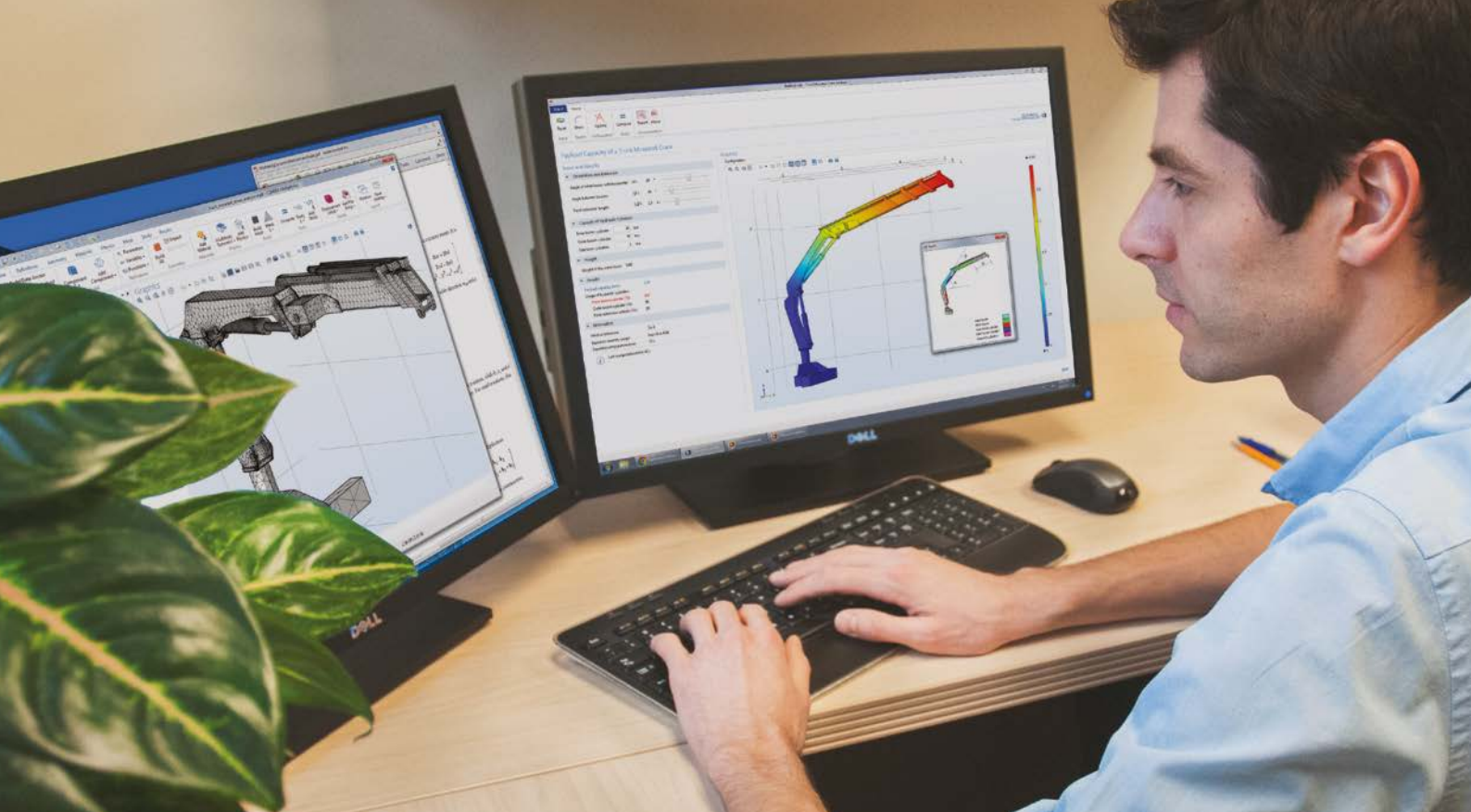




LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

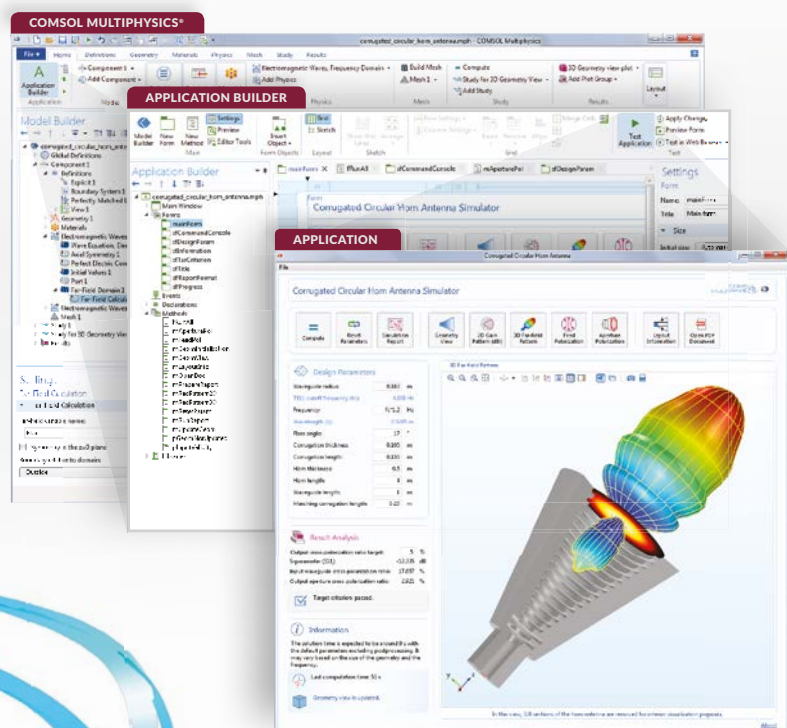
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



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 convaincrait 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.

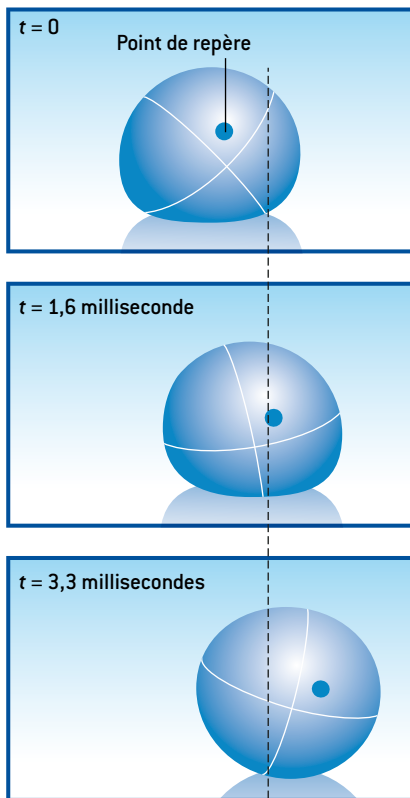
En revanche, la rotation et le mouvement horizontal sont étroitement liés. On note par exemple que la vitesse horizontale du point de contact (laquelle résulte de la vitesse de translation de la balle et de sa rotation propre) s'inverse lors de l'impact au sol, comme s'il y avait un choc contre un mur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

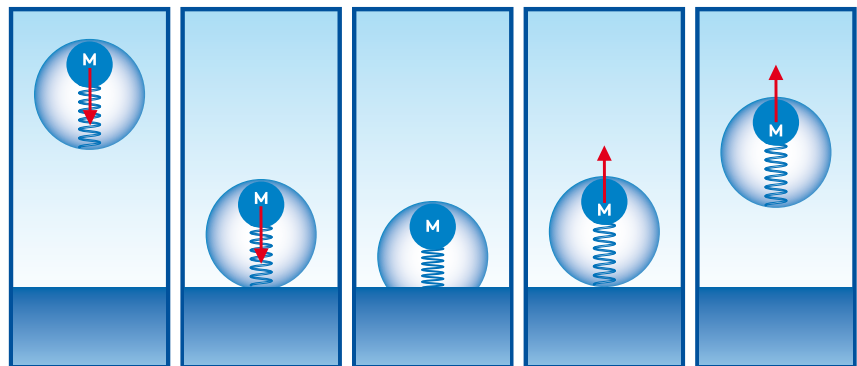
Ces frottements sur la superballe en mouvement dissipent de l'énergie (ils chauffent le sol et la balle !). On constate que

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.

attaché à une masse qui ne s'écarte pas trop de la position d'équilibre.

Au cours du choc, l'oscillateur harmonique équivalent aux déformations verticales vibre d'une demi-période (balle incidente non déformée à pleine vitesse, compression maximale et arrêt, rebond à pleine vitesse, voir la figure page précédente, en bas) et, idéalement, la balle retrouve l'intégralité de son énergie cinétique « verticale » incidente.

Dans le même temps, l'oscillateur harmonique équivalent aux déformations horizontales vibre... mais pas forcément avec la même période. Par conséquent, au moment du rebond, l'état de déformation de ce ressort peut être quelconque et une partie de l'énergie cinétique « horizontale » incidente peut rester stockée sous forme élastique. Relâchée d'un coup au décollage, cette énergie provoquera des vibrations de la balle en vol.

Ainsi, en règle générale, l'origine des pertes d'énergie pour le mouvement horizontal est double : frottement et transfert partiel d'énergie sous forme élastique. Il se trouve que dans une superballe, les deux périodes de vibration (horizontale et verticale) coïncident, par un heureux hasard. Il s'ensuit que la superballe rebondit sans emporter d'énergie élastique.

Pour une superballe creuse ou un ballon de basket, pourtant très élastiques, les deux périodes de vibration différent, ce qui fait qu'une partie de l'énergie cinétique reste stockée sous forme élastique lors du rebond. Il en résulte un coefficient de restitution horizontale réduit, si bien qu'il devient très difficile d'obtenir tous les étonnants rebonds de la superballe. Heureusement, en un sens : un superballon de basket serait probablement dangereux !

■ BIBLIOGRAPHIE

R. Cross, **Impact behavior of a superball**, *American Journal of Physics*, vol. 83, pp. 238-248, 2015.

R. Cross, **Behaviour of a bouncing ball**, *Physics Education*, vol. 50, pp. 335-341, 2015.

R. L. Garwin, **Kinematics of an ultraelastic rough ball**, *American Journal of Physics*, vol. 37, pp. 88-92, 1969.

Dans l'interêt de la science

france

mathieu vidard | la tête au carré 14:05-15:00

france intervenez
franceinter.fr

QUESTION AUX EXPERTS

La radioactivité naturelle est-elle dangereuse ?

Non, sauf en certains endroits ou si des activités humaines ont conduit à sa concentration.

Jean-François LECOMTE



Mine d'uranium en Australie

La radioactivité naturelle n'est ni plus ni moins dangereuse que la radioactivité artificielle. Comme son nom l'indique, elle fait partie de notre environnement depuis toujours. Les animaux et les végétaux ont appris à vivre avec elle, du moins quand elle n'est pas trop intense.

D'où vient-elle ? Des radionucléides naturels. On nomme ainsi les atomes aux noyaux instables présents dans la nature. Ces radionucléides se désintègrent spontanément à des instants aléatoires, chacun étant caractérisé par une « période radioactive », à savoir le temps au bout duquel la moitié des atomes radioactifs initialement présents se sont désintégrés.

Pour l'essentiel, les radionucléides présents dans la nature sont les produits directs ou indirects de la désintégration de trois radionucléides primordiaux, c'est-à-dire présents lors de la formation de la Terre, parmi la vingtaine qui subsistent : l'uranium 238, le thorium 232 et l'uranium 235. En se désintégrant, ces radionucléides primordiaux émettent des particules – c'est-à-dire de la radioactivité – et se transforment en atomes aux noyaux plus légers : les radionucléides secondaires. Ces derniers se désintègrent à leur tour et ainsi de suite jusqu'à formation d'atomes stables. Les périodes radioactives des radionucléides secondaires sont nettement plus courtes que celles des radionucléides primordiaux, mais il arrive qu'elles soient longues, telle celle du radium 226, qui est de 1 620 ans.

La radioactivité naturelle est présente dans les sols à des degrés variables, qui culminent dans les terrains granitiques, nombreux en France dans le Massif central, en Franche-Comté, en Bretagne ou en Corse. Dans la plupart des cas, elle n'est pas dangereuse. Mais il arrive que les activités minières la concentrent, en particulier quand on extrait de l'uranium. Il est alors nécessaire d'y protéger les mineurs et tous les travailleurs manipulant les substances extraites puis retravaillées. Des mesures sont aussi prises pour protéger la population des expositions liées aux résidus miniers de sites actifs ou déjà fermés.

L'exposition au radon, un risque potentiel

Un autre risque lié à la radioactivité naturelle à prendre au sérieux est le radon, un gaz qui émane du sol et qui est donc susceptible de se retrouver piégé dans les bâtiments dont l'air intérieur est mal renouvelé. Le radon inhalé est exhalé, mais ses radionucléides secondaires métalliques se collent aux poussières ou sur les parois respiratoires jusqu'aux poumons. Le radon gazeux et ses formes solides secondaires constituent la principale source d'exposition de la population à la radioactivité naturelle. L'inhalation prolongée du gaz radon peut provoquer des cancers du poumon, d'où l'importance de surveiller ses concentrations et d'intervenir lorsqu'elles sont élevées.

En France, la radioactivité due au radon varie beaucoup selon les endroits, entre

quelques dizaines et plusieurs milliers de becquerels par mètre cube, sachant qu'il est recommandé de ne pas dépasser 300 becquerels par mètre cube.

À partir du sol, les radionucléides se propagent aussi dans les chaînes alimentaires terrestres, mais en général sans s'accumuler dans le corps humain. Ils se concentrent davantage dans les chaînes alimentaires marines. On retrouve ainsi dans les algues, les crustacés, les mollusques et les poissons des concentrations en radionucléides qui varient selon l'époque de l'année. Toutefois, même si l'exposition par cette voie peut être non négligeable, elle n'est jamais préoccupante.

Une autre forme de radioactivité naturelle est le rayonnement cosmique. Sa première composante, des ions ultraénergétiques, est due aux rayonnements provenant de notre galaxie ou d'autres. La seconde, surtout des protons d'énergie plus faible, provient du Soleil et fluctue avec les éruptions solaires. Au niveau du sol, le rayonnement cosmique est inoffensif, mais les personnes qui prennent souvent l'avion ou font des missions spatiales augmentent notablement leur exposition. C'est pourquoi l'exposition des personnels navigants des compagnies aériennes est contrôlée. Du reste, il existe des outils en ligne permettant à chacun de calculer son exposition après un vol. ■

Jean-François LECOMTE est expert en radioprotection à l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire).