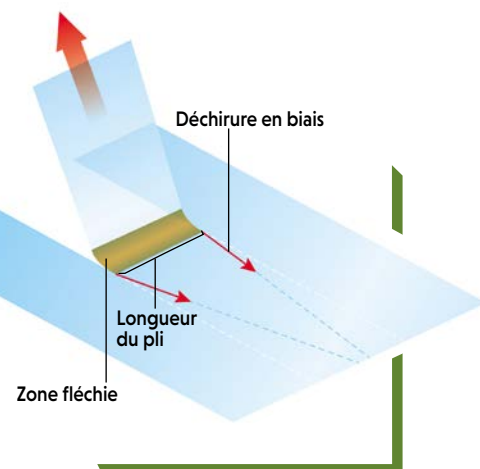
Cette propriété de perpendicularité est de nature purement géométrique et permet d'interpréter des formes de déchirure beaucoup moins simples. L'une de celles-ci s'obtient avec une feuille maintenue à plat et dont le milieu a été légèrement entaillé : quand on tire perpendiculairement au plan de la feuille l'une des lèvres de l'entaille, on obtient, au fur et à mesure que la déchirure se propage, un ruban de plus en plus large qui s'enroule autour de l'axe de traction, comme une hélice sur un cône.

Dans le plan de la feuille, l'extrémité de la déchirure décrit une spirale ; on montre que cette forme résulte du fait que la déchirure se propage perpendiculairement au pli rectiligne reliant les points où le ruban sort du plan de la feuille. Il s'agit d'une spirale logarithmique (la distance au centre croît exponentiellement avec l'angle polaire).

Les déchirures décrites jusqu'ici ne présentent pas de pointe. Pourquoi ? Sans doute parce que nous n'avons pas envisagé le cas d'une feuille collée sur un support. L'adhésion aurait-elle donc un rôle essentiel ? Pas en soi : pour en revenir à la languette sur laquelle on tire, il faut certes tirer plus fort pour que le travail fourni par l'opérateur compense l'énergie d'adhésion, mais le critère de Griffith persiste à prédire une propagation de la

DÉCHIRURE EN POINTE

Lorsqu'on tire sur une languette rectangulaire découpée dans une feuille collée sur un support plan, la feuille adhésive se déchire de biais : la languette détachée finit par former une pointe. La flexion du matériau est ici un facteur crucial. De l'énergie élastique non négligeable est stockée dans l'étroite zone qui subit la flexion (en brun), et cette énergie est proportionnelle à la longueur du pli formé. L'énergie élastique emmagasinée par le système diminue donc si ce pli se réduit, c'est-à-dire si la déchirure s'effectue en biais. Le système adopte cette configuration si l'énergie supplémentaire requise pour déchirer le matériau (la longueur d'une telle déchirure étant supérieure à une déchirure à angle droit) est inférieure à l'énergie élastique libérée.



déchirure perpendiculaire au pli, donc un ruban à bords parallèles.

L'ingrédient qui change tout, c'est la flexion du matériau, lorsque celle-ci emmagasine une énergie élastique non négligeable par rapport aux autres. Plus précisément, si la languette a une courbure bien localisée au niveau du pli, ce qui est le cas en présence d'adhésion, l'énergie élastique stockée est proportionnelle à la longueur du pli (voir la figure ci-dessus). Par conséquent, si l'on tire sur la languette en maintenant constant son angle avec la feuille, le pli conserve sa forme, mais l'énergie élastique stockée peut diminuer si la longueur du pli se réduit.

Il y a donc compétition entre cet effet, qui tend à réduire la longueur du pli, et le coût énergétique supplémentaire d'une déchirure en biais qui s'ensuivrait, la longueur d'une telle déchirure étant supérieure à celle d'une déchirure à angle droit. Ce coût supplémentaire est d'autant plus élevé que l'angle de propagation de la déchirure est important.

Ainsi, lorsque l'adhésion est forte, comme pour un rouleau de bande adhésive, du papier peint collé sur le mur ou la peau d'un fruit, le critère de Griffith prédit que la déchirure se propage en biais par rapport à la traction, avec un angle déterminé par une combinaison de toutes les énergies mentionnées. En deux mots, notre languette rétrécit et se décolle sous la forme d'une pointe. Un beau résultat de physique, mais le désespoir des rénovateurs d'appartements ! ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Roman, **Fracture path in brittle thin sheets : A unifying review on tearing**, *International Journal of Fracture*, vol. 182(2), pp. 209-237, 2013.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

COMMENT LES TORTUES GÉANTES ONT CONQUIS LES GALÁPAGOS

Les Galápagos, l'«archipel des tortues» en espagnol, portent bien leur nom. Mais comment ces animaux terrestres s'y sont-ils installés? Un mystère résolu récemment.

Océan Pacifique, le 17 septembre 1835. Charles Darwin, à bord du *Beagle*, débarque sur l'île de San Cristóbal, la plus orientale de l'archipel des Galápagos (à l'époque île Chatham). Son œil est attiré par de profondes allées dans le sol aride, menant à des points d'eau. Il en a vite l'explication après sa rencontre avec deux tortues géantes.

Le 23, il explore l'île Floreana (alors île Charles), la plus méridionale de l'archipel. Sur sa partie basse, il trouve encore des tortues; l'un des (récents) autochtones lui explique que leur morphologie lui enseigne leur provenance dans l'archipel.

Le 8 octobre, Darwin se trouve sur l'île Santiago (alors île James), l'une des grandes îles centrales de l'archipel. Il y rencontre des boucaniers espagnols qui salent des tortues et, *o tempora, o mores*,

ne retient sur le moment que ce seul dernier point. Pour nourrir son équipage, Robert FitzRoy, le commandant du *Beagle*, fait embarquer une cinquantaine de ces tortues, dont Darwin ne gardera pas même une carapace.

PAS UNE, MAIS QUINZE ESPÈCES

Tout change à son retour en Angleterre, un an plus tard. Darwin approche des zoologistes compétents pour étudier ses collections.

L'ornithologue John Gould distingue ainsi immédiatement plusieurs espèces parmi les pinsons de Darwin, là où ce dernier n'en voyait qu'une. L'herpétologiste Thomas Bell montre que les tortues n'ont pas été amenées là par des boucaniers: non seulement elles sont indigènes à l'archipel, mais elles forment plusieurs espèces, car leurs anatomies diffèrent. Par exemple, la carapace est soit très bombée, «en dôme», soit relevée sur l'avant, «au dos en selle»



Découvert en 1971 sur l'île Pinta, George a été transféré sur l'île Santa Cruz, dans la station de recherche Charles Darwin, dans l'espoir de lui trouver une partenaire pour perpétuer son espèce... sans succès. Il est mort le 24 juin 2012. On estime qu'il a vécu une centaine d'années.

EN CHIFFRES

417

kilogrammes, c'est le poids de Goliath, la plus grande tortue connue. De l'espèce *Chelonoidis porteri*, endémique de l'île de Santa Cruz, dans l'archipel des Galápagos, cette tortue mesure 135,8 cm de long, 102 cm de large et 68,5 cm de haut.

Sa carapace, relevée à l'avant, est dite au dos en selle.

Si l'on n'a pas encore trouvé d'autres spécimens de son espèce, on a découvert sur les flancs du volcan Wolf, dans le nord de l'île Isabela, plusieurs tortues qui lui sont apparentées.

19

îles et 29 îlots forment l'archipel des Galápagos. Le point chaud responsable de leur apparition se situe actuellement sous l'île Fernandina, la plus occidentale et la plus jeune de l'archipel.

43

La plus grande tortue *Chelonoidis chilensis* connue, l'espèce sœur des tortues des Galápagos, mesure 43 centimètres. Cela reste inférieur à la taille des tortues de l'archipel. Il est probable que leur ancêtre commun ait certes été géant, mais moins grand que les spécimens des Galápagos, et qu'un phénomène de gigantisme insulaire se soit produit dans l'archipel.



George le solitaire
(*Chelonoidis abingdonii*)

Taille (longueur de carapace): 102 cm
Poids: 88 kg

(voir les photos ci-contre et page 95), avec également des formes intermédiaires.

En 1914, sur des critères anatomiques précis, l'herpétologiste californien John Van Denburgh reconnaît quatorze espèces, dont treize nommées, qu'il classe dans le genre *Testudo*. Plus tard, on les rétrograde un temps en sous-espèces, dans le genre *Geochelone* et le sous-genre *Chelonoidis*. Mais en 1980, Roger Bour, zoologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, propose un statut de genre pour *Chelonoidis*, les sous-espèces redevenant espèces.

Aujourd'hui, la phylogénie moléculaire confirme l'hypothèse de Roger Bour: on compte maintenant quinze espèces de tortues aux Galápagos. Mieux, l'histoire évolutive de ces animaux, retracée grâce à la phylogénie moléculaire, coïncide avec l'histoire géologique de l'archipel. Ces deux histoires sont si liées qu'elles fournissent une piste pour restaurer certaines espèces de tortues disparues.