

LES AUTEURS



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

L'ASCENSION DE LA CHAÎNE FONTAINE

Une longue chaînette glissant hors d'un bocal suspendu au-dessus du sol se soulève spontanément. Le phénomène a intrigué les physiciens, qui ont fini par le comprendre.

En 2013, une vidéo de Steve Mould, un présentateur anglais d'émissions scientifiques, est devenue rapidement virale. Qu'y voit-on ? Une longue chaînette quitte un récipient surélevé pour s'écouler vers le sol ; très vite, elle s'élève au-dessus du bord du récipient sans le toucher, au lieu de glisser contre lui comme le fait une simple corde (voir la figure ci-contre). Ce phénomène inattendu a provoqué la surprise du public... et interrogé les physiciens : d'où provient la force qui fait monter la chaînette ?

UNE POUSSÉE INATTENDUE EXERCÉE PAR LE RÉCIPIENT

La réponse est troublante : c'est le récipient, pourtant immobile, qui projette la chaînette vers le haut ! Comme nous le verrons, la vidéo d'une brique de bois propulsée vers le haut grâce à un tir

de carabine confirme cette explication et permet de mieux saisir les mécanismes à l'œuvre.

Cherchons d'abord à reproduire l'expérience avec la chaînette. Les premiers résultats ont été obtenus avec des chaînettes en métal, semblables à celles qui retiennent les bondes d'évier.

Dans ce cas, de petites boules métalliques sont reliées entre elles par de petites tiges. L'ensemble de la chaîne reste souple, même si les segments qui la constituent sont parfaitement rigides. On place la chaîne dans un bocal et l'on fait pendre l'une de ses extrémités par-delà le bord, avec assez de longueur pour que la chaîne soit entraînée progressivement hors du récipient sous l'effet de son propre poids.

Après quelques instants, et notamment après que l'extrémité a touché le sol, un « régime permanent » s'établit : la chaîne s'élève au-dessus du récipient en formant



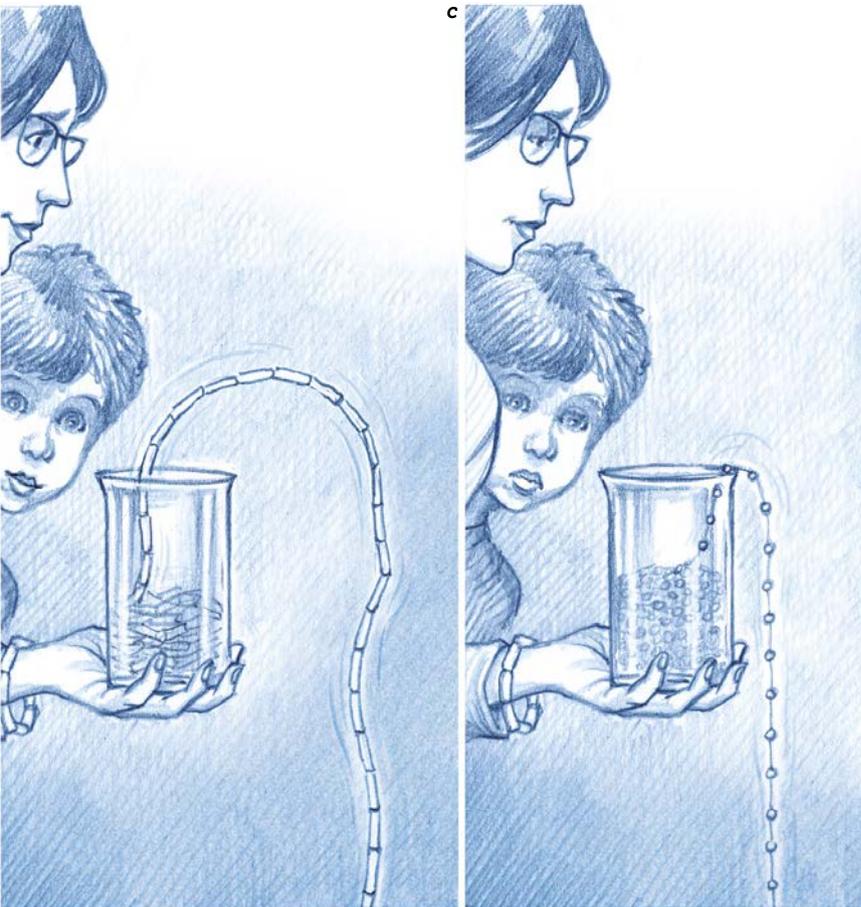
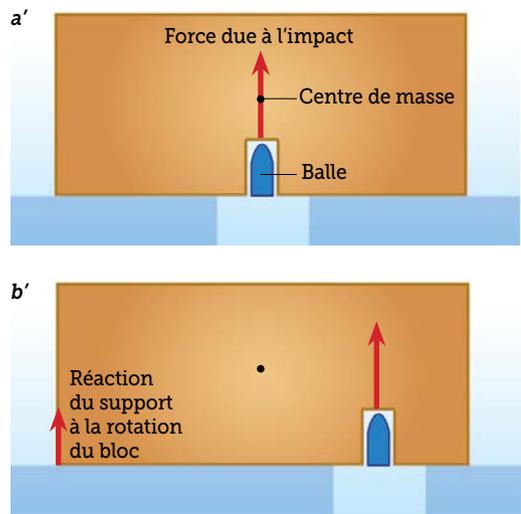
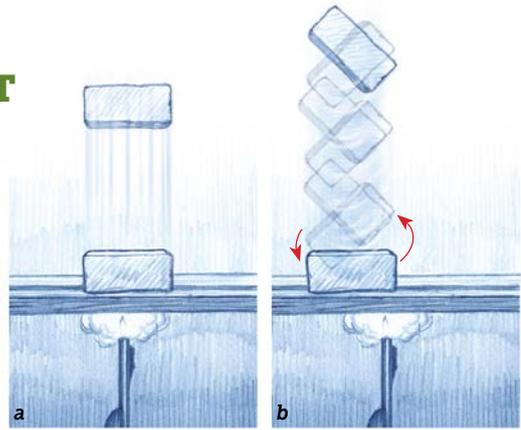
une arche et quitte le bocal à vitesse constante. La force motrice de ce phénomène est le poids de la partie de la chaîne qui se trouve en l'air entre le bocal et le sol. Elle est donc constante et d'autant plus grande que le bocal est surélevé.

On constate ainsi que plus on soulève le bocal, plus la chaîne le quitte rapidement et plus la hauteur de l'arche est importante, selon une loi grossièrement proportionnelle. De plus, lorsqu'on incline le récipient, la chaîne s'échappe non plus selon la verticale, mais en faisant un angle par rapport à l'horizontale.

Effectuons un premier bilan des forces en jeu lorsque le dispositif est en

LE COUP DE POUCE DU SUPPORT

Une expérience simple montre que la force de réaction exercée sur un objet par son support fournit parfois un supplément de vitesse. On tire une balle verticalement dans un bloc de bois posé sur une planche, soit de façon centrée (a et a'), soit assez loin du centre de masse du bloc (b et b'). Dans ce dernier cas, la force due à l'impact de la balle exerce un couple qui fait tourner le bloc sur lui-même. Mais au début, cette rotation est bloquée au niveau de l'arête de gauche : le bloc bute sur le support et rebondit sur lui, ce qui lui procure un élan supplémentaire. De ce fait, le bloc monte en l'air plus haut que si le tir était centré.



Une chaînette formée de segments métalliques articulés (a) ou de macaronis enfilés (b) se déverse en formant au-dessus du bocal une arche surélevée. L'effet ne se produit pas avec une chaînette moins rigide (c) ou une corde.

régime permanent. Les parties de la chaînette posées dans le bocal ou sur le sol sont entassées et ne présentent aucune tension; elles ne sont donc soumises qu'à leur poids, lequel est compensé par la réaction du support.

Pour la partie de la chaîne en mouvement, il paraît raisonnable de supposer qu'elle ne subit que son poids, qui tire et met en mouvement les segments initialement immobiles par l'intermédiaire de la tension, et la force de réaction du bord du bocal. Mais un calcul rapide montre alors que la chaîne ne saurait s'élever.

Pour interpréter l'expérience, il faut donc faire intervenir une poussée

supplémentaire, que seul le fond du récipient peut exercer. Mais par quel mécanisme?

LA RIGIDITÉ LOCALE JOUE UN RÔLE ESSENTIEL

Comme on peut aisément le vérifier, l'effet disparaît lorsqu'on utilise une corde ou un fil, qui restent appuyés sur le bord en se dévidant. On suspecte donc que la rigidité locale ou l'aspect composite de la chaîne jouent un rôle. Lequel?

Le physicien anglais John Biggins, de l'université de Cambridge, a vérifié que si l'on relie des billes de métal par des fils souples, aucune élévation ne se produit.

En revanche, si l'on enfle des pâtes de type macaronis le long d'un fil de nylon, expérience que chacun peut reproduire dans sa cuisine, l'effet subsiste, bien qu'il soit moins spectaculaire, sans doute parce que les pâtes n'ont pas l'élasticité, et donc la capacité de rebond, du métal. Cela nous incite à examiner de plus près l'effet de la rigidité des segments.

Une expérience *a priori* sans grand rapport a permis d'y voir plus clair. Il >

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



> s'agissait d'un défi lancé par le physicien Jim Pantaleone, de l'université de l'Alaska à Anchorage. Prenez une carabine (c'est facile aux États-Unis...), placez-la bien verticalement sous un bloc parallélépipédique de bois posé sur un support, et tirez une balle. Est-ce que la hauteur à laquelle s'élève le bloc dépend de la position de l'impact ?

Non, répondra-t-on rapidement. Il s'agit d'un choc mou (la balle reste logée dans le bloc) et juste après le choc, la quantité de mouvement de l'ensemble balle + bloc est égale à la quantité de mouvement initiale de la balle (celle du bloc étant initialement nulle). Cette loi fondamentale permet de calculer sans ambiguïté la vitesse de l'ensemble après l'arrêt de la balle et donc la hauteur qui sera atteinte. Cette prédiction est d'ailleurs parfaitement vérifiée lorsqu'on tire au centre du bloc, ou légèrement à côté.

En revanche, au-delà d'une certaine distance du centre, plus l'impact est décentré, plus le bloc monte haut ! Comment expliquer ce fait ?

UN COUPLE QUI PROPULSE

Lorsque la balle pénètre dans le bois, elle est ralentie et, en vertu de la loi de l'action et de la réaction, pousse sur le bloc jusqu'à ce qu'elle s'y immobilise. La force (variable) qui en résulte met en mouvement le bloc et, plus précisément, accélère son centre de masse. Mais simultanément, cette force exerce un couple qui fait tourner le bloc sur lui-même.

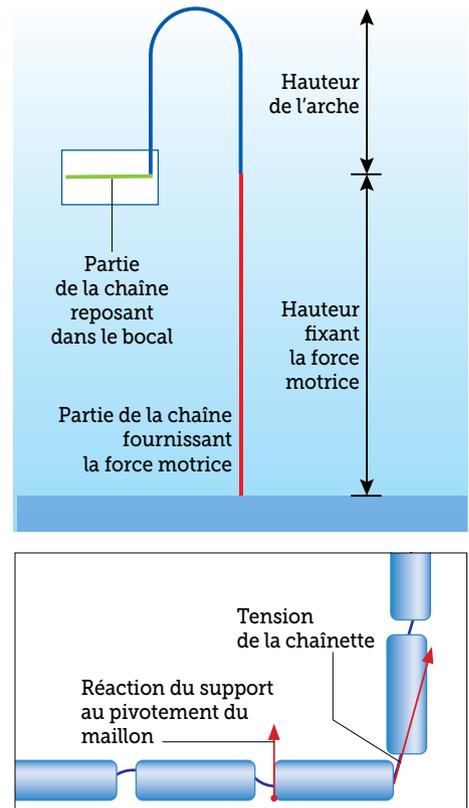
Si ce couple est faible, la rotation du bloc est suffisamment lente pour que la vitesse de l'arête du bloc située du côté opposé à l'impact et en contact avec le support soit verticale : le bloc décolle sans s'appuyer sur le support et monte à la hauteur donnée par la loi de conservation de la quantité de mouvement.

Au contraire, si le couple est important, la rotation induite est rapide et l'arête en question s'enfoncerait dans le support si celui-ci n'était rigide. En pratique, l'arête reste immobile et appuie fortement sur le support tandis que le bloc se met à pivoter autour de cette ligne de contact. Au cours de cette phase très brève, le bloc subit donc de la part du support une force importante, dirigée vers le haut, qui s'ajoute à la force due à l'impact de la balle.

Comme l'angle de rotation du bloc lors de cette phase est faible, les forces qui agissent sont presque verticales. Il s'ensuit que l'accélération du centre de masse est plus importante et le bloc monte donc plus haut qu'avec un impact

LA PROPULSION D'UN MAILLON

Le même effet qui produit un supplément de poussée pour un bloc posé sur un support (voir l'encadré page précédente) est à l'œuvre dans le phénomène de la chaîne-fontaine, où une chaînette semi-rigide se déverse hors d'un bocal. La principale force qui agit ici est la tension de la chaîne, due au poids de la partie suspendue entre le bocal et le sol (en rouge sur le schéma ci-contre). Cette tension est transmise jusqu'au premier segment ou maillon posé horizontalement dans le bocal. Ce maillon subit donc une force quasi verticale au niveau de son extrémité droite. Cela le fait pivoter, d'où une poussée supplémentaire vers le haut due à la réaction du support au niveau de son extrémité gauche.



de balle centré. Dans le cas d'un bloc peu épais, cette situation survient dès que l'on décentre le tir de plus de un sixième de la longueur de la pièce de bois.

Quel est le rapport avec la chaîne-fontaine ? Les deux ingrédients nécessaires à l'effet précédent, une force initiale décentrée et une rigidité suffisante pour assurer la rotation en bloc du solide posé, sont justement présents au niveau des segments de la chaînette.

C'est particulièrement flagrant avec la chaîne de macaronis : lorsqu'un segment s'apprête à quitter le fond du récipient, il subit à son extrémité, de la part du segment précédent, une force quasi verticale égale à la tension de la chaîne. Sa rotation, due au couple exercé, est entravée par le support, d'où une force supplémentaire qui agit sur son autre extrémité. Le segment acquiert donc une accélération et une vitesse supérieures à celles qu'il aurait acquises sous l'effet de la seule tension de la chaîne. Celle-ci peut ainsi s'élever et donner l'illusion d'une fontaine d'un nouveau genre.

Il existe d'autres phénomènes apparentés. Par exemple, une chaîne qui tombe sur une table verra sa vitesse de chute augmenter, et si l'on tire rapidement sur une chaîne à plat, une partie se redressera et présentera une ondulation caractéristique. Nos lecteurs en dénicheront-ils d'autres ? ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Pantaleone et R. Smith, **A bullet-block experiment that explains the chain fountain**, *The Physics Teacher*, vol. 56, pp. 294-297, 2018.

J. Pantaleone, **A quantitative analysis of the chain fountain**, *American Journal of Physics*, vol. 85, pp. 414-421, 2017.

J. S. Biggins, **Growth and shape of a chain fountain**, *Europhysics Letters*, vol. 106, article 44001, 2014.

La vidéo de Steve Mould :
https://www.youtube.com/watch?v=_dQJBBklpGQ