

Physique

Nicolas Constans et François Graner

## **Papier froissé**

Dans les œuvres plastiques et sonores de Jean Dubuffet ou du surréaliste Jean Arp, dans les drapés étudiés par Léonard de Vinci, dans les maquettes des projets l'architecte Frank O. Gehry, dans les tôles de voitures accidentées, dans la formation des montagnes, le froissement est partout. Mais d'où vient-il ?

D'abord, partons de ce qu'on peut faire de plus simple à une feuille de papier. Principalement deux choses. *Primo* la fléchir, par exemple si on rapproche ses deux côtés opposés. *Secundo* l'étirer, quand on essaie, au contraire, d'écarter ces côtés. Mais alors la feuille résiste ou se déchire. Pourquoi ? Parce qu'on lui demande beaucoup : il faut que partout sur sa surface, les atomes qui la composent s'éloignent les uns des autres. Fléchir est plus facile. Pourtant, il y a aussi, quand on fléchit quelque chose, étirement de la face extérieure et contraction de la face intérieure : on le voit bien quand on essaie de courber une gomme. Mais c'est parce que celle-ci est épaisse : dans le cas du papier, très mince, ces contractions-étirements sont quasi-indécélables. Conclusion, on dépense beaucoup moins d'énergie à le fléchir qu'à l'étirer.

Mais il n'est pas toujours possible de fléchir le papier.

## **Essayez d'envelopper un ballon avec du papier journal, et avec de la cellophane. Arrivez-vous à ce que ce soit lisse ?**

Avec le papier, il est impossible d'envelopper sans faire de plis. Avec la cellophane on y arrive, mais c'est parce que son élasticité lui permet de s'étirer, ça et là, pour épouser la forme sphérique. On bute là sur le vieux problème du planisphère : une carte plane de la Terre a généralement ses régions polaires déformées, car il n'existe pas de transformation géométrique qui passe uniformément d'une sphère à un plan. Certaines zones doivent être étirées et d'autres contractées. Même chose pour le papier : qu'il enveloppe un ballon ou qu'il soit réduit en boule, il ne peut s'en tirer simplement par flexion – il doit être étiré quelque part.

Quitte à étirer, autant que cela soit concentré en quelques endroits : la dépense en énergie est en gros proportionnelle au nombre d'atomes qu'il faut écarter, donc à la surface. Mieux vaut donc que l'étirement soit assez violent mais très localisé, plutôt que réparti sur une grande surface. Et c'est pour cela qu'il y a des plis.

### **Déroulez une feuille de papier un peu froissée. Que voyez-vous ?**

Sa structure est très semblable à celle d'une montagne : des pics et des crêtes (les plis) qui les joignent. Ce sont les zones où le papier s'est étiré. Entre les deux, des zones où le papier est fléchi, sans déformation. Mais, plus précisément, pourquoi cette géométrie particulière ? Pourquoi des lignes, pourquoi des pics ? Est-ce que les pics sont des cônes ? Non, pas des cônes, mais des *d-cônes*...

**Prenez une feuille de papier non froissée. Faites une pince de vos doigts : le pouce face à l'index et au majeur légèrement écartés. Ensuite abaissez le restant de la feuille de façon à former un point anguleux.**

Le voici, ce fameux d-cône. Sa particularité est qu'il se transforme en un plan et vice versa sans être étiré ailleurs qu'en son sommet : cette transformation, vous venez de l'effectuer. C'est là son grand avantage sur le cône usuel : impossible, en effet, de rendre plan un chapeau pointu sans le déchirer. Et les d-cônes sont la forme pour laquelle le papier dépense le moins d'énergie quand on le froisse – elle est concentrée en son sommet –, comme l'ont confirmé dans les années 1990 des calculs effectués au laboratoire de physique statistique de l'ENS [1]. Des simulations ont montré par ailleurs que, quand les contraintes devenaient plus fortes, les d-cônes se connectaient via des singularités mathématiques rectilignes : les plis.

**Essayez de déplacer le d-cône, en tirant ou remontant la feuille. Que constatez-vous, une fois le papier déplié ?**

Le déplacement du d-cône a laissé une marque le long de sa trajectoire. C'est la preuve que la présence du sommet a irrémédiablement changé la structure du papier. L'étirement a été si violent, si concentré à cet endroit qu'une partie des fibres du papier a rompu. C'est pour cela qu'il est plus facile de déchirer une feuille le long d'un pli, car le pliage l'a fragilisé.

### ***Matière à expériences :***

La physique du papier froissé est jeune, et les sujets d'interrogations ne manquent pas. L'année dernière, des étudiants du Colorado ont ainsi obtenu un prix pour avoir montré que le fractionnement d'un pli en d'autres plus petit était de nature fractale, c'est-à-dire identique quelque soit l'échelle. Ils ont mis en évidence des relations de puissance entre le nombre de plis, leur longueur moyenne et le rayon de la boule de papier. Avec une règle et une loupe (ou un scanner et un logiciel d'analyse d'images pour les plus

fortunés), êtes-vous en mesure de confirmer leurs résultats ? Autre aspect, le bruit du papier qu'on froisse : la répartition des fréquences du son qu'il produit suit, elle aussi, une loi de puissance, à ce jour inexplicée. Comme les chercheurs, vous pouvez enregistrer et analyser le son sur votre ordinateur : avez-vous une interprétation à proposer ?

[1] M. Ben Amar and Y. Pomeau, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 453, 729, 1996

A. Boudaoud et al., Nature, 407, 718, 2000.

### **Pour en savoir plus**

F. Graner, *Physique de la vie quotidienne*, Springer, 2003

Merci à Ludovic Pauchard et Arezki Boudaoud.