

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DES SITUATIONS DÉCHIRANTES

Une feuille de papier, qu'elle soit libre ou collée sur un support, ne se déchire pas n'importe comment : la géométrie de la déchirure a ses règles.

Enfin ! Après plusieurs minutes d'efforts, vous parvenez à décoller avec votre ongle l'extrémité du ruban adhésif collé sur son rouleau. Mais patatras, la languette ainsi formée se rétrécit au fur et à mesure que vous la tirez : elle se déchire en formant une pointe et tout est à recommencer ! La même mésaventure se produit avec la peau d'une tomate ou d'une pêche, ou avec du papier peint collé au mur. Dans d'autres conditions cependant, les déchirures prennent des formes étrangement régulières. Comment expliquer ces comportements étonnants ?

DÉCHIRER DU PAPIER SOUPLE ET INEXTENSIBLE

A priori, une déchirure met en œuvre de multiples ingrédients de la physique des matériaux, associés chacun à la libération ou l'absorption d'énergie.

Quand un matériau se fracture, il se crée en son sein deux nouvelles surfaces en vis-à-vis, au prix d'une énergie proportionnelle à l'aire créée.

Le matériau peut aussi se déformer réversiblement sous l'action des forces extérieures et s'allonger comme un ressort, se plier ou se tordre, auquel cas il stocke ou libère de l'énergie élastique.

Et lorsque le matériau se décolle d'un support auquel il adhère, une autre énergie caractéristique est mise en jeu.

À cela s'ajoute une complication au niveau de la ligne de fracture : les contraintes mécaniques y sont si concentrées que le matériau subit à cet endroit des déformations plastiques, irréversibles.

Comment démêler les parts respectives de ces différents ingrédients ? On peut d'abord s'appuyer sur le modèle élaboré dès 1920 par Alan Arnold Griffith. Cet ingénieur aéronautique anglais donna le critère suivant : une fracture se propage si l'énergie



Déchirure en colimaçon à partir d'une entaille au milieu de la feuille

libérée par le relâchement des contraintes lors de la progression de la ligne de fracture ou fournie sous forme de travail par les forces exercées par un opérateur compense l'énergie que nécessiterait sa création.

Dans le cas d'une feuille de papier ordinaire, on parle de déchirure plutôt que de fracture, l'objet étant quasi bidimensionnel. Sous l'action de forces extérieures, la feuille peut se déformer considérablement. Mais si l'on ne froisse pas le papier, ces déformations laisseront inchangées les propriétés topologiques de la feuille, qu'on pourra donc toujours remettre à plat.

DÉCHIRURE HYPERBOLIQUE

Tenons avec les doigts, en des points notés A et B, une feuille de papier entaillée sur son bord, et écartons peu à peu les mains. La feuille se déchire selon une branche d'hyperbole. Voici le raisonnement qui explique pourquoi. À chaque instant, les points A et B sont alignés avec l'extrémité C de la déchirure (schéma a). Si la distance entre les doigts est d à l'instant considéré, on a donc $d = AC + BC$. En remettant à plat la feuille, cela signifie que C est un point de l'ellipse ayant pour foyers A et B et caractérisée par le paramètre d . Un instant plus tard, la distance entre les doigts a augmenté et est devenue d' : la pointe C de la déchirure appartient alors à une ellipse plus grande (de paramètre d'), mais de mêmes foyers A et B (schéma b). Pour que, conformément au critère de Griffith, C passe d'une ellipse à l'autre en parcourant une longueur minimale, le déplacement doit être perpendiculaire aux deux ellipses. Il s'ensuit que C décrit une courbe orthogonale aux ellipses de foyers A et B, ce qui correspond à une branche d'hyperbole.

Déchirures en pointe dont l'angle est constant



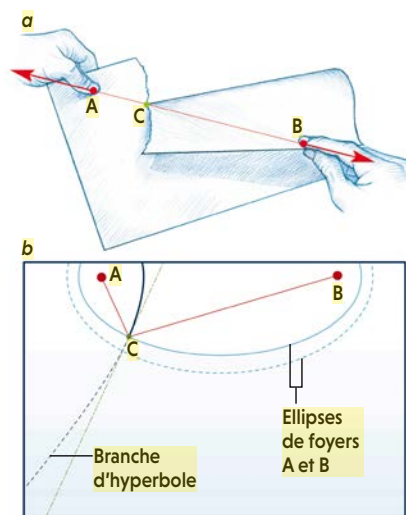
Déchirure de forme hyperbolique à partir d'une entaille sur le bord de la feuille

On peut en outre beaucoup simplifier, comme l'ont montré il y a quelques années Benoît Roman, physicien à l'ESPCI, à Paris, et ses collègues. Sous l'effet de forces modérées, le papier est en effet inextensible et souple. Les énergies élastiques sont ici négligeables et seuls restent à considérer le travail de l'opérateur et l'énergie nécessaire à la déchirure.

Que devient dans ces conditions le critère de Griffith? Le travail fourni par l'opérateur étant fixé, il faut, pour relâcher le plus d'énergie possible, que la déchirure soit de longueur minimale,

compte tenu des contraintes exercées par l'opérateur. Le critère de Griffith devient alors purement géométrique et permet de déterminer la direction de la propagation de la déchirure dans le plan de la feuille.

Pour illustrer cette idée, déchirons à la main une feuille dont le bord a été entaillé, mais de telle sorte que les deux endroits A et B où nous saisissons la feuille avec les doigts ne soient pas à égales distances de l'entaille (voir la figure en haut à droite). Tirons doucement. La feuille se plie dans l'espace, la déchirure se propage; nos doigts s'écartent, mais



restent en permanence alignés avec le point extrême C de la déchirure, de façon que les forces de traction n'engendrent aucun couple.

La distance entre nos doigts est la somme des segments AC et BC. Remettons la feuille à plat. Pour une distance (dans l'espace) donnée, le point C est donc sur une ellipse ayant pour foyers les points A et B (rappelons que les points P d'une ellipse de foyers A et B vérifient $AP + BP = \text{constante}$). Lorsque la distance entre nos doigts augmente légèrement, C se retrouvera sur une autre ellipse, toujours de foyers A et B, mais plus grande. Pour aller d'une ellipse à

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

