

IDÉES DE PHYSIQUE

Le point de rupture des spaghettis

*Tiges, poutres, tours de cheminées d'usines, spaghettis...
Quand la dynamique s'en mêle, ces divers objets peuvent se casser
de façons assez différentes.*

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Un bâton plié lentement se rompt en deux en son milieu, mais un spaghetti se casse en trois morceaux ou plus. Imaginez maintenant une tour de cheminée d'usine ou une tour en Lego assez haute qui bascule : abandonnée à elle-même dans sa chute, la tour se brisera au tiers environ de sa hauteur. Pourquoi de telles différences ?

Saisissons une barre ou une tige assez rigide : si elle apparaît bien droite quelle que soit son orientation, c'est que son propre poids n'est pas suffisant pour la déformer. On pourra donc négliger ce poids dans la suite. Maintenant, essayons de la plier sur notre cuisse en la plaçant dessus de façon symétrique et en appuyant lentement avec nos mains sur ses extrémités, vers le bas. La barre ploie, se courbe et éventuellement se brise en deux morceaux, bien souvent en son milieu.

Casser en extension ou en compression

Pourquoi au milieu ? Pour des raisons géométriques, il est clair qu'avant la rupture, la partie supérieure de la barre courbée est en extension, tandis que sa partie inférieure est en compression (voir la figure ci-contre). Au sein de l'objet apparaissent donc des contraintes, qui atteignent leur maximum en surface. Au niveau de chaque section de la barre, ces forces de compression et de tension s'annulent. Mais elles créent un couple, le « moment fléchissant », intimement lié à la courbure locale de la barre.

Comment varie ce couple le long de la barre ? Pour le comprendre, il faut faire un bilan de forces. Isolons par la pensée un tronçon de longueur x à partir de son extrémité gauche (voir le schéma ci-dessous) et considérons d'abord la force exercée sur ce tronçon par la main, vers le bas. Le tronçon étant à l'équilibre, la partie restante de la barre doit exercer sur le tronçon une force opposée, vers le haut. Celle-ci ne dépend pas de la longueur x du tronçon, mais on voit alors que le couple formé par les deux forces a un moment proportionnel à x (la distance entre les points d'application de ces forces).

Or ce couple de cisaillement doit être compensé par un couple opposé, le moment fléchissant, exercé sur l'extrémité droite du tronçon par la partie restante de la barre.

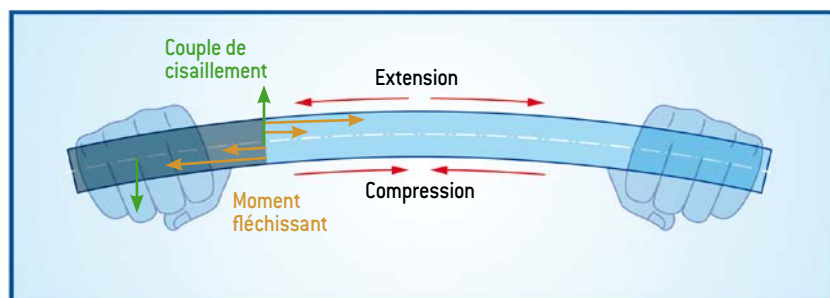
On en déduit que le moment fléchissant croît linéairement depuis l'extrémité, jusqu'au point milieu de la barre.

Ce bilan conduit à deux conclusions. La première, c'est que plus une barre est longue, plus elle se courbe, à force appliquée constante. La seconde est que, comme le moment fléchissant est maximal à mi-longueur de la barre, les forces d'étirement-compression sont également maximales à cet endroit (et elles sont très supérieures aux forces de cisaillement, d'un facteur à peu près égal au rapport de la longueur de la barre sur son épaisseur). C'est donc à mi-longueur que le risque de rupture est le plus important.

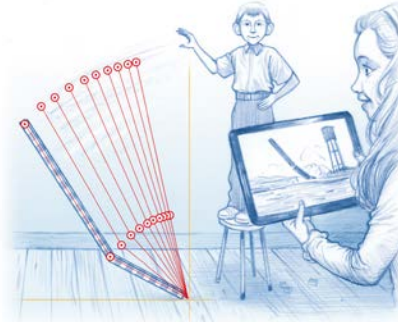
Ce risque de rupture est intimement lié à la résistance du matériau à la traction ou



QUAND ON COURBE UNE TIGE ou une barre en la tenant par ses extrémités, les contraintes sont maximales à mi-longueur et en surface. Selon la nature du matériau, la rupture aura lieu du côté de l'étirement ou du côté de la compression. Le schéma montre aussi le couple de cisaillement et le moment fléchissant qui s'exercent sur un tronçon de la tige.



UNE TOUR HAUTE ET ÉTROITE composée d'éléments dont la cohésion n'est pas trop forte se brise quand elle bascule. Curieusement, le point de rupture se situe au tiers de la hauteur ou un peu plus, ce que des calculs confirment.



à la compression. Ainsi, de la craie, du béton ou de l'os résistent très bien à la compression, mais beaucoup moins à la traction. Par conséquent, la rupture se produira sur le dessus (du côté extérieur à la flexion). En revanche, le bois, et en particulier le bois vert, présente une excellente résistance à la traction lorsque celle-ci s'exerce dans le sens des fibres. Mais il éclate en compression : un bâton rompra donc par le dessous (du côté intérieur de la flexion).

Considérons maintenant une barre posée verticalement sur le sol et qui pivote sur son point d'appui. Parfois, elle se brise lors de sa chute, et cela se produit nettement sous son milieu, comme l'illustrent ces photos de cheminées d'usine que l'on détruisait en les inclinant jusqu'à les faire chuter (voir l'illustration ci-dessus). Vous pouvez reproduire l'expérience chez vous en construisant une tour en pièces de Lego, mais attention : pour observer l'effet, il vous faudra jouer les constructeurs de l'extrême et empiler par exemple plus de 150 pièces.

Comment expliquer une telle rupture ? Il faut d'abord remarquer qu'il s'agit d'objets fragiles, qui se briseraient sous l'effet de leur propre poids si on les tenait à l'horizontale, tant les forces qui assurent la cohésion entre leurs composants (le mortier entre les briques, l'emboîtement des pièces de Lego) sont faibles.

Est-ce à dire que seul le poids est à l'œuvre ? Non, il faut aussi compter avec la

réaction du sol, et le bilan des forces et des couples permet de déterminer la dynamique de la chute de la tour.

Isolons une brique par la pensée. Au cours de sa chute, elle va suivre une trajectoire circulaire, tant que la tour conserve son intégrité. Son accélération dépend, comme il se doit, de sa position et de l'accélération angulaire globale de la tour.

Or cette accélération de la brique n'est pas égale à l'accélération qu'elle aurait si elle chutait seule le long d'un arc de cercle. La différence est due à l'existence de contraintes internes, à la fois de compression-extension ou de cisaillement, exercées sur la brique par les éléments qui lui sont adjacents.

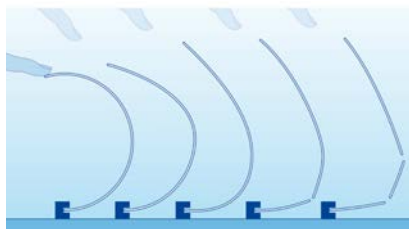
Rupture en cours de chute

Le calcul montre alors que la tour est bien en compression au début de sa chute (quand le poids domine), mais qu'à partir d'environ 45 degrés d'inclinaison, elle se retrouve en extension sous l'effet de la force centrifuge. On trouve que le moment fléchissant maximal se produit au tiers de la hauteur de la tour : c'est donc un point de rupture privilégié.

Un calcul plus détaillé des contraintes d'étirement exercées sur les faces de la tour (là où elles sont maximales) montre que le résultat est robuste pour des tours très hautes, mais aussi que la rupture peut avoir lieu plus haut que le tiers de la hauteur pour des tours moins élancées (mais toujours plus bas que le milieu).

Qu'en est-il du spaghetti, sorte de tour très élancée puisque le rapport entre sa longueur et son épaisseur dépasse 200 ? La rupture de cette étroite tige de pâte sèche est étrange : quand on courbe peu à peu un spaghetti, il se casse invariablement en plus de deux morceaux (voir la figure ci-contre). En quoi se distingue-t-il alors des tiges que nous avons évoquées plus haut ?

Première surprise : le spaghetti semble ne pas s'en distinguer ! En effet, lorsque la pâte est bien homogène et sans défaut, c'est bien au milieu qu'il se brise, là où les contraintes et la courbure sont maximales. Mais la différence apparaît lorsqu'on examine



UN SPAGHETTI FORTEMENT COURBÉ se casse quand on lâche son extrémité. Le lâcher crée une onde de flexion qui se propage le long du spaghetti et qui augmente localement la courbure (donc les contraintes mécaniques). Le spaghetti se brise là où la courbure dépasse le seuil de résistance. Les nouvelles ondes de flexion ainsi créées conduisent alors à une autre rupture.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTLY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

ce qui advient ensuite aux deux morceaux, et la seconde surprise est là.

Les physiciens ont longtemps pensé que les extrémités libres de ces morceaux oscillaient, comme la règle que l'on fait vibrer en maintenant l'une de ses extrémités sur la table. Or ce mouvement est assez lent (période de l'ordre de 0,2 seconde) et ne correspond pas du tout aux observations faites avec des caméras ultrarapides par Basile Audoly et Sébastien Neukirch, de l'université Pierre-et-Marie-Curie.

Des ondes de flexion

Juste après la rupture, l'extrémité libre ne subit plus aucune contrainte, alors même qu'elle est fléchie. Les deux physiciens ont établi qu'elle se redresse, mais beaucoup plus rapidement dans l'épaisseur du spa-

ghetti que dans sa longueur. Il s'ensuit l'émission d'une série d'ondes de flexion très particulières. Leur vitesse de propagation le long de la tige diminue avec le temps tandis que, au début, leur amplitude croît. On assiste ainsi à une augmentation de la courbure du spaghetti, et donc de ses contraintes internes, à mesure que ces ondes se propagent.

Comme ces contraintes étaient déjà proches de la contrainte de rupture, une seconde cassure se produit sur chacun des deux morceaux très peu de temps après la première (moins de dix millièmes de seconde). Des ruptures supplémentaires peuvent suivre, compte tenu des réflexions des ondes de flexion sur l'extrémité fixée. Pour éviter une telle explosion de fragments, il faudrait donner de l'épaisseur à nos spaghettis. Mais ce ne seraient alors plus des spaghettis ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

B. Audoly et S. Neukirch, **Fragmentation of rods by cascading cracks: Why spaghetti do not break in half**, *Physical Review Letters*, vol. 95, article 095505, 2005.

G. Varieschi et K. Kamiya, **Toy models for the falling chimney**, *American Journal of Physics*, vol. 71, pp. 1025-1031, 2003.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr




les conférences

Semaine du cerveau

Entrée libre dans la limite des places disponibles

À la Cité des sciences et de l'industrie

cycle Santé en questions

Jeudi 16 mars à 19h

Les pouvoirs de l'esprit ?

La méditation ou l'hypnose aident à combattre le stress, les douleurs chroniques et les addictions.

- Organisé avec l'Inserm
- En duplex avec la Bibliothèque de la Part-Dieu à Lyon.

Au Palais de la découverte

Table ronde

Samedi 18 mars à 15h

Regards croisés sur l'esprit et la pensée

Avec François Ansermet, pédopsychiatre,
Jean-Gaël Barbara, historien des neurosciences,
Elena Pasquinelli, philosophe.

programme complet sur
cite-sciences.fr et palais-decouverte.fr

En partenariat avec



Avec le soutien de

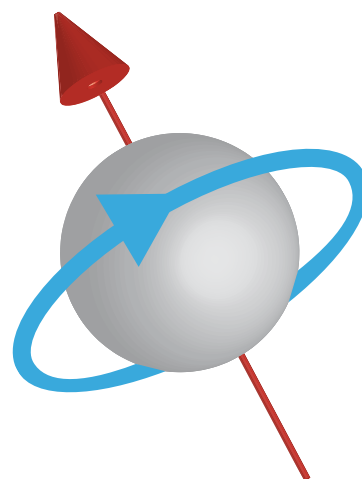


QUESTION AUX EXPERTS

Qu'est donc le spin ?

Le spin est une caractéristique quantique des particules intimement liée à leurs propriétés de rotation. Il joue un rôle essentiel dans les propriétés de la matière.

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND



La mécanique classique nous a appris à distinguer dans le mouvement d'un corps deux composantes : d'une part, un mouvement extrinsèque, son déplacement ; d'autre part, un mouvement intrinsèque, sa rotation sur lui-même. Ainsi, pour la Terre, on peut aisément séparer sa révolution annuelle autour du Soleil de sa rotation quotidienne sur elle-même. À chacun de ces mouvements du corps considéré est associée une grandeur cinématique spécifique : pour son déplacement, la quantité de mouvement, et pour sa rotation, le moment cinétique (ou angulaire) propre. Il s'agit d'une grandeur vectorielle dont la direction est celle de l'axe de rotation et dont la valeur est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation.

La théorie quantique amende les notions newtoniennes de position et de vitesse, donc l'idée même de mouvement. Elle conserve cependant leur pertinence aux grandeurs physiques fondamentales – tout en complexifiant leur formalisation mathématique. Ainsi, un objet quantique, ou « quanton », est doté d'un moment cinétique propre, qui traduit ses propriétés rotationnelles, même s'il s'agit d'une notion plus abstraite et moins imagée qu'un mouvement de rotation classique.

Mise en évidence au cours des années 1920 pour l'électron, cette grandeur a reçu en anglais la dénomination de spin, exprimant le tournoisement et provenant de la désignation anglaise de la quenouille d'une fileuse au rouet. Ce mot provient en fait du

latin *spina*, « épine », en raison de la forme de la quenouille. Il est dommage qu'aucun équivalent français n'ait été proposé. Les possibilités ne manquaient pourtant pas : le tournis, la volte ou la pirouette de l'électron... Voilà qui aurait eu du charme !

La nature quantique du spin se manifeste par la discontinuité de ses valeurs numériques possibles : elles sont « quantifiées ». Concrètement, les valeurs du spin ne peuvent être que des multiples entiers ou demi-entiers de $\hbar$, la constante réduite de Planck, égale à $h/(2\pi)$ où h est la constante de Planck. La valeur du spin de l'électron est ainsi $\hbar/2$; on dit en général que son spin vaut $1/2$, en sous-entendant l'unité $\hbar$. Les protons et les neutrons ont aussi un spin $1/2$, le photon un spin 1 , les mésons π un spin 0 , etc.

Les orientations du spin aussi sont quantifiées : il ne peut en exister que $2s + 1$ pour un spin s ; ainsi, le spin de l'électron ne peut prendre que $2 \times 1/2 + 1 = 2$ orientations.

Fermions et bosons

La caractéristique la plus importante du spin est son lien avec le comportement des ensembles de quantons de même nature. Ceux de spin demi-entier ne peuvent jamais coexister dans des états physiques individuels identiques ; on les nomme fermions. De mêmes quantons de spin entier, eux, peuvent s'accumuler dans des états identiques ; on les nomme bosons. Ces propriétés des systèmes de quantons régissent leurs

comportements collectifs et expliquent par exemple aussi bien la structure des cortèges électroniques des atomes (reflétée dans le tableau de Mendeleïev) que l'impénétrabilité de la matière solide, la conductivité électrique des métaux, la lumière laser, etc. On peut démontrer cette relation entre spin et comportement collectif à partir des principes fondamentaux de la théorie quantique et de la théorie de la relativité. Toutefois, la preuve est si complexe que les raisons profondes de cette connexion restent peu intuitives.

Comme en mécanique newtonienne, l'existence d'un moment cinétique intrinsèque permet aux particules ayant des interactions électromagnétiques de porter un moment magnétique, ce qui les rend similaires à de petits aimants. Cette propriété est à l'origine d'importantes techniques modernes, notamment la résonance magnétique nucléaire, ou RMN. Dans un champ magnétique, les niveaux d'énergie des noyaux atomiques dépendent de l'orientation de leur spin. En détectant l'absorption d'un rayonnement électromagnétique induisant une transition entre ces niveaux, à une fréquence qui dépend spécifiquement des noyaux concernés, on peut observer de façon très fine la répartition des atomes. C'est là le principe de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), une technique d'imagerie médicale très utilisée, notamment parce qu'elle est non invasive et non irradiante. ■

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND est professeur émérite de physique à l'université de Nice.