

## LES AUTEURS



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

# LES REBONDS DU CANON DE GALILÉE

En empilant judicieusement des balles les unes sur les autres, puis en les lâchant, on obtient des rebonds spectaculaires.

**L**une balle lâchée au-dessus du sol rebondit toujours moins haut que sa position initiale. Mais si on renouvelle l'expérience en lâchant une balle de tennis superposée à un ballon de basket, la balle remontera bien plus haut. Cet étonnant effet, dit du canon de Galilée, est considérablement amplifié lorsque le nombre de balles empilées augmente (voir l'illustration ci-contre).

Quels sont les mécanismes responsables de l'effet? Existe-t-il des limites à ses performances? Si oui, lesquelles? Connaissant la réponse, le lecteur pourra s'atteler à battre le record homologué dans le *Livre Guinness des records*: la somme toute modeste hauteur de 9 mètres obtenue en 2016 par le physicien américain Brian Green sur un plateau de télévision, avec un ensemble de cinq balles élastiques lâchées à hauteur d'homme.

Examinons le dispositif équivalent, mais plus simple, constitué d'une balle de tennis superposée à un ballon de basket.

Tenons à bout de bras l'ensemble bien vertical et lâchons-le au-dessus d'un sol dur. Au moment de l'impact, la petite balle repart à vive allure et remonte à plus du double de la hauteur initiale. Que s'est-il passé?

## DES COLLISIONS ACCÉLÉRATRICES

Pour le comprendre, décomposons le mouvement et supposons la balle légèrement séparée du ballon. Lors de la chute libre, la balle et le ballon accélèrent sous l'effet de la gravité et atteignent la même vitesse  $v_0$ , qui croît comme la racine carrée de la hauteur  $h_0$  de la chute.

Le ballon, qui touche le sol, rebondit vers le haut. Pour simplifier, supposons la collision élastique, c'est-à-dire sans perte d'énergie cinétique. Le ballon repart donc vers le haut à la même vitesse et vient percuter la balle, qui est toujours en train de descendre à ce moment-là.

C'est dans cette collision à contresens que se révèle l'aspect astucieux du



dispositif. Si les deux balles étaient identiques, elles repartiraient en sens inverses, avec les mêmes vitesses qu'avant le choc (celui-ci étant supposé élastique). Mais comme la masse du ballon de basket est bien supérieure à celle de la balle de tennis, on n'est pas très loin de la situation limite d'une balle lancée contre un mur ou une raquette fermement tenue.

Le choc altère donc à peine le mouvement du ballon (qui joue le rôle de la raquette), tandis que la balle de tennis est vivement accélérée. De combien?

Lors du rebond élastique d'une balle sur une raquette, la vitesse de la balle par

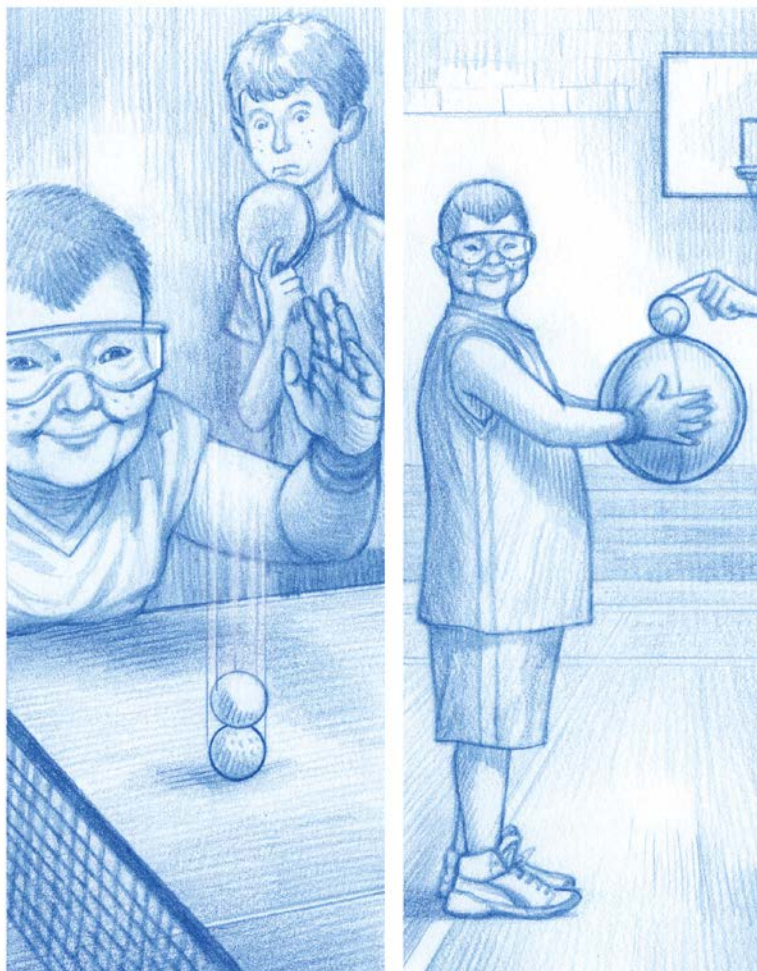
## LE CHOC BALLE-RAQUETTE

**Q**uand une balle vient frapper une raquette qui s'approche elle-même de la balle, celle-ci repart avec une vitesse supérieure à sa vitesse initiale.

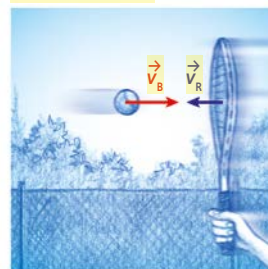
La raquette (et la personne qui la tient) étant de masse très supérieure à celle de la balle, c'est comme si la balle heurtait un mur en mouvement vers elle.

Notons  $\vec{v}_B$  la vitesse initiale de la balle et  $\vec{v}_R$  la vitesse de la raquette (il s'agit ici des vecteurs vitesse).

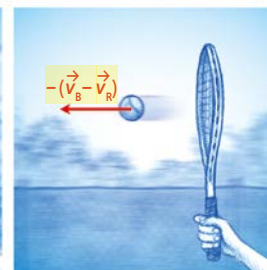
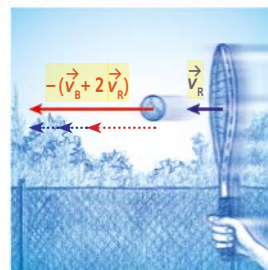
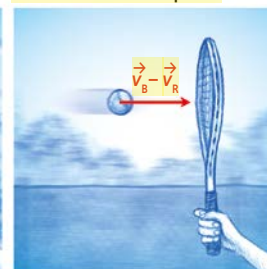
La situation s'analyse plus facilement dans le référentiel où la raquette est immobile. Dans ce référentiel, la vitesse initiale de la balle est  $\vec{v}_B - \vec{v}_R$ . Le choc, supposé parfaitement élastique, inverse simplement cette vitesse, qui devient donc  $-(\vec{v}_B - \vec{v}_R)$ . Dans le référentiel du sol, cette dernière est égale à  $-(\vec{v}_B - \vec{v}_R) + \vec{v}_R = -\vec{v}_B + 2\vec{v}_R$ . Autrement dit, le supplément de vitesse de la balle dû au choc est égal à deux fois la vitesse de la raquette.



Référentiel du sol



Référentiel de la raquette



On obtient des rebonds importants avec deux balles de masses bien différentes. L'effet est encore plus spectaculaire avec les quatre balles de l'Astro Blaster.

rapport à la raquette est inversée (comme dans un rebond sur le sol). La raquette étant en mouvement, un raisonnement simple montre que la collision inverse la vitesse de la balle et lui ajoute deux fois celle de la raquette (voir l'encadré ci-dessus).

Il s'ensuit que, dans notre cas, la balle de tennis repart avec une vitesse trois fois supérieure à sa vitesse  $v_0$  juste avant le rebond, c'est-à-dire de quoi monter à une hauteur neuf ( $3^2$ ) fois supérieure à la hauteur du lâcher.

Les sportifs ont une connaissance intuitive de ce résultat : avec une même vitesse de bras, on propulse bien plus vite

un ballon en le frappant qu'en le lançant. Le service smashé au volley en témoigne !

On pense alors à tous les sports de balle. Lorsqu'on frappe une balle immobile, celle-ci est projetée à près de deux fois la vitesse du pied (football), de la main (volley ou hand), de la raquette (tennis, ping-pong), etc. On comprend mieux les efforts des sportifs pour travailler leurs coup franc, service ou autre swing. Et aussi pourquoi, lors des échanges qui se prolongent, la balle gagne de plus en plus de vitesse à chaque coup.

Moyennant quelques adaptations, le résultat s'applique dans d'autres

domaines. Par exemple au principe de la fronde (ou assistance) gravitationnelle, qui permet d'accélérer considérablement une sonde spatiale sans utiliser de carburant. Ici, point de forces de contact, mais l'action de la gravité lors de l'approche d'une planète par la sonde. Compte tenu de la nature des mouvements dans le plan de l'écliptique, le gain ne peut être de deux fois la vitesse de la planète, mais il

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



► peut être notable. Ainsi, en 1999, la sonde *Cassini* a profité de son second passage au voisinage de Vénus, dont la vitesse orbitale était de 35 kilomètres par seconde, pour accélérer de 18 à 44 kilomètres par seconde.

Ayant compris le principe du canon de Galilée à deux balles, nous pouvons analyser l'Astro Blaster, un jouet constitué de quatre balles de tailles (et de masses) décroissantes de bas en haut. Ces balles sont enfilées sur une tige de telle façon que seule la dernière, la plus petite, puisse s'échapper à son extrémité.

Faisons un petit calcul en supposant que les chocs sont élastiques et que les balles sont de masses très différentes (voir l'encadré ci-contre). Avant le rebond, toutes les balles vont vers le bas à la vitesse  $v_0$ . La balle du bas rebondit à la vitesse  $v_0$ , la seconde à la vitesse  $3v_0$ , la troisième à la vitesse  $7v_0$  (car  $2 \times 3 + 1 = 7$ ), la quatrième à la vitesse  $15v_0$  (car  $2 \times 7 + 1 = 15$ ) et, s'il y en a plus, la  $n$ -ième à la vitesse  $(2n-1)v_0$ . La petite balle de l'Astro Blaster pourrait ainsi remonter à  $15^2 = 225$  fois sa hauteur de chute!

Ces valeurs prédites sont en fait beaucoup trop élevées, surtout quand le nombre de balles augmente. En cause: nos hypothèses (balles de masses très inégales et chocs parfaitement élastiques) sont trop optimistes.

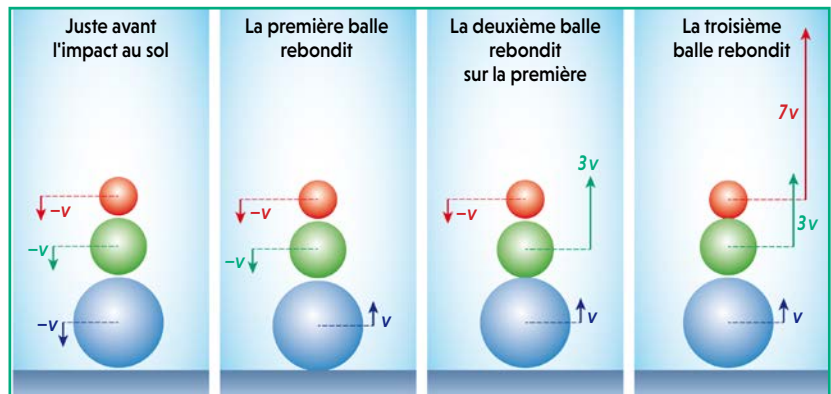
### DES HYPOTHÈSES RÉALISTES SUR LES MASSES ET L'ÉLASTICITÉ

Tout d'abord, si la masse de la raquette n'est pas «très supérieure» à celle de la balle, la raquette subit un recul lors de la collision et le gain de vitesse est inférieur à 2 fois la vitesse de la raquette (mais le gain reste positif tant que la balle est plus légère que la raquette). Dès que l'on considère des masses réalistes, cette limitation, due à une loi fondamentale de la physique (la conservation de la quantité de mouvement), intervient.

Qu'en est-il de la seconde hypothèse, celle du choc élastique? Nous savons bien qu'un rebond n'est jamais parfait: une partie de l'énergie cinétique initiale est dissipée, soit sous forme de vibrations de la raquette ou de la balle, soit sous forme de chaleur. Cette perte est quantifiée par le «coefficient de restitution», égal au quotient de la vitesse d'éloignement des deux objets après le choc sur la vitesse d'approche avant le choc. Il vaut 1 si le choc est élastique. Pour la plupart des balles dont on parle ici, les coefficients de restitution sont compris entre 0,6 et 0,9. Bien que ces valeurs soient relativement élevées, les

## REBONDS À LA CHAÎNE

On décompose ici en quatre étapes successives l'impact au sol et le rebond d'un trio de balles de masses décroissantes de bas en haut (et très légèrement espacées pour que l'on comprenne mieux le phénomène). Juste avant l'impact, chacune des balles a une vitesse  $-v$  (en valeur algébrique, mesurée le long de la verticale). Quand la balle bleue rebondit, sa vitesse s'inverse. Quand cette balle vient frapper la balle verte, la vitesse de celle-ci s'inverse ( $v$ ) et gagne  $2v$ , donc devient égale à  $3v$ . Et quand la balle verte vient heurter la balle rouge, la vitesse de celle-ci s'inverse ( $v$ ) et gagne  $2 \times (3v)$ , donc devient égale à  $7v$ .



performances des canons de Galilée se dégradent rapidement. Avec un coefficient de 0,7, une balle ne rebondit en effet qu'à la moitié de la hauteur initiale.

La prise en compte des différences de masses et des coefficients de restitution permet d'affiner les prédictions. Une première conclusion est que la vitesse d'éjection de la petite balle reste proportionnelle à  $\sqrt{h_0}$  et par conséquent que la hauteur de remontée est proportionnelle à  $h_0$ . Pour établir un record, il faut donc prendre soin de préciser de quelle hauteur  $h_0$  on a laissé chuter le dispositif.

Les calculs numériques se révèlent alors davantage compatibles avec nos observations. Dans le cas d'un ballon de basket (600 grammes) et d'une balle de tennis (57 grammes), avec des coefficients de restitution de 0,8 avec le sol et de 0,6 entre les balles, on prédit que la balle de tennis remonte à 2,7 fois sa hauteur de chute.

On peut reproduire aisément cette expérience chez soi, mais il faut que les balles restent bien alignées verticalement pour obtenir l'effet maximal. Sur le Web, chacun y va de sa recette pour garantir cet alignement. Dans le cas de l'Astro Blaster, le problème est résolu par la tige, mais attention aux frottements! En pratique, il est donc difficile de s'approcher des prédictions (une remontée à près de 12 fois la hauteur de chute, à comparer au facteur 225 du cas idéal), mais le record de Brian Green reste à portée de main. ■

### BIBLIOGRAPHIE

M. Kireš, **Astroblaster – a fascinating game of multi-ball collisions**, *Physics Education*, vol. 44(2), pp. 159-164, 2009.

W. R. Mellen, **Aligner for elastic collisions of dropped balls**, *The Physics Teacher*, vol. 33(1), pp. 56-57, 1995.

**Vidéo du record de Brian Greene :**  
[www.youtube.com/watch?v=75szwX09pg8](http://www.youtube.com/watch?v=75szwX09pg8)