

IDÉES DE PHYSIQUE

Superballes, superrebondissements

Les rebonds déroutants des « superballes » sont, en théorie, prévus. Mais en pratique, ils doivent beaucoup à un heureux concours de circonstances.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Pour décrire la réflexion d'un rayon lumineux sur un miroir ou d'une particule sur une surface parfaite, le physicien déclare : « L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. » Pourtant, jouer avec une superballe nous convaincrail presque du contraire ! Effets rétrogrades, rebonds périodiques... : autant d'effets saisissants qu'une étude théorique prévoit dans des conditions idéales, desquelles s'approchent justement les superballes. Les performances de ces objets sont dues à leur matériau, certes, mais aussi, comme nous allons le découvrir, à une coïncidence favorable entre deux différents modes de vibration.

Rebonds d'une balle idéale

Commençons par décrire le rebond le plus simple. Lâchons, sans lui donner d'effet, une balle supposée idéale. Lors de sa chute, l'énergie potentielle de pesanteur est convertie en énergie cinétique. Au contact du sol, la balle se comprime et, au moment où elle s'immobilise complètement, son énergie se retrouve intégralement stockée sous forme d'énergie potentielle élastique. La balle se détend alors, retrouve sa forme initiale, rebondit avec une vitesse verticale opposée à la vitesse incidente et remonte jusqu'à sa hauteur initiale.

Évidemment, tout cela suppose l'absence de dissipation d'énergie, ce dont on peut douter : une balle réelle ne rebondit pas si

haut. Là réside la première des qualités des superballes. Composées de Zectron, un caoutchouc synthétique breveté par le chimiste américain Norman Stingley en 1964, leur coefficient de restitution – le rapport vitesse de rebond/vitesse incidente – dépasse les 90 %, ce qui les fait remonter à plus de 80 % de la hauteur de chute.

Qu'advient-il lorsqu'on lance la balle avec une incidence oblique, en lui imprimant ou non une rotation sur elle-même autour d'un axe horizontal ? Sans dissipation d'énergie et en supposant que le contact au sol est quasi ponctuel (donc aucun couple de forces ne s'exerce lors de l'impact), on trouve que la hauteur de rebond dépend uniquement de la hauteur de chute et de la vitesse initiale selon la verticale. Cela signifie qu'il y a indépendance entre les

mouvements horizontaux et les mouvements verticaux.

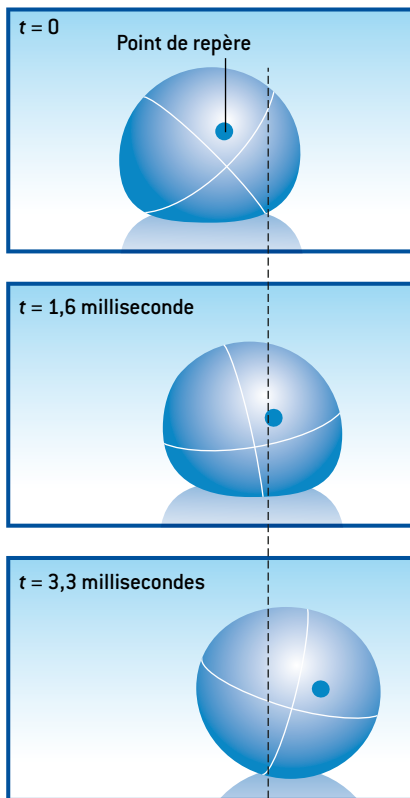
En revanche, la rotation et le mouvement horizontal sont étroitement liés. On note par exemple que la vitesse horizontale du point de contact (laquelle résulte de la vitesse de translation de la balle et de sa rotation propre) s'inverse lors de l'impact au sol, comme s'il y avait un choc contre un mur vertical.

Les conséquences de cette inversion du sens de rotation de la balle sont multiples. Il peut notamment y avoir périodicité du mouvement puisque, après deux rebonds de la balle sur le sol, on retrouve la même vitesse horizontale et la même rotation. Ainsi, quand on lâche une balle en rotation, elle acquiert au premier rebond une vitesse horizontale et se met à tourner en sens inverse. En revanche, le second rebond se



Dessins de Bruno Vacaro

LES REBONDS CONTRE-INTUITIFS D'UNE SUPERBALLE. Les changements surprenants de direction et de sens de rotation s'expliquent par le fait que la vitesse horizontale du point d'impact de la balle s'inverse au moment du choc, et ce en gardant presque la même amplitude, comme si elle était réfléchiée par un mur vertical.



AU COURS DE L'IMPACT, la balle est comprimée verticalement. Et si l'incidence est oblique ou si la balle est en rotation, elle glisse brièvement et subit un cisaillement horizontal, d'où une déformation asymétrique.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTUY
et Édouard KIERLIK
sont professeurs
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.
Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

fait avec la même rotation qu'au lâcher, toujours selon la verticale.

Et si on lance la balle en avant, avec une rotation dont le sens est tel que la vitesse de translation et celle de rotation s'additionnent au point d'impact ? La balle revient alors en tournant dans l'autre sens, puis repart vers l'avant, etc. (voir la figure page précédente).

Avec deux plans, par exemple le sol et la face inférieure d'une table, c'est encore plus étonnant. Quand on lance la balle à 45 degrés sous une table, elle rebondit au sol et acquiert une rotation qui, lorsqu'elle remonte frapper le dessous de la table, la fait revenir vers l'arrière – si bien qu'après un troisième rebond, la balle revient vers les mains du lanceur.

Glissade et frottement

En pratique, avec une superballe, on observe de tels comportements prévus par la théorie. Cependant, la très bonne élasticité de cet objet n'explique pas tout.

Nos hypothèses d'une situation idéale sont en effet loin d'être vérifiées. D'abord, la balle glisse très brièvement sur le sol, jusqu'à ce que le frottement immobilise le point de contact (le frottement augmente fortement à mesure que la balle se comprime et décélère verticalement).

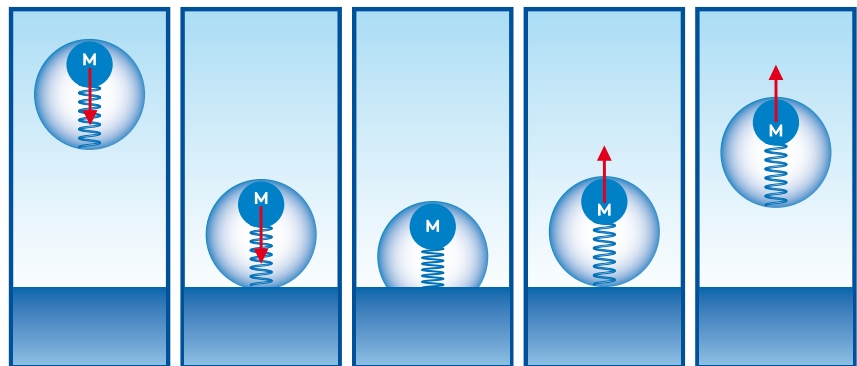
Ces frottements sur la superballe en mouvement dissipent de l'énergie (ils chauffent le sol et la balle !). On constate que

le coefficient de restitution horizontale, rapport entre les vitesses horizontales de la balle après et avant l'impact, est inférieur au coefficient de restitution verticale : d'un peu plus de 0,9, on descend à un peu moins de 0,8. L'écart est, somme toute, modeste.

Avec une balle pleine en caoutchouc, le coefficient mesuré est plutôt de l'ordre de 0,5. Et avec des balles en matériau plus dur, qui glissent davantage sur un sol lisse, par exemple une balle de golf ou une bille d'acier, le coefficient de restitution est encore plus faible.

Jusqu'à très récemment, on expliquait ces coefficients de restitution horizontale exclusivement en termes de coefficients de frottement : plus ce dernier est élevé, plus la balle accroche, et moins elle glisse, meilleur est le coefficient de restitution horizontale. Toutefois, pour une balle de caoutchouc creuse, qui présente donc le même coefficient de frottement que la balle pleine, le coefficient de restitution mesuré est égal à $-0,1$, c'est-à-dire bien plus faible et négatif ! Comment expliquer ce paradoxe ?

Il faut détailler davantage la phase d'impact. La balle se déforme notablement : elle est comprimée par la réaction verticale du sol, mais aussi cisailée par la force de frottement, horizontale (voir la figure à gauche). Ces déformations peuvent être élastiques et on peut alors assimiler les vibrations qui en résultent à celles d'un oscillateur harmonique, c'est-à-dire un ressort



ON PEUT ASSIMILER LA BALLE et son élasticité à une masse M attachée à un ressort.

Au moment de l'impact sur la surface, le ressort se comprime puis se détend, d'où le rebond. En cas d'impact oblique ou si la balle est en rotation, le cisaillement produit est assimilable à la compression d'un ressort horizontal. Dans une superballe, les périodes d'oscillation des deux ressorts sont voisines. La restitution de l'énergie cinétique au rebond est alors optimale.