

> 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.

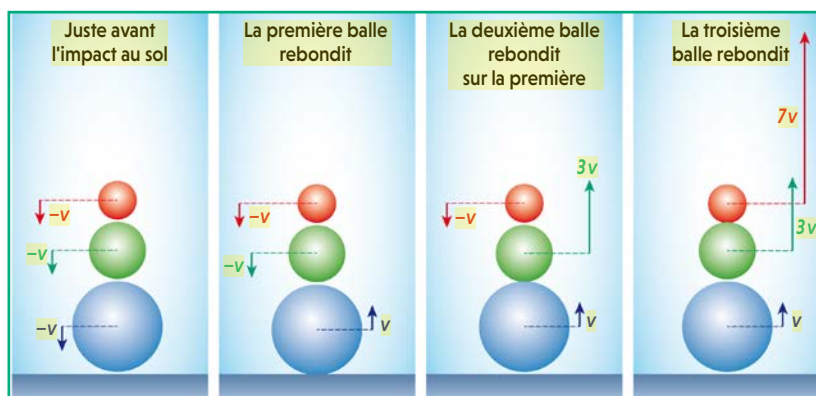
DES HYPOTHÈSES RÉALISTES SUR LES MASSES ET L'ÉLASTICITÉ

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