



Histoire de rebondissement

Lénaëlle Martin

Maël Colson

Sommaire

Partie 1 : Situation initiale

Partie 2 : Rebond et quantité de mouvement

Partie 3 : Question de timing

Et Après ?

Partie 1 : Pourquoi s'intéresser aux rebonds ?

En observant des situations de rebonds de balle à partir de recherches internet, nous avons été surpris d'observer des rebonds inattendus entre des balles de tailles différentes.

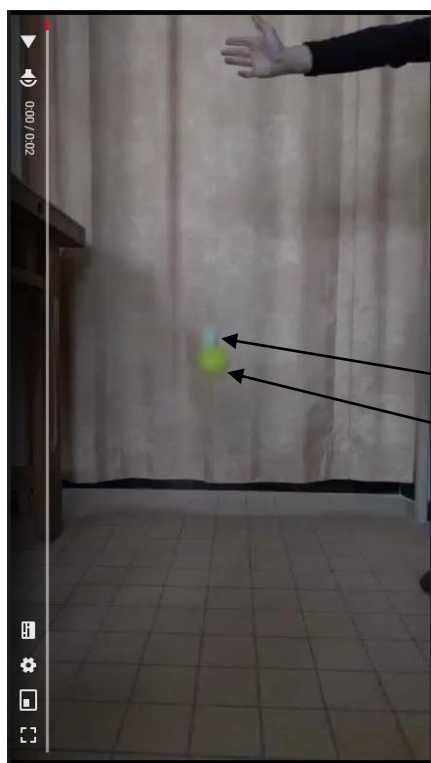
Notamment lorsqu'une balle de tennis est placée au-dessus d'une balle de Basket et qu'elles sont lâchées de façon synchrone, le rebond de la balle de tennis est bien plus important et impressionnant qu'attendu.

https://www.youtube.com/watch?v=yhTz_6NFmVo

Ces observations nous ont amené à un questionnement sur cet effet surprenant :

- Pourquoi une balle plus légère rebondit plus haut que lors d'un simple rebond sur le sol quand elle est propulsée par une balle en dessous d'elle ?

Pour des raisons pratiques (notamment la hauteur sous plafond de notre salle d'expérimentation), notre choix s'est porté sur un système balle de tennis, balle de ping-pong.



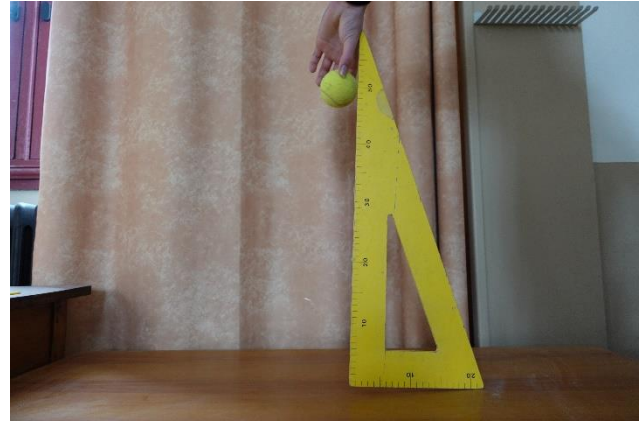
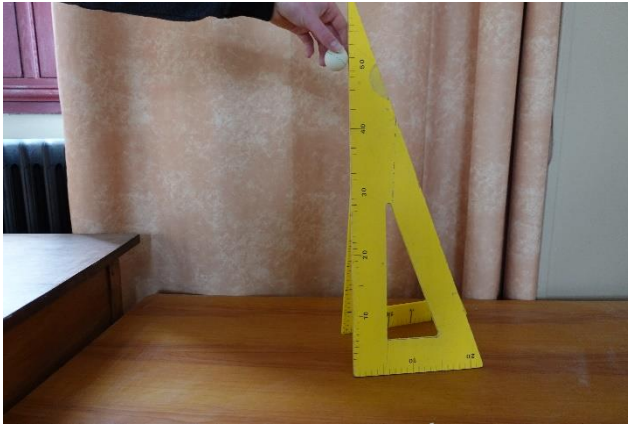
Nous avons donc étudié dans un premier temps des rebonds avec le sol et notre système de balles.

Balle de Ping-pong

Balle de Tennis

Mais comment cela rebondit ?

Nous nous sommes dans premier temps intéressés aux coefficients de restitution des balles seules en lâchant ces balles d'une hauteur de 0,50 m. Le coefficient de restitution correspond au rapport hauteur de rebond sur hauteur du lâcher si l'on néglige les frottements de l'air.



| Balle | Ping-pong | Tennis | Basket |
|----------------------------|-----------|---------|---------|
| Hauteur de lâcher | 0,50 m | 0,50 m | 0,50 |
| Hauteur de rebond | 42,5 cm | 37,5 cm | 36,0 cm |
| Coefficient de restitution | 0,85 | 0,75 | 0,72 |

Tab.1 : coefficients de restitution

D'où provient l'énergie qui propulse la balle de ping-pong ?

On peut alors s'intéresser au coefficient de restitution du rebond de la balle de ping-pong sur la balle de tennis :

| Balle | Ping-pong |
|----------------------------|-----------|
| Hauteur de lâcher | 0,50 m |
| Hauteur de rebond | 38,0 cm |
| Coefficient de restitution | 0,76 |

Tab.2 : coefficient de restitution entre balles

La balle de ping-pong rebondit presque aussi bien sur le sol que sur la balle de tennis. Le seul rebond entre balles ne permet donc pas d'expliquer le phénomène observé.

• Propriétés des balles :

| Balle | Ping-pong | Tennis |
|-------|-----------|--------|
| Masse | 2,7 g | 53,6 g |

Tab.3 : Propriétés physiques de balles

• Energies mises en jeu :

L'énergie potentielle de position initiale est définie comme l'énergie potentielle lors du lâcher sans vitesse initiale. L'énergie potentielle de position finale correspond à l'énergie potentielle lorsque la balle atteint sa position maximale après le rebond (vitesse de nouveau nulle). D'après le tableau 4, la balle de ping pong perd 15% de son énergie lors d'un choc sur une surface dure tandis que la balle de tennis perd 25% .

| Balle | Ping-pong | Tennis |
|--|-----------|----------|
| Energie potentielle de position initiale | 13,2 mJ | 262,6 mJ |
| Energie potentielle de position finale | 11,2 mJ | 197,0 mJ |
| Energie perdue par la balle lors du rebond | 2,0 mJ | 65,6 mJ |

Tab. 4 : énergies mises en jeu

Partie 2 : rebonds et transfert d'énergie

Après explication par nos professeurs, le choc est dit « inélastique » car de l'énergie est perdue. Il est toutefois possible de prédire les valeurs des vitesses après le choc dans le cas élastique, c'est-à-dire lorsque l'énergie se conserve. Notons (1) la balle de tennis et (2) la balle ping-pong, la conservation de la quantité de mouvement de d'énergie cinétique s'écrit, en notant x' les grandeurs après le choc :

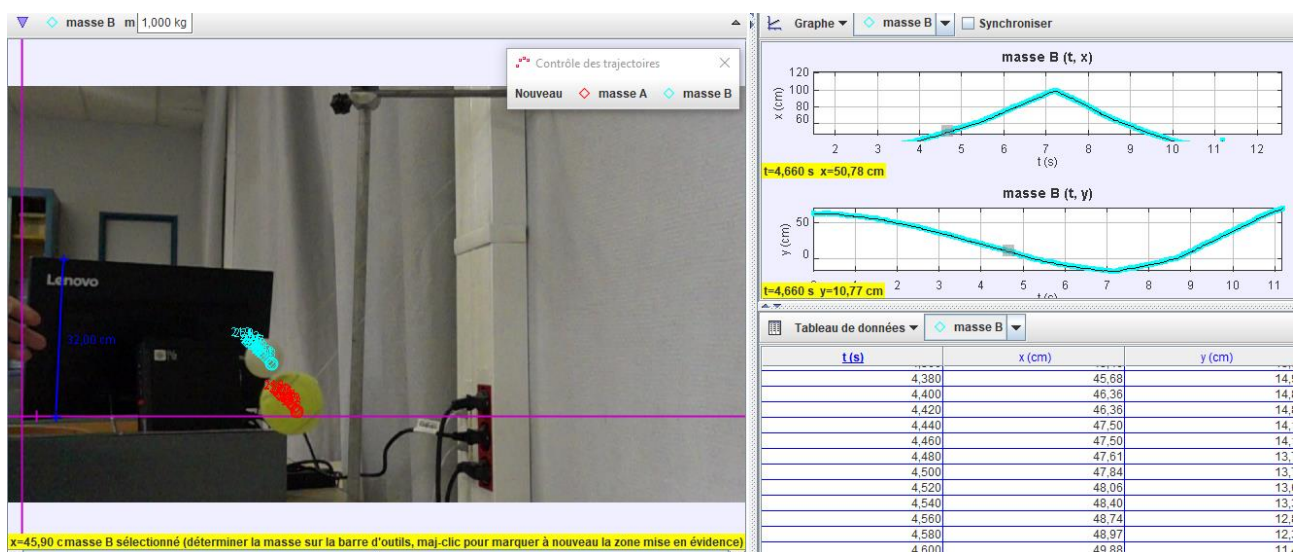
$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

$$1/2 m_1 v_1^2 + 1/2 m_2 v_2^2 = 1/2 m_1 v'^2_1 + 1/2 m_2 v'^2_2$$

Lorsque les masses sont très différentes ($m_2 \ll m_1$), il est possible de montrer que $v'_2 = 3 v_1$! [1]

Devant les difficultés pour lancer les balles parfaitement l'une au-dessus de l'autre, nous avons décidé de rendre l'expérience reproductible plus facilement. Nous avons eu l'idée d'effectuer les rebonds sur un mur, en suspendant les balles sur un même axe. Le mouvement est alors une rotation autour de cet axe mais lorsque les ficelles sont suffisamment grandes, on peut considérer que le mouvement est selon un seul axe.

Après avoir fait l'acquisition vidéo, on mesure les différentes positions et on calcule l'énergie cinétique et la quantité de mouvement.



| Balle | Ping-pong | Tennis | Energie du système |
|-----------|------------------------|--------------------------|--------------------|
| Avant | $45 \pm 15 \text{ mJ}$ | $650 \pm 325 \text{ mJ}$ | 695 mJ |
| Après | $85 \pm 25 \text{ mJ}$ | $350 \pm 180 \text{ mJ}$ | 435 mJ |
| Evolution | 189% | 53,8% | 62,6% |

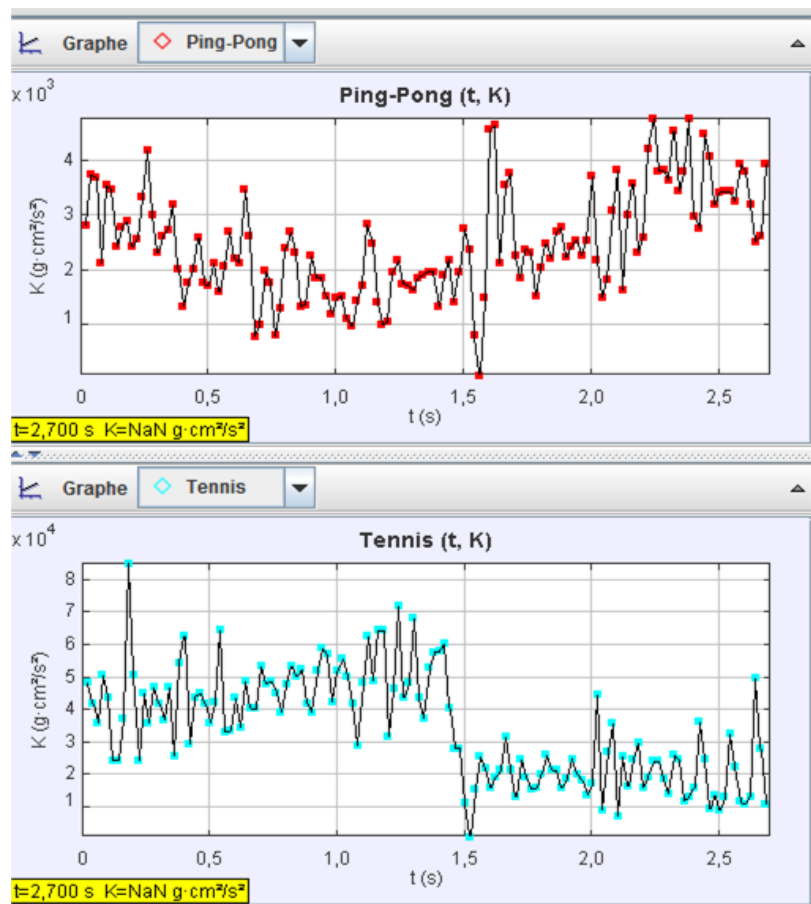
Tab. 5 : Energie cinétique avant et après le choc (lâcher à 1 m)

| Balle | Ping-pong | Tennis |
|-------|-----------|------------|
| Avant | 15,6 mN.s | 264,0 mN.s |
| Après | 21,4 mN.s | 193,7mN.s |

Tab. 6 : Quantité de mouvement des balles avant et après le choc

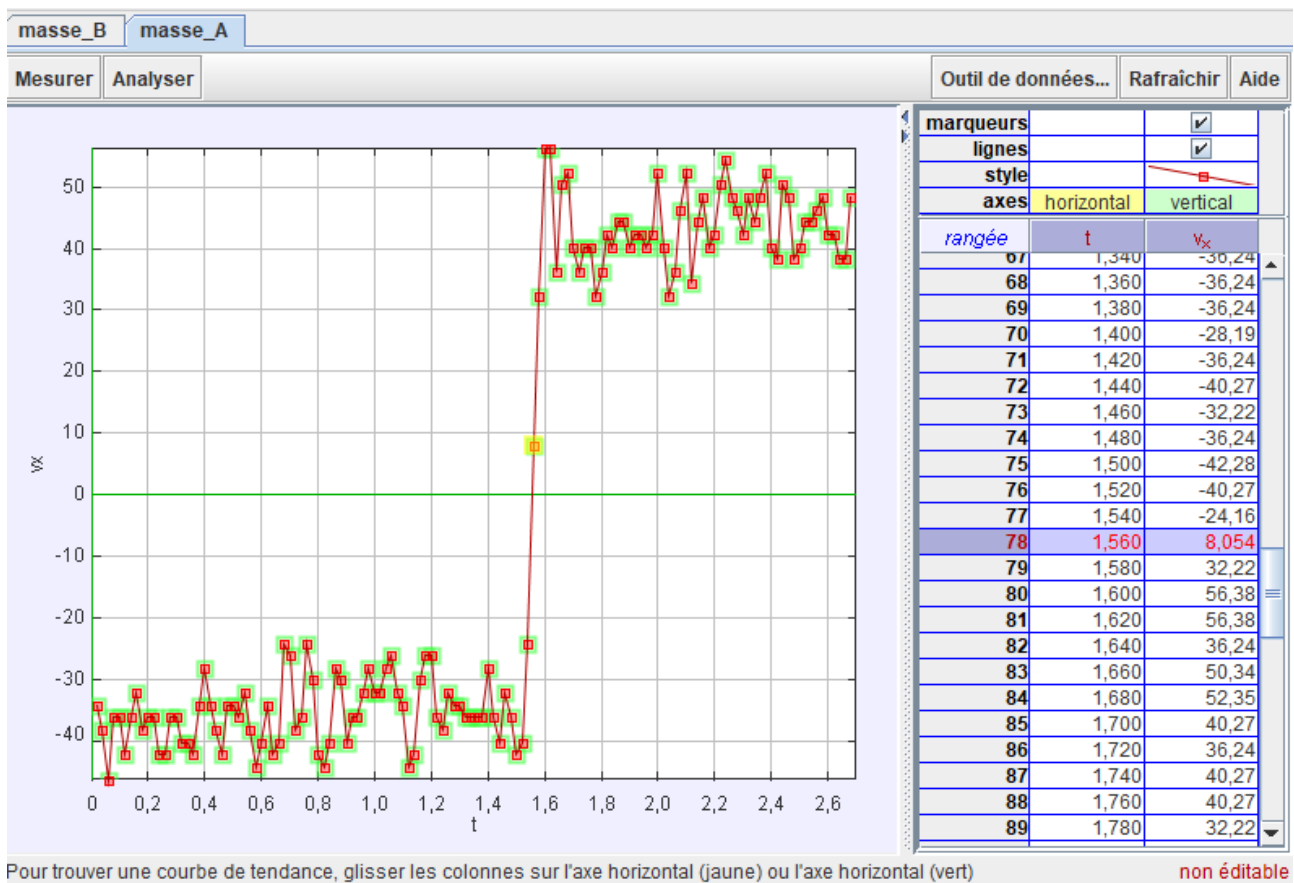
Les données relevées montrent que de l'énergie est dissipée dans le mur lors du choc (de l'ordre de 27,4%), et de l'énergie est transmise de la balle de tennis vers la balle de ping-pong.

- Evolution de l'énergie cinétique de la balle de ping-pong :



Graph.2 : Evolution des énergies cinétiques des 2 balles

Le graphique concernant la balle de ping-pong confirme bien l'augmentation de son énergie cinétique au cours du choc. Celui concernant la balle de tennis montre bien une diminution de son énergie cinétique. L'impression d'avoir plus d'énergie après le choc est donc une illusion, car cela revient à ne considérer que la balle de ping-pong.



Graph.1 : Evolution de la vitesse selon Ox proche du choc

L'impact a lieu à la date $t = 1,5$ s. La vitesse négative (sens inverse de l'axe) de la balle de ping-pong est de $v_1 = 37 \text{ cm.s}^{-1}$ et la vitesse négative (de sens opposée après le choc) est de $v_2 = 43 \text{ cm.s}^{-1}$.

Suite à nos recherches, nous avons découvert que le système de rebond à deux balles à déjà été étudié [1] mais avec des moyens dont nous ne disposons pas (la caméra utilisée effectue 40 000 i/s soit 40 fois plus d'images que la notre)

Figure issue de The two-ball bounce problem. Proc. R. Soc. A

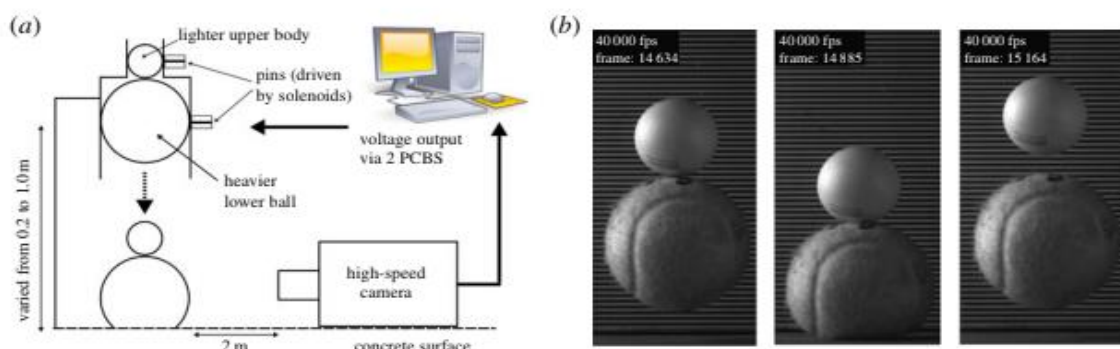


Figure 1. (a) A schematic of the experimental set-up. (b) Stills from high-speed camera for an instance of the 'two-ball bounce problem', in this case a tennis ball and a table tennis ball impact. (Online version in colour.)

Hypothèse pour expliquer le phénomène observé :

- L'importance du décalage entre les deux balles qui se crée au cours du mouvement :

Sans ce décalage la première balle n'a pas le temps de faire son rebond, et les 2 corps sont considérés comme solidaire et ne constituant qu'une seule masse.

S'il est trop important, la balle de ping-pong rebondi sur celle de tennis mais dans sa phase descendante, ce qui amortit le rebond.

- Expérimentation :

Pour rendre solidaire les deux balles, on utilise un peu de colle bâton entre les 2 balles pour qu'elles restent attachées l'une à l'autre durant la chute.

- La phase d'accélération peut aussi venir de l'écrasement de la balle de tennis, qui dans son mouvement inverse va donner une phase d'accélération plus importante de la balle de ping-pong.

Il semble que les temps d'impact et de déformation soient cruciales dans ces types de rebonds :



Nous avons contacté des chercheurs de l'université de Sofia Antipolis qui se sont penchés sur ce problème :

« The experimental setup consists in a catapultlike engine built with a spring of variable stiffness. A similar setup was used by Clanet et al [16] to emphasize the droplet deformation under strong acceleration. The catapult is initially loaded and maintained at rest with an electromagnet. The initial distance between the plate and its equilibrium position can be varied and is typically of a few millimeters. Once the electromagnet is switched on, the plate is subject to a sudden and large acceleration, typically 10 times the gravity. »

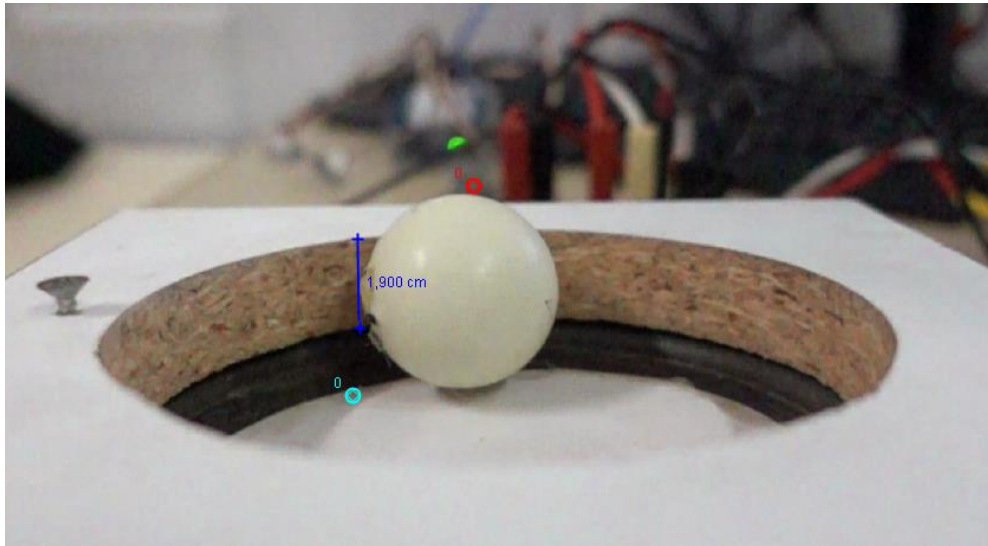
by Christophe Raufaste, Gabriela Ramos Chagas, Thierry Darmanin, Cyrille Claudet, Frédéric Guittard, Franck Celestini, from HAL archive ouvertes; Id: hal-01584717 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01584717>

Ils nous ont expliqué ces expériences constituent un thème de recherche actuel avec de vastes applications (crash-tests, absorption de choc, ...)

Partie 3 : Le bon timing

- Essais de crépitement sur le Haut-Parleur :

On s'intéresse donc maintenant à la phase où la balle de ping-pong rebondit le plus haut avec la balle de tennis. Pour ce faire, on enlève la balle de tennis de l'équation, et on la remplace par un haut-parleur, possédant un mouvement périodique de type sinusoïdal permettant d'étudier les rebonds en fonction de la fréquence d'alimentation du haut-parleur.



Le crépitement de la balle de ping-pong sur un haut-parleur permet de voir à de basses fréquences des rebonds importants ou au contraire un amortissement de la balle.

Nous avons pointé la surface du haut-parleur en même temps que le mouvement de la balle.

Nous avons alors remarqué un phénomène qui n'est pas visible à l'œil nu ;

- lorsque la balle est phase avec le haut parleur, le mouvement est amorti.
- Lorsque la balle tombe sur le haut parleur en phase montante, la balle présente un grand rebond.

Un chercheur de l'université de Nice M. **Franck Celestini** nous a même appris qu'il avait fait une étude similaire montrant que le système de rebond devient chaotique[2]

Pour valider l'hypothèse selon laquelle, le mouvement de la surface de la balle de tennis joue un rôle important dans le mouvement de la balle de ping pong, nous avons décidé de synchroniser le mouvement de la balle de ping pong avec la membrane du haut parleur grâce à un dispositif arduino.

Tentatives de synchronisation :

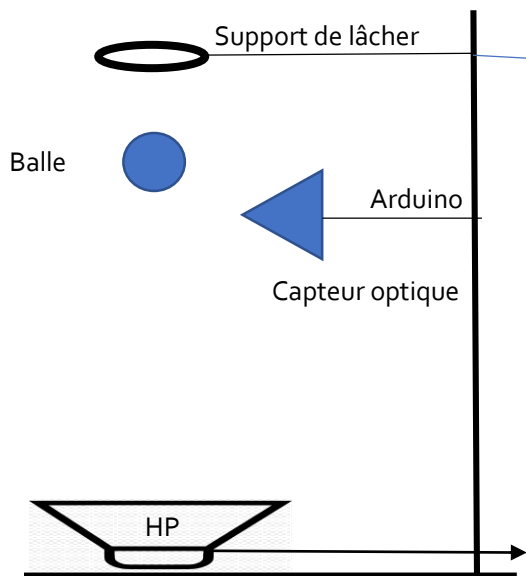


Schéma : tentative de synchronisation HP-balle

Il a été très difficile en lâchant la balle d'une hauteur toujours identique d'obtenir des rebonds reproductibles.

L'augmentation de la fréquence de la membrane aggrave le problème, et la diminution de la fréquence de la membrane diminue l'accélération qu'elle peut transmettre à la balle de ping-pong.

Suite à un échange avec des chercheurs de l'université de Sofia-Antipolis de Nice, on peut remédier à ce problème en effectuant une étude statistique sur différentes hauteurs.

Pour l'instant, la rapidité du détecteur de position ne nous permet pas de faire d'expérimentations plus précises. Malgré tout on peut réutiliser l'expérience initiale

avec d'autres balles, ou juste en les inversant, pour tenter de faire d'autres mesures.

Et ensuite ? Ouvertures et pistes :

On peut faire un rapprochement avec l'étude de la projection des gouttes d'eau. M. Raufaste de l'université de Nice nous a montré leurs expériences effectuées à partir de goutte d'eau ainsi qu'à partir de matériau composé d'un corps dur et d'un mou. Les rebonds observés dépendent énormément des comportements élastiques des matériaux utilisés.



Par exemple, lorsqu'une goutte d'eau tombe dans une flaque, il y a propulsion d'une partie de la goutte incidente de façon identique à une membrane (surface de l'eau) comme dans notre dernière expérience.

Ce principe des rebonds, on peut parler de l'odeur de la pluie, le péttrichor, qui est en fait l'odeur de la terre dû aux microgouttelettes qui rebondissent sur les gouttes largement plus grandes, ayant été en contact avec la terre, et de son odeur. Même si l'eau est viscoélastique, le procédé de rebond est assez similaire. Nous avons été étonnés d'avoir mené des expériences voisines de celles effectuées actuellement dans des laboratoires de recherche.

Bibliographie

[1] Berdeni Y, Champneys A, Szalai R.2015, The two-ball bounce problem. Proc. R. Soc. A

[2] Dynamics of a ball bouncing on a vibrated elastic membrane PRE 2010

[3] Christophe Raufaste, et al.. Superpropulsion of Droplets and Soft Elastic Solids. Physical Review Letters, American Physical Society, 2017, 119, pp.108001