

LES AUTEURS



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

DES ONDES COBRA AVEC DES BÂTONNETS

En entrelaçant convenablement des bâtonnets, on crée des structures étonnantes: lorsqu'on les déstabilise, l'énergie élastique qu'elles ont accumulée se libère de façon explosive!

En une fraction de seconde, le cobra se soulève. Il traverse la pièce et revient à vive allure – sans toutefois susciter d'effroi chez les spectateurs médusés. Car le cobra dont il est question ici n'a du redoutable serpent que le nom: il s'agit plus précisément de l'onde cobra, la propagation d'une réaction en chaîne le long d'une structure formée de bâtonnets entrelacés, un peu comme la chute d'une série de dominos.

De telles structures se défont de façon explosive, en projetant des bâtonnets dans toutes les directions, ou plus progressive, en formant une ondulation qui avance à une vitesse de plusieurs mètres par seconde. Quels mécanismes se cachent ici?

Ces «bombes de bâtonnets», *stick bombs* en anglais, sont réalisées en général avec des bâtonnets de bois semblables à ceux des glaces. Lorsqu'on entrelace

ces éléments, ils se déforment avec des fléchissements qui sont de l'ordre de leur épaisseur (voir l'encadré page 90, figure c), mais ils retrouvent leur forme initiale une fois libérés. Ils stockent donc de l'énergie élastique.

DES ENTRELAÇOS DE BÂTONNETS QUI STOCKENT DE L'ÉNERGIE ÉLASTIQUE

On estime la valeur de l'énergie stockée par bâtonnet à plusieurs dizaines, voire centaines, de millijoules. Compte tenu de la faible masse d'un bâtonnet (environ 2,5 grammes), cette énergie est considérable. Une énergie de 150 millijoules correspond ainsi à l'énergie potentielle de pesanteur d'un bâtonnet ayant atteint une altitude de 6 mètres, ou à son énergie cinétique si sa vitesse est de 11 mètres par seconde. On comprend mieux le potentiel explosif de bâtonnets fléchis!

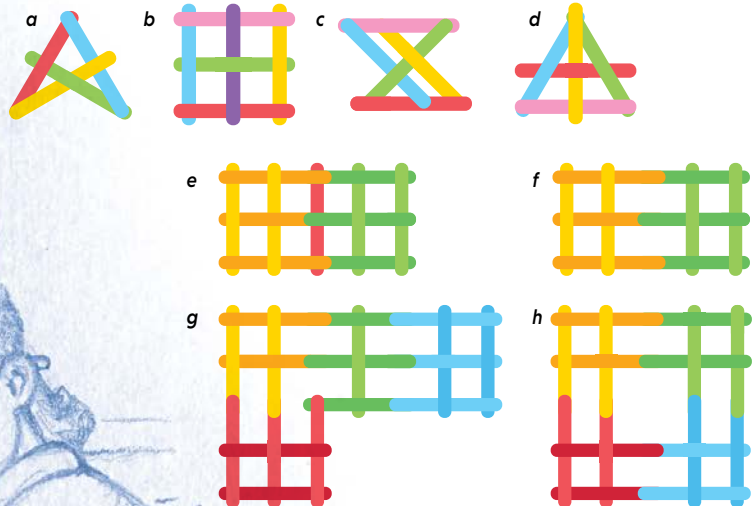
Cependant, la raideur en flexion de ces morceaux de bois est suffisante pour assurer une force pressante élevée entre les parties en contact dans un entrelacs: grâce aux forces de frottement, ces parties ne glissent pas et l'entrelacs, manipulé avec précaution, se révèle assez robuste. Mais si on le laisse tomber par terre, le choc peut déplacer les bâtonnets les uns par rapport aux autres et déstabiliser la structure. L'énergie élastique des bâtonnets se relâche alors brutalement et les éléments sont projetés avec force dans diverses directions, comme les éclats d'une bombe.

L'un des atouts ludiques de ces structures, outre la variété des entrelacements



DES BÂTONNETS ENTRELACÉS

Pour construire des bombes de bâtonnets, il existe de nombreuses possibilités. Quelques-unes sont illustrées ici, les bâtonnets étant colorés afin de visualiser plus facilement la façon dont ils sont entrelacés. On peut former de petites bombes avec seulement quelques bâtonnets (a à d). On peut aussi construire, par combinaison, des structures beaucoup plus étendues. Par exemple, on peut réunir deux structures du type d, puis enlever le bâtonnet commun (e, f) ; selon le même principe, on peut former un coude (g) ou une structure carrée plus grande (h).



possibles, est qu'on peut les combiner pour former des structures plus grandes.

Détaillons-le avec la « bombe carrée », composée de six bâtonnets et où trois d'entre eux, horizontaux, sont entrelacés avec trois bâtonnets verticaux (voir l'encadré ci-dessus, figures c à f). Chaque bâtonnet du périmètre peut servir à l'ajout d'une bombe supplémentaire. Si l'on se débrouille pour qu'aux points de contact les bâtonnets des deux carrés soient de part et d'autre du bâtonnet commun, il est possible d'enlever le bâtonnet commun sans que la structure se défasse. Et ainsi de suite, de telles additions permettent de réaliser des bombes

de bâtonnets en longues bandes, en virages à angle droit, en tapis...

Dans les petites bombes de bâtonnets, la déstabilisation détruit la structure d'un coup. Dans les grandes, en revanche, cette déstabilisation s'effectue de proche en proche : on observe une onde de destruction qui se propage à une vitesse de quelques mètres par seconde. Au passage du front d'onde, la structure se défait et les bâtonnets sont projetés en l'air à quelques dizaines de centimètres de hauteur.

Ce chiffre, comparé aux 6 mètres estimés à partir de l'énergie élastique, signifie que la conversion de l'énergie élastique en énergie cinétique et potentielle est peu

efficace (de l'ordre de quelques points de pourcentage). En fait, la plus grande part de l'énergie est dissipée lors du glissement des bâtonnets les uns sur les autres ou lors de leurs collisions.

On peut remarquer que, en comparaison avec les structures constituées de dominos, on a un avantage : les entrelacements étant plats, on peut les superposer. Et grâce à leur robustesse, le passage de l'onde de destruction ne détruit pas les >

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



> entrelacs placés en dessous; en outre, l'énergie libérée par bâtonnet est suffisante pour que l'onde ne soit pas perturbée par des bâtonnets retombés au hasard sur la structure.

La plupart de ces bombes de bâtonnets ont été inventées au début des années 1980 par l'Américain Timothy Fort, plus connu sous son surnom de Kinetic King. La structure la plus populaire qu'il a créée est l'«entrelacement cobra».

Pour tous les autres entrelacements, l'onde de destruction ne conduit qu'à la projection désordonnée des bâtonnets. Pour l'onde cobra, la structure se plie, se soulève et prend une forme caractéristique qui se propage comme un ébranlement le long d'une corde, en laissant derrière elle chaos et destruction. Ce phénomène tient au fait que l'entrelacement cobra définit un sens privilégié le long de la structure.

Pour le comprendre, considérons d'abord la situation élémentaire d'un bâtonnet immobilisé par trois autres: deux à ses extrémités, qui passent dessous, et un à son milieu, qui passe dessus. Quand on enlève l'un des bâtonnets extrêmes, on a un puissant effet de levier qui propulse et éjecte le bâtonnet considéré vers le bas, c'est-à-dire dans la direction d'appui du bâtonnet central. Par réaction, la structure subit une force vers le haut.

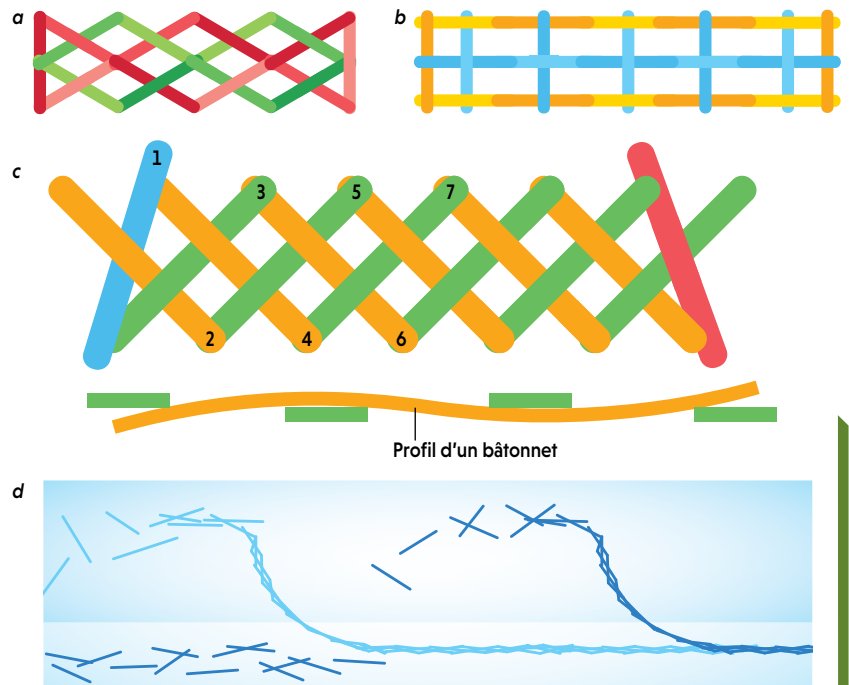
Si l'on prend, posée à plat, une structure comme celle obtenue en additionnant les carrés (nommée *ortho weave*, ou entrelacement orthogonal, voir l'encadré ci-contre, figure b) et qu'on la déstabilise en lui soustrayant un bâtonnet, on comprend qu'à cause de l'alternance des dessus-dessous, la moitié des bâtonnets seront propulsés vers le haut et l'autre moitié vers le bas. Aucune direction n'est privilégiée et la poussée moyenne exercée sur la structure par les bâtonnets éjectés est nulle.

UNE ONDE DE SOULÈVEMENT ET DE DESTRUCTION

Observons maintenant la structure de l'entrelacement cobra (figure c ci-dessus). Chaque bâtonnet est, cette fois, immobilisé par quatre autres, avec des appuis aux extrémités dans des sens opposés, mais tels que les extrémités de gauche (respectivement de droite) de tous les bâtonnets sont poussées dans le même sens, vers le bas (respectivement le haut) sur la figure. Conséquence: tous les bâtonnets sont projetés dans la même direction lorsque la structure se détruit, vers le bas si l'on déstabilise la structure à partir de la gauche. Ainsi, la poussée moyenne

DESTRUCTION AVEC OU SANS ONDE COBRA

Dans des structures telles que celles dessinées en a et b, l'entrelacement des bâtonnets présente une symétrie par rapport à l'axe transversal passant par le milieu de la tresse. Dans un tel cas, le retrait de l'un des bâtonnets déstabilise la construction de telle façon que les bâtonnets sont éjectés en tous sens. La situation est différente avec la structure représentée en c, où l'entrelacement présente un sens privilégié. Détaillons ce qui se passe lorsqu'on retire le bâtonnet 1 (en bleu). Le bâtonnet 2 n'est alors plus tenu que par les bâtonnets 3 et 5, qui font levier; l'extrémité gauche du bâtonnet 2 se redresse et est propulsée avec force vers le bas; le bâtonnet est ainsi éjecté. Le bâtonnet 3 se retrouve alors dans la même situation: il n'est plus tenu que par deux bâtonnets, les numéros 4 et 6. Il est à son tour propulsé vers le bas puis éjecté. Et ainsi de suite. Lorsque la structure est posée sur le sol, l'éjection se fait avec un appui sur le sol: les bâtonnets rebondissent, ce qui contribue à soulever la structure, et l'onde cobra (représentée en d à deux instants successifs) se constitue ainsi.



exercée sur la structure n'est plus nulle et, dans le cas où l'on déstabilise la structure à gauche, la force subie est vers le haut et la structure se soulève.

Pourquoi cela donne-t-il naissance à un ébranlement de forme caractéristique et comment les propriétés de l'onde sont-elles reliées à celles des bâtonnets et à leur agencement? Cette question difficile a intéressé récemment plusieurs équipes de physiciens (voir la bibliographie). Le lecteur curieux constatera que leurs conclusions diffèrent sur plusieurs points, notamment sur la relation entre la vitesse de l'onde et les dimensions des bâtonnets ou la vitesse d'éjection de ces derniers. L'onde cobra n'a manifestement pas encore révélé tous ses secrets. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Boucher et al., **Popsicle-stick cobra wave**, *Physical Review Letters*, vol. 119, article 084301, 2017.

J. Sautel et al., **The physics of a popsicle stick bomb**, *American Journal of Physics*, vol. 85, pp. 783-790, 2017.

De nombreuses vidéos spectaculaires sont visibles sur Internet, par exemple : www.youtube.com/watch?v=GtnZc1dujgg