

Une histoire pleine de rebondissements...

Un mémoire de : Clochard Aymeric, Hebrard de Veyrinas Mélanie
Kurdziel-Vincent Oscar et Prouteau Thomas.
Encadrés par: Clément Tristan et Meyer Jean-Brice.





Thomas PROTEAU

Au départ, j'ai participé à ce projet par simple curiosité, et je n'imaginai pas que nous irions aussi loin dans nos recherches. Aujourd'hui, je me rends compte à quel point mon engagement m'a permis de progresser. Cette expérience m'a permis d'approfondir mes connaissances scientifiques à travers une démarche expérimentale concrète, ce qui est particulièrement formateur.

J'ai personnellement participé au très grand nombre d'expériences et d'analyses de données et j'ai pris conscience de la nécessité d'être rigoureux pour obtenir des informations fiables. Cela a demandé un investissement régulier : nous nous sommes réunis tous les mercredis après-midi depuis le mois d'octobre, et nous avons même utilisé quelques jours de vacances pour finaliser nos tests.

Malgré la quantité importante de mesures à effectuer sur le rebond des balles, nous avons su rester organisés. L'utilisation d'un drive dont j'étais responsable nous a permis de gagner en efficacité. Enfin, j'ai particulièrement apprécié les phases d'analyse et d'interprétation des résultats, qui permettent de donner du sens à nos observations.

Oscar VINCENT-KURDZIEL

Mon implication dans ce projet a été totale, que ce soit au lycée dans des temps de réflexion et d'expérimentation avec toute l'équipe ou bien lorsqu'il s'agissait de faire la partie la plus fastidieuse du projet depuis derrière mon ordinateur. Bien que ce projet ait été très chronophage je ne regrette en rien d'y avoir pris part pour plusieurs raisons. Dans un premier temps cela m'a permis de découvrir les bases de ce qu'est la physique expérimentale chose qui n'est pas forcément possible en cours. De plus, participer à ce concours nécessite une exigence très enrichissante aussi bien sûr un plan physique que social. Et pour terminer, le point le plus important est que j'ai passé pleins de bons moments et que ce n'est pas fini. On peut dire que ce projet remplit à la fois de balle, de travail mais aussi de bonne humeur !

Mélanie HEBRARD DE VEYRINAS

Je me suis beaucoup investie dans la partie expérimentale du projet, en participant directement aux manipulations, notamment lors de notre passage au laboratoire. J'ai aussi contribué à l'étude et à l'interprétation des résultats obtenus. J'ai participé aux manipulations ainsi qu'à la collecte des données, ce qui m'a permis de mieux comprendre les protocoles expérimentaux. Ce projet a été très enrichissant pour moi car il m'a permis de découvrir une démarche scientifique plus concrète que d'habitude, en travaillant sur un projet sur la durée. Le travail en équipe a aussi été un aspect important, avec une bonne entraide entre nous. Cela m'a permis de développer mon organisation et mon esprit d'analyse, mais aussi de mieux comprendre comment se construit un raisonnement scientifique en pratique.

Aymeric CLOCHARD

Ce projet a été la première démarche expérimentale à laquelle j'ai pris part en dehors de mes cours, et je ne m'attendais pas à ce qu'il soit aussi concret et intéressant. J'ai pu expérimenter, traiter et exploiter des données, et réfléchir à des explications théoriques aux phénomènes que j'ai pu observer. J'ai particulièrement apprécié d'avoir pu faire toutes ces tâches différentes, grâce à une répartition efficace des rôles entre nous et une bonne mise en commun de nos hypothèses et conclusions. Même si cela me demande un certain investissement, ce projet m'a permis de réaliser ce qu'était une véritable démarche scientifique, et a renforcé ma conviction de continuer à faire de la science plus tard. J'ai pu passer de bons moments tout en faisant des choses que je n'aurais pas imaginé faire avant.

Résumé :

Nous avons étudié la façon dont une balle de ping-pong rebondit. Mais bien que ce sujet soit loin d'être simple, nous avons pu le découvrir au cours de notre projet, nous avons en plus rempli la balle de différents ingrédients. Suffisamment d'ingrédients en tout cas pour aboutir à des réflexions qui nous ont souvent passionnés, et qui nous ont aussi fait douter. Alors que les balles remplies de différents liquides rebondissent quasiment à la même hauteur, d'autres variables montrent des comportements différents d'une balle à l'autre, comme par exemple la durée ou encore la surface de contact. Autant de données que nous avons pu exploiter pour tenter d'expliquer nos observations. C'est cette démarche d'investigation que nous présentons dans ce mémoire.

Sommaire :

I – Mise en évidence de l'énergie perdue lors du rebond de la balle	Page 3
II – Approche dynamique du rebond et recherche d'un modèle	Page 6
III – Comment la balle rebondit-elle une fois remplie de différents liquides	Page 12
IV – Que se passe-t-il dans le liquide lors de l'impact ?	Page 14
V – Balles partiellement remplies – Vers un marteau sans rebond	Page 20

Bibliographie / Webographie :

- []Physique – De Boeck – Perez – Lagoute – Compressibilité des liquides
- []<https://experts-insitu.com/wp-content/uploads/2019/04/cours-hydraulique-82-la-compressibilite.pdf> Compressibilité - Variation du volume avec la pression
- Loi de Hertz : <https://perso.ens-lyon.fr/jean-christophe.geminard/FILES/gpuydt.pdf>
- https://www.engineersedge.com/materials/bulk_modulus_15780.htm
- <https://www.lpens.ens.psl.eu/wp-content/uploads/2021/12/MecaniqueCoursEnonce.pdf>

Lien vers la vidéo du mémoire :

<https://youtu.be/9aHPGZNXhHY>

Introduction :

Nous nous sommes amusés à remplir une balle de ping-pong avec de l'eau. Nous avons alors été surpris de la voir rebondir apparemment de la même manière qu'une balle de ping-pong remplie d'air, c'est-à-dire quasiment à la même hauteur. Est-ce réellement le cas et pouvait-on s'y attendre ? Répondre à cette dernière question revient à étudier précisément ce qui se passe au moment de l'impact de la balle sur la table.

Dans ce rapport, nous axons tout d'abord notre travail sur les balles remplies d'air et remplies d'eau, pour aboutir à une discussion énergétique qui nous occupera tout au long du mémoire. Puis nous étudierons le problème sous un angle dynamique, avant de remplir les balles de différents liquides, présentant des caractéristiques variables. Enfin, comme plusieurs phénomènes physiques peuvent intervenir lors du rebond, nous tenterons de faire la part des choses de façon argumentée.

I – Mise en évidence de l'énergie perdue lors de l'impact de la balle

1) A quelles hauteurs rebondissent ces deux balles ?

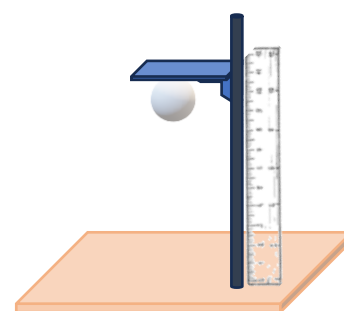
Prenons le temps de comparer les hauteurs auxquelles les balles remplies d'air et remplies d'eau rebondissent.

Deux précisions tout de même avant d'entrer dans le vif du sujet concernant les conditions expérimentales:

- Nous avons travaillé avec des balles identiques, « Artango 40+ » de la marque Décathlon. Nous nous sommes assurés que ces balles avaient des masses similaires, en mesurant les masses de 34 balles. Nous avons pu constater que leur masse était relativement constante, égale à 2,79 g avec un écart-type de 0,07 g et une incertitude absolue de 0,03 g avec un intervalle de confiance à 95 %.

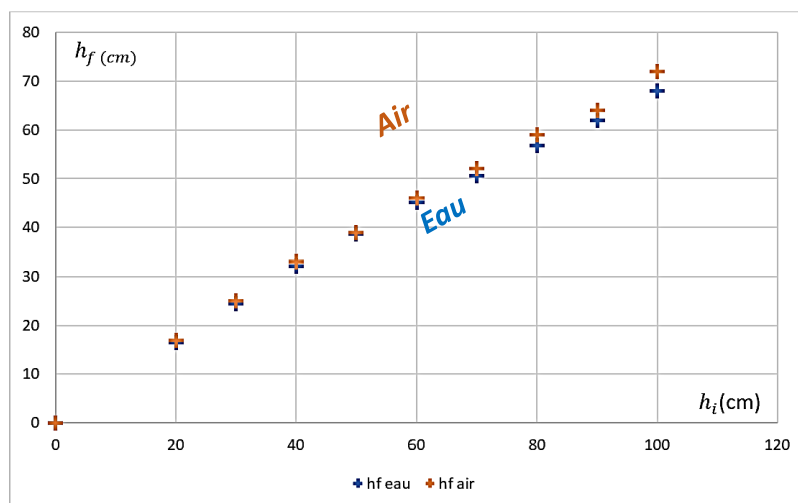
$$m_{balle} = (2,79 \pm 0,03) \text{ g}$$

- Pour lâcher la balle d'une hauteur connue avec une bonne précision, nous avons disposé une équerre rigide que nous pouvons déplacer le long d'un mat vertical, et nous tenions toujours la balle contre cette équerre avant de la lâcher (voir figure ci-contre)



Nous avons alors commencé par faire tomber une balle remplie d'air, en la lâchant de différentes hauteurs h_i , et nous avons mesuré la hauteur h_f à laquelle elle remonte. Puis nous avons fait de même avec une balle remplie d'eau. Voici les résultats obtenus : figure 1

Figure 1 : évolution de la hauteur du rebond en fonction de la hauteur du lâcher pour les balles de ping-pong pleines d'air et pleines d'eau.



Ces résultats expérimentaux montrent effectivement que les deux balles rebondissent quasiment à la même hauteur. On remarque toutefois que plus la hauteur de lâcher est grande, et plus une différence de hauteur de rebond apparaît.

En réalité, comparer les hauteurs des rebonds pour étudier ce qui se passe lors de l'impact n'est pas ce qu'il y a de plus pertinent. En effet, dans le cas de la balle de ping-pong remplie d'air, des forces de frottement avec l'air peuvent ne pas être négligeables devant la force de pesanteur durant la montée et la descente de la balle, alors qu'elles le sont sans équivoque dans le cas de la balle remplie d'eau.

2) Influence de la force de frottement fluide sur la balle remplie d'air :

En effet, la masse de la balle remplie d'air étant $m = 2,7 \text{ g}$, la force de pesanteur exercée sur la balle remplie d'air vaut $P = 0,0027 \times 9,81 = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ N}$

Quant à la force de pesanteur exercée sur la balle remplie d'eau, de masse $m' = 35 \text{ g}$, elle vaut $P = 0,035 \times 9,81 = 0,34 \text{ N}$

Comparons ces forces à la force de frottement :

D'après la littérature scientifique, une balle de ping-pong lâchée d'une hauteur de 1m atteint une vitesse suffisamment grande pour subir des forces de frottement proportionnelles à la vitesse au carré, telles que $F = 3,4 \cdot 10^{-4} \times v^2$. Et pour connaître la vitesse de la balle lors de sa chute, nous avons lâché et filmé la chute d'une balle d'une hauteur de 2,50 m. Nous avons alors relevé sa position au cours de la chute. Nous avons ensuite dérivé la position pour avoir la vitesse, et nous avons pu en déduire la vitesse de la balle après 1 m de chute (atteinte au bout de 436 ms) : figure 2.

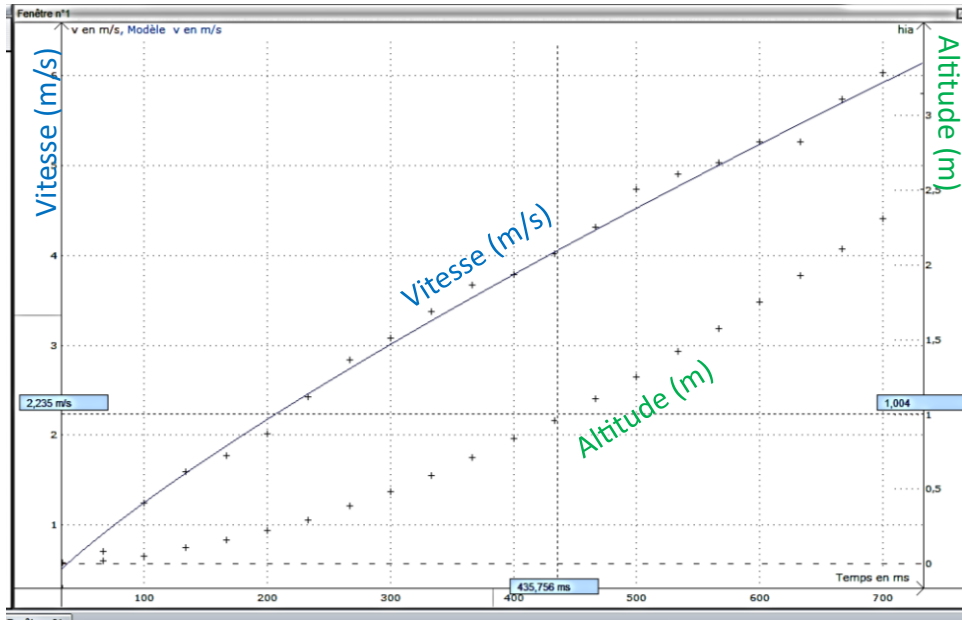


Figure 2 : Evolution de la position et de la vitesse d'une balle vide lâchée à 250 cm de hauteur pour estimer les frottements.

Nous mesurons une vitesse de 4 m/s (au lieu de 4,4 m/s que l'on aurait obtenu dans le cas de l'absence de forces de frottement). Avec une telle vitesse, la force de frottement serait égale à $5,4 \cdot 10^{-3} N$. Cette force est bien négligeable par rapport à la force de pesanteur exercée sur la balle remplie d'eau, mais ne l'est pas sur la balle remplie d'air puisqu'elle représente environ 20% de la valeur de la force de pesanteur qu'elle subit.

Par conséquent, plutôt que de tracer la hauteur du rebond en fonction de la hauteur de lâcher pour comparer le rebond de ces deux balles, nous avons tracé la vitesse immédiatement après le rebond, en fonction de la vitesse immédiatement avant le rebond.

3) Comparaison de la variation d'énergie cinétique perdue lors de l'impact

Il fallait réaliser des mesures précises, ce que nous avons pu faire en filmant le rebond de la balle avec une caméra à 40 000 images par seconde. Nous avons réalisé cinq mesures, pour cinq hauteurs de chute différentes, et voici ce que nous avons obtenu pour la balle remplie d'air et pour celle remplie d'eau : figure 3.

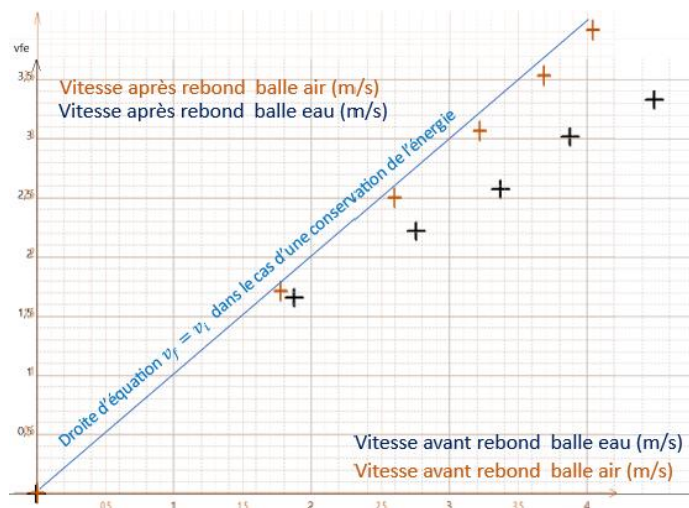


Figure 3 : Vitesse immédiatement après le rebond en fonction de la vitesse immédiatement avant le rebond pour les balles air et eau.

On peut remarquer que finalement, même si la balle remplie d'eau rebondit étonnamment haut, à vitesse avant l'impact égale, la balle remplie d'air rebondit plus haut que la balle remplie d'eau.

D'autre part, comme sur le graphique apparaissent les vitesses immédiatement avant et après l'impact, nous pouvons estimer la variation d'énergie cinétique du centre d'inertie de la balle au moment du choc :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2)$$

Et sans faire de calcul, il apparaît clairement que pour la balle remplie d'air, cette variation d'énergie cinétique est très faible comparée à celle subie par la balle remplie d'eau. Et ceci est d'autant plus vrai que la balle tombe d'une grande hauteur.

Où passe cette énergie ? Une partie est transformée en énergie acoustique et est donc perdue par la balle. On peut aussi supposer qu'une autre partie est convertie en énergie thermique lors de l'impact. D'autre part, lors de l'impact, la balle fait vibrer le support et cela n'est pas sans conséquence : nous avons fait ces expériences sur un bureau d'épaisseur environ 2 cm, puis sur un plan sous lequel se trouvait un pied, empêchant la vibration du plan à l'endroit de l'impact, et les différences de hauteur de rebond étaient considérables. Nous avons d'ailleurs choisi de réaliser toutes nos expériences en évitant cette vibration de la table.

Mais il y a aussi la possibilité que l'énergie soit perdue dans la déformation de la balle lors du choc, qui serait d'autant plus grande que la balle tombe d'une grande hauteur : lors de l'impact, la balle doit se déformer de façon inélastique probablement du fait d'une certaine viscoélasticité de la balle.

Et il y a aussi la possibilité que l'eau bouge dans la balle lors de l'impact, ce qui traduirait un transfert d'énergie entre l'énergie cinétique du centre d'inertie de la balle et l'énergie associée à un mouvement de l'eau par rapport à la balle. L'eau pourrait par exemple tourner à l'intérieur de la balle suite à l'impact.

Nous avons voulu tester ce dernier point en mesurant le rebond de balles partiellement remplies d'eau, avec des volumes d'eau de 5 ml, 10 ml, 15 ml, 20 ml, 25 ml et 28 ml, sachant que la balle de ping-pong peut contenir un maximum de 31 ml.

Nous avons fait chuter ces balles de quatre hauteurs différentes : 30, 40, 50 et 70 cm. Parmi toutes les balles partiellement remplies d'eau, seules les balles remplies avec 5 ml d'eau et 28 ml d'eau rebondissent de façon significative. La balle remplie avec 28 ml d'eau rebondit à des hauteurs identiques à la balle entièrement remplie d'eau. Or, le fait que cette balle soit partiellement remplie d'eau (puisqu'il reste environ 3 ml disponibles), permet davantage à l'eau de bouger à l'intérieur de la balle lors de l'impact, qu'elle ne peut le faire dans la balle entièrement remplie d'eau. Et pourtant, cela n'a pas de conséquence sur le rebond de la balle. On peut donc en déduire que l'énergie perdue lors du rebond n'est pas due à un mouvement de l'eau à l'intérieur de la balle.

Par contre, il peut y avoir un déplacement très localisé de l'eau dans la zone d'impact, ce qui peut représenter une contrainte à la déformation de la coque de la balle.

Notre réflexion nous amène donc au raisonnement suivant : une balle remplie d'eau va acquérir davantage d'énergie cinétique au moment de l'impact qu'une balle remplie d'air. Cette énergie cinétique va être transmise à la balle, sous forme d'une énergie potentielle élastique, de la même manière qu'un perchiste transfère son énergie à sa perche. La coque se déforme donc, puis reprend sa forme en transférant à la balle son énergie potentielle sous forme d'énergie cinétique. La balle remonte. Donc plus la balle a une grande masse, et plus elle doit se déformer (car $E_c = 0,5mv^2$), mais l'eau représente également sans doute une contrainte pour la déformation de la coque.

A nous maintenant de vérifier tout cela.

Puisque cette déformation est engendrée par la force exercée par le support sur la balle, nous avons voulu évaluer cette force, et la comparer pour une balle remplie d'air et une balle remplie d'eau.

II – Approche dynamique du rebond et recherche d'un modèle

1) Evaluation de la force subie par la balle lors de l'impact

Représentons la balle au moment du choc : figure 4

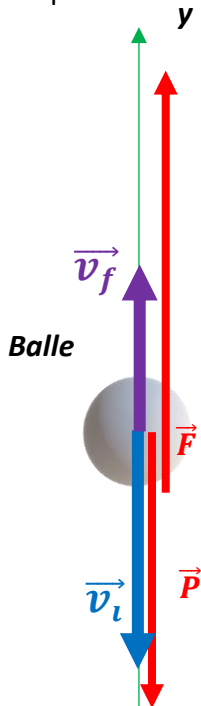


Figure 4 : schéma représentatif d'une balle au moment de l'impact

Nous allons appliquer la deuxième loi de Newton à la balle.

La balle passe d'une vitesse \vec{v}_i immédiatement avant le choc, à une vitesse \vec{v}_f immédiatement après le choc, durant la durée du choc Δt .

L'accélération de la balle lors du choc est donc

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t}$$

Projeté sur l'axe (Oy),

$$a_y = \frac{v_{fy} - v_{iy}}{\Delta t} = \frac{v_f + v_i}{\Delta t}$$

Comme par ailleurs,

$$\sum_i \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$$

En appelant \vec{P} la force de pesanteur appliquée à la balle, et \vec{F} la force exercée par la table sur la balle,

$$\vec{P} + \vec{F} = m\vec{a}$$

Comme

$$\vec{P} \begin{pmatrix} P_x = 0 \\ P_y = -P \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \vec{F} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}$$

On en déduit que

$$F_y - P = m \frac{v_f + v_i}{\Delta t} \Leftrightarrow F_y = m \left(g + \frac{v_f + v_i}{\Delta t} \right)$$

Pour faire ces calculs, nous avons choisi d'utiliser les vitesses v_i et v_f calculées grâce aux vidéos réalisées à l'université avec la caméra à 40 000 images par seconde.

Quant à la durée de l'impact, nous avons tenté dans un premier temps de l'évaluer grâce à l'expérience suivante : figure 5

Un faisceau LASER légèrement incliné par rapport à l'horizontale se réfléchit sur une surface vitrée collée sur un bloc de bois massif. Le rayon réfléchi est alors envoyé vers une photodiode. Quand la balle percute la surface, cela obture le faisceau Laser, ce qui conduit à une chute de tension aux bornes de la résistance. La difficulté est de faire tomber très précisément la balle au point d'impact du faisceau Laser sur la vitre. Pour cela, on guide la balle au plus près à l'aide d'un tube de diamètre à peine plus grand que celui de la balle. Comme nous supposons que la durée de l'impact dépend de la hauteur de chute, nous avons fait ces mesures pour des chutes de hauteur 12 cm, 20 cm, 40 cm et 70 cm.

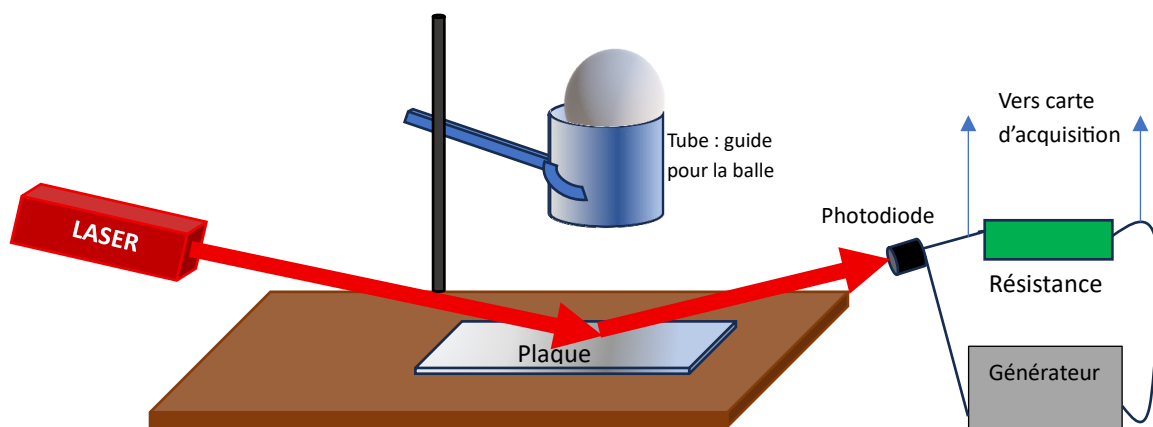


Figure 5 : Dispositif pour évaluer la durée du contact lors de l'impact de la balle sur le support

Les résultats montrent alors des durées de contact qui vont d'environ 400 à 1000 μs pour la balle remplie d'air, et de 1000 à 2800 μs pour les balles remplies d'eau, mais de façon parfois très variable pour une même balle et une même hauteur de chute. Cela nous a montré que nos expériences manquaient cruellement de précision quant au point d'impact de la balle, même avec le guide cylindrique.

C'est la raison pour laquelle nous sommes entrés en contact avec la composante Pprime de l'université de Poitiers. Vu les mesures de durée obtenues, nous avons calculé qu'une caméra filmant la zone du choc à 40000 images par seconde permettrait de visualiser un minimum de 16 images durant les contacts les plus courts. Voici le dispositif expérimental et un exemple de cliché obtenu juste avant l'impact : figure 6.

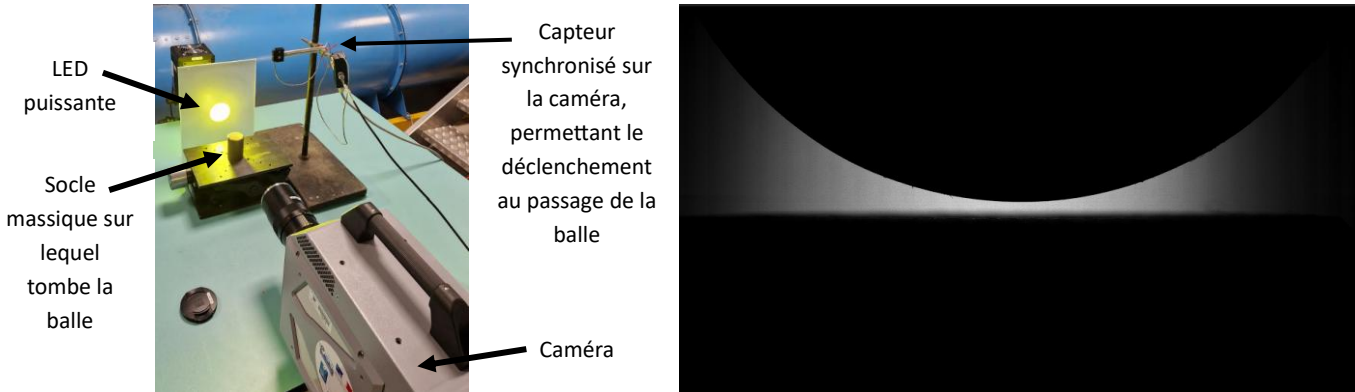


Figure 6 : A gauche : dispositif expérimental pour la captation – A droite, une image parmi tant d'autres d'une balle juste avant l'impact.

Grâce à ce dispositif expérimental, nous avons alors pu obtenir les durées de contact suivantes, en fonction de la hauteur des lâchers, en réalisant cinq lâchers pour chaque hauteur pour chacune des deux balles : figure 7a ci-contre. Nous commenterons ces résultats par la suite. En attendant, nous pouvons nous en servir pour évaluer la valeur de la force recherchée. Nous obtenons des forces F ci-contre (figure 7b), en fonction de la hauteur de chute :

H (cm)	VIDE (ms)	EAU (ms)
20	0,558	1,817
40	0,583	1,700
60	0,542	1,658
80	0,550	1,642
100	0,533	1,683

H (cm)	F(N)	F(N)
20	17	70
40	24	105
60	32	129
80	36	151
100	41	167

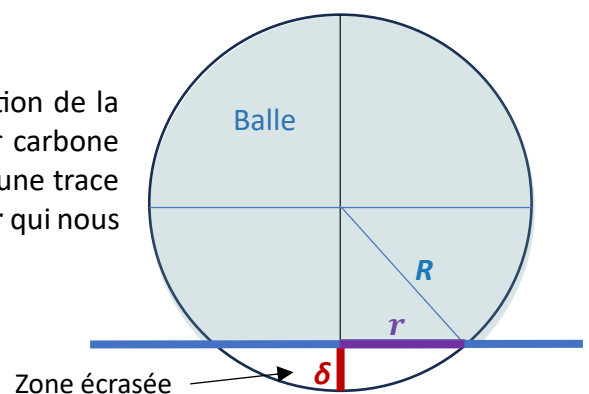
Figure 7 : En haut : durée de contact lors de l'impact. En bas : calcul de la force subie par la balle lors de l'impact

La force qui catapulte la balle vers le haut est donc comme prévu bien plus forte pour la balle remplie d'eau. On peut être étonné de la valeur de cette force pour une hauteur de 100 cm, car c'est comme si lors de l'impact, la balle en plastique recevait un coup par une masse d'environ 17 kg ! Nous savons maintenant quelle force subit la balle. Si nous pouvons connaître la déformation qu'elle subit lors de l'impact, nous pouvons tenter de voir si la force qui déforme la balle lors de l'impact suit un modèle connu. Mais comment mesurer la longueur δ sur laquelle s'écrase la balle ?

2) Déformation de la balle

Nous avons eu une idée très simple pour mesurer la déformation de la balle lors de l'impact : il suffit de la faire tomber sur du papier carbone recouvrant une feuille blanche. L'impact de la balle laisse alors une trace très nette et bien définie (figure 9), de forme circulaire de rayon r qui nous permet de remonter à l'écrasement δ de la balle.

Figure 8 : Schéma (coupe de la balle sur un plan vertical) illustrant la zone écrasée de la balle par le support lors de l'impact



En effet, d'un point de vue géométrique (voir figure 8)

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

Voici alors par exemple la marque laissée par une balle remplie d'eau tombant d'une hauteur de 70 cm sur une feuille de papier carbone :

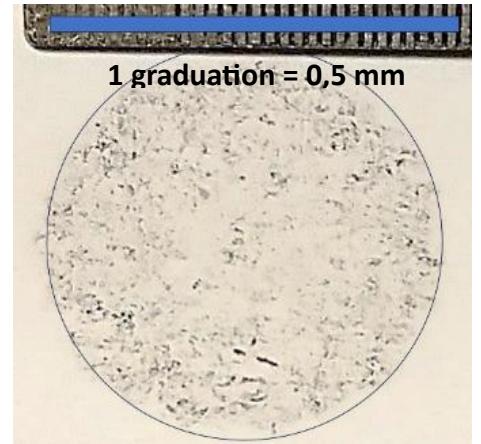


Figure 9 : Trace laissée par l'impact de la balle sur une feuille recouverte d'une feuille de papier carbone

Et voici alors comment évolue l'écrasement de la balle en fonction de la hauteur de lâcher, pour des balles remplies d'air et remplies d'eau : figure 10

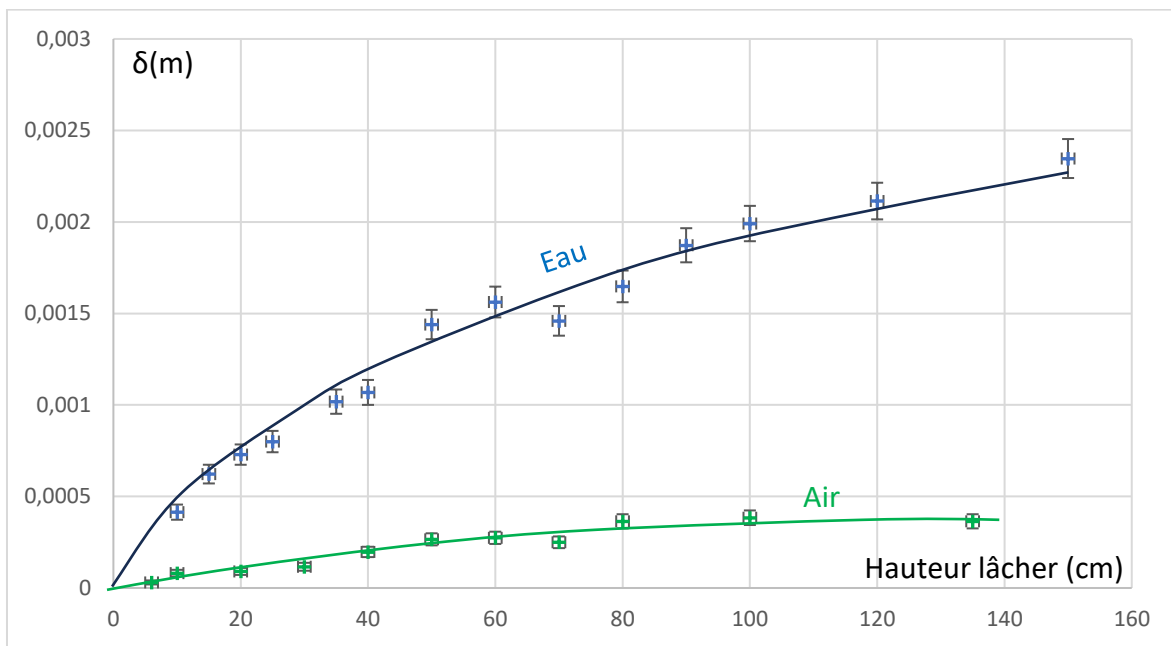


Figure 10 : Evolution de l'écrasement maximal de la balle remplie d'eau (en bleu) et d'air (en vert) en fonction de la hauteur du lâcher.

3) Relation contrainte – écrasement : recherche d'un modèle

Nous pouvons alors faire le lien entre la force exercée par le support lors de l'impact et l'écrasement de la balle, grâce au tableau figure 7 et au graphique figure 8 :

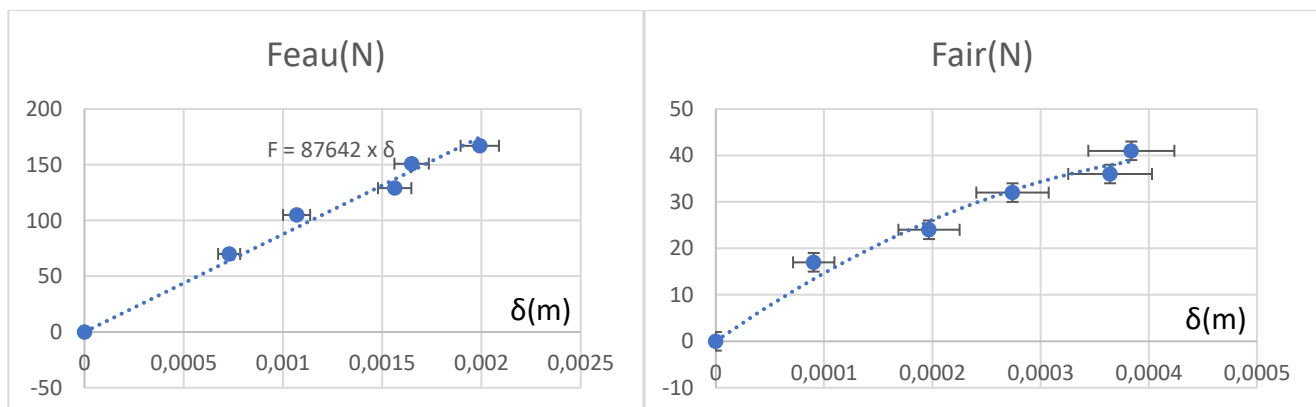


Figure 11 : Relation « contrainte – déformation » pour les balles remplies d'eau et remplies d'air.

A priori, on pourrait conclure que le lien entre la force et l'écrasement de la balle suit la loi de Hooke pour la balle remplie d'eau, alors que ce n'est pas le cas pour la balle remplie d'air.

Mais en réalité, il y a deux problèmes. Un premier problème vient du fait que cette loi concerne des déformations élastiques, or cela semble peu probable du fait que la balle ne rebondit pas à la même hauteur que celle du lâcher. Le deuxième problème vient du fait que si la loi de Hooke est valable, l'énergie élastique stockée au plus fort de l'écrasement de la balle serait

$$E_k = \frac{1}{2}k\delta^2$$

Or c'est cette énergie qui permet à la balle de s'élever, donc de gagner l'énergie potentielle de pesanteur

$$E_p = mgh$$

où h est l'altitude maximale atteinte par la balle.

Ainsi, en prenant les valeurs pour un lâcher de 1 m de hauteur, la balle devrait, selon le modèle de Hooke, rebondir à une hauteur de 0,5 m. Or la balle d'eau avec ces conditions initiales rebondit à 0,7 m.

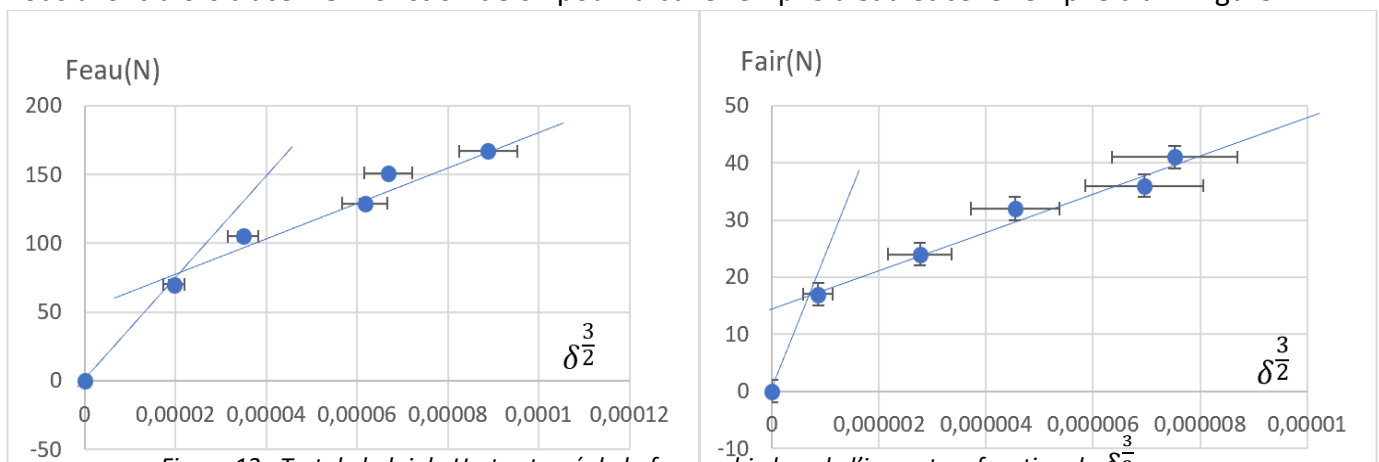
La déformation ne suit donc pas la loi de Hooke.

En faisant des recherches, nous avons vu qu'il existait une autre loi concernant la déformation des solides soumis à une contrainte : la loi de Hertz. Cela dit, la loi de Hertz s'applique normalement pour des solides homogènes. Dans le cas d'une sphère homogène, cette loi prend la forme suivante :

$$F = k\delta^{\frac{3}{2}}$$

Comme nous sommes à la recherche d'un modèle pour relier la force et l'écrasement, nous avons donc testé cette loi avec nos résultats expérimentaux.

Nous avons alors tracé F en fonction de $\delta^{\frac{3}{2}}$ pour la balle remplie d'eau et celle remplie d'air : figure 12



Conclusion, la relation contrainte-déformation ne suit pas la loi de Hertz, ni en ce qui concerne l'allure de la courbe obtenue, ni en termes énergétiques. En effet, un système qui suit la loi de Hertz stocke une énergie élastique sous la forme :

$$E = \frac{2}{5}k\delta^{\frac{5}{2}}$$

En utilisant alors le fait que, dans le cas d'un choc élastique, cette énergie permet l'élévation de la balle à une hauteur h, on peut écrire que

$$E = \frac{2}{5}k\delta^{\frac{5}{2}} = mgh$$

Or, même dans le cas d'un écrasement très faible de la balle, sachant que pour un tel écrasement, l'aspect inélastique du rebond doit être plus modéré.

Avec une estimation pour k égale à $k = 3,5 \cdot 10^6$ (pente de la courbe mesurée graphiquement pour les très faibles déformations) pour la balle remplie d'eau pour un faible écrasement (d'environ 0,7 mm, pour une

force subie par la balle égale à 70 N lors de l'impact), l'utilisation de la loi de Hertz prévoit alors que la balle remplie d'eau rebondisse à une hauteur d'environ 6 cm alors que nous avons mesuré expérimentalement des rebonds à 15 cm de hauteur.

Les modèles de Hooke et de Hertz ne s'appliquent donc pas à une balle remplie d'air ou d'eau, même pour de très faibles déformations. Et il est possible qu'en réalité, il n'y ait pas un modèle simple pour faire le lien contrainte déformation car nous nous sommes aperçus de quelque chose de particulier concernant la déformation de la balle lors de l'impact. C'est ce que nous expliquons dans le paragraphe suivant :

4) Ecrasement statique de la balle.

Nous avons posé des masses connues sur la balle, de 500 g à 9 kg. Ces masses tenaient facilement sur la balle au moyen d'une bague de PVC. La balle elle-même était limitée dans ses mouvements par un cadre en bois dimensionné sur mesure. Voici le dispositif expérimental schématisé : figure 13

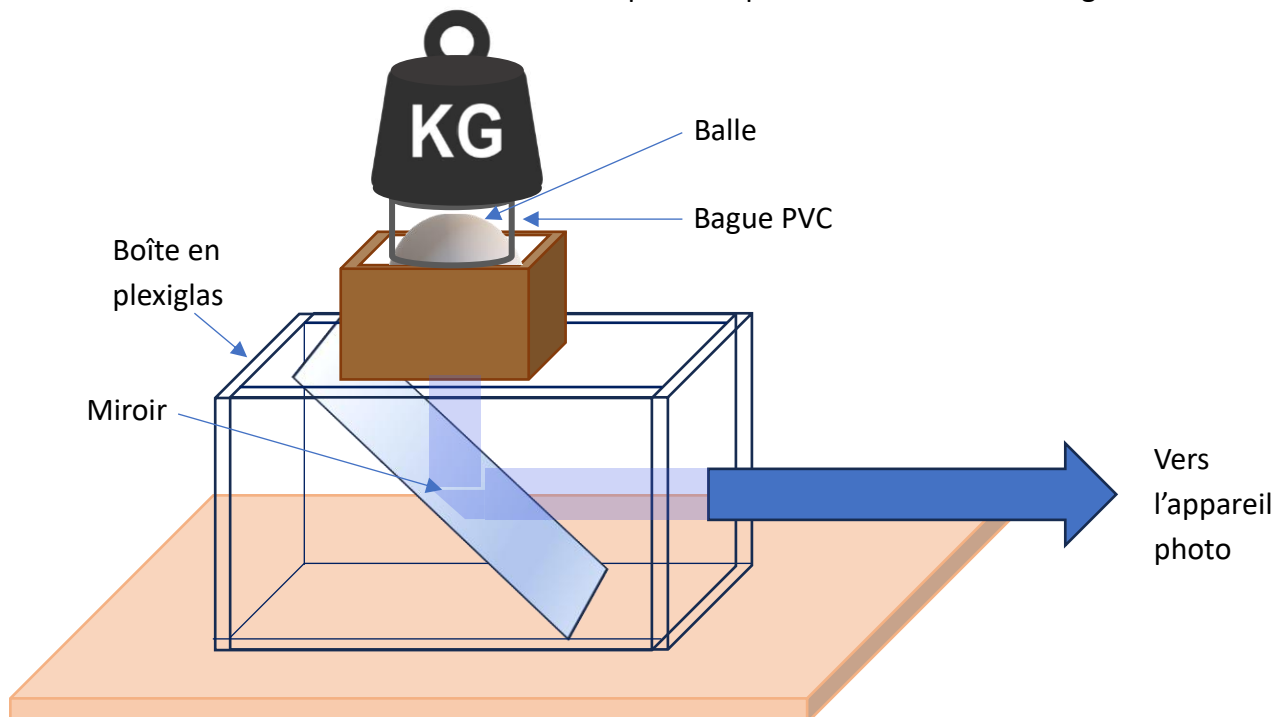


Figure 13 : Mesure de l'écrasement de la balle soumise à une force connue en statique.

Pour voir l'écrasement sous la balle, un miroir incliné à 45° renvoie l'image du dessous vers l'appareil photo. Et pour mesurer la surface écrasée, une graduation précise sur un film transparent est déposée contre le plan sur lequel repose la balle, dans le voisinage du point de contact. Enfin, l'expérience est éclairée de sorte à bien faire ressortir la zone de la balle écrasée.

Voici quelques clichés (figure 14) obtenus pour des certaines masses, avec la balle remplie d'eau et avec la balle remplie d'air : le cercle clair qui apparaît sur les photos n'a pas été ajouté, mais bien capturé par l'appareil photo.

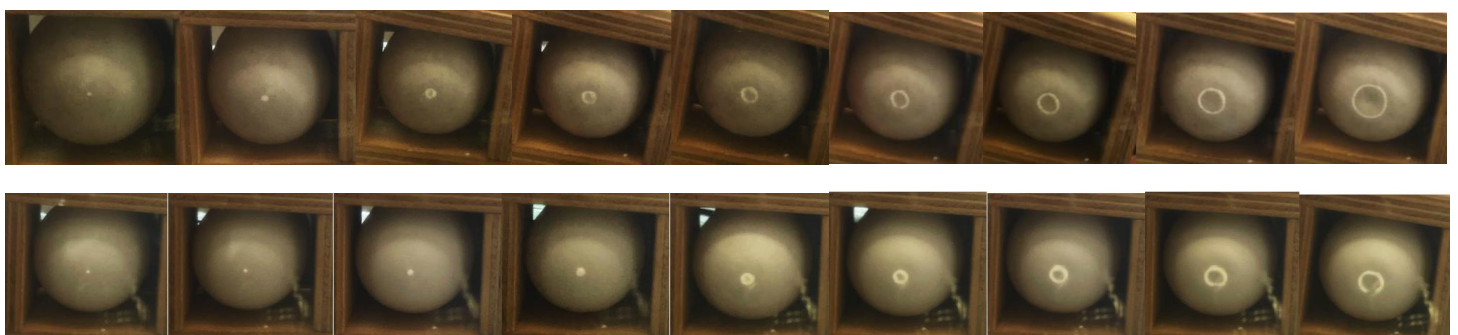


Figure 14 : Ecrasement de la balle remplie d'eau (ligne du dessus) et remplie d'air (ligne du dessous) soumises à des masses de la gauche vers la droite (en kg) : 0,5 – 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9

On remarque très nettement sur ces clichés qu'un creux se forme au centre de la zone écrasée. Or, sur le graphique représentant la force appliquée en fonction de l'écrasement. Alors, même s'il semble délicat de faire une analogie entre la force exercée en posant des masses sur la balle, et la force exercée par le support sur la balle lors de l'impact, nous pensons que ce creux se forme aussi lors de l'impact de la balle sur le support, ce qui doit très probablement impacter une éventuelle relation entre contrainte et déformation..

Remarques :

- Bien que le modèle de Hertz ne soit pas applicable à une sphère non homogène, nous avons tracé la force d'écrasement en fonction de l'écrasement puissance 3/2, pour des balles remplies d'air et d'eau. On obtient alors (figure 15) des évolutions ressemblant beaucoup à celles obtenues dans les figures 12.

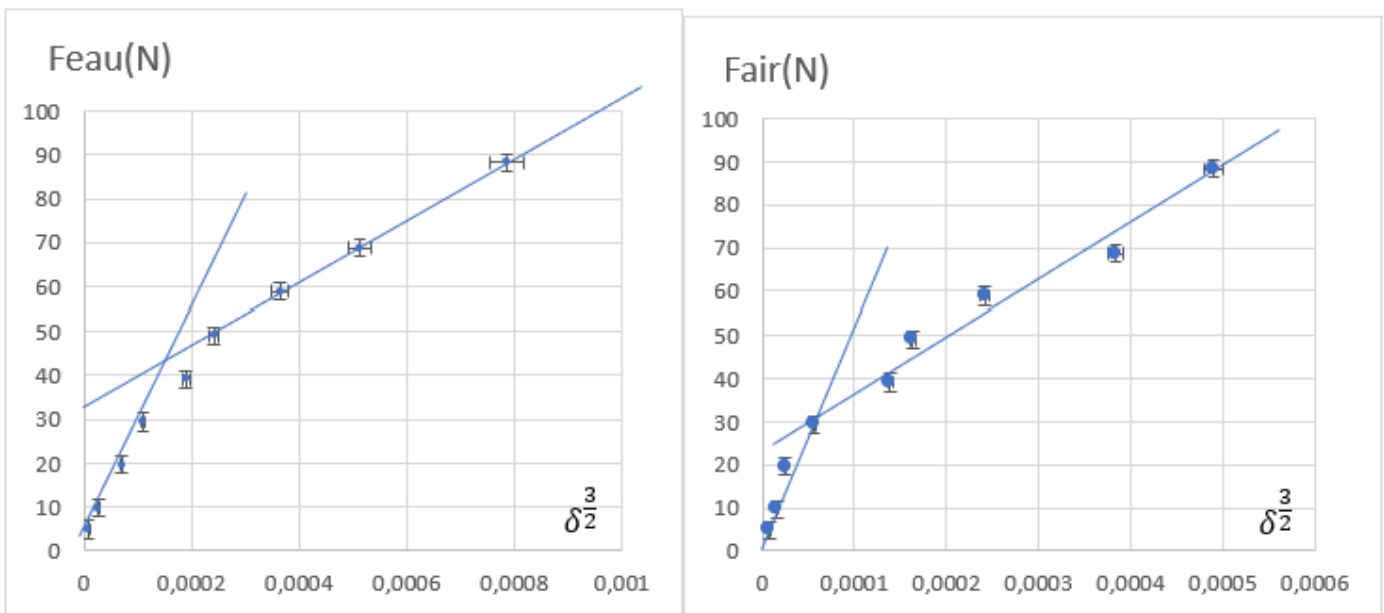


Figure 15 : Test de la loi de Hertz : tracé de la force subie lors de l'impact en fonction de $\delta^{\frac{3}{2}}$ dans l'expérience de l'écrasement de la balle remplie d'air et remplie d'eau

- Une remarque aussi très intéressante qui découle de ces différentes mesures : que ce soit pour l'écrasement de la balle produite par l'impact, ou en posant des masses dessus, on s'aperçoit que pour une force équivalente exercée sur la balle remplie d'eau ou remplie d'air, la déformation produite est plus importante pour la balle remplie d'eau que pour la balle remplie d'air. On le voit par exemple lorsque la balle est soumise à une force de 40 N, sur les graphiques représentant la force en fonction de l'écrasement, pour les balles remplies d'eau et d'air dans les 2 types d'expériences.

Alors quel rôle joue le liquide dans la déformation de la balle ? Et quel est sa part dans la perte énergétique lors du rebond ?

Pour répondre à ces questions, nous avons décidé de remplir la balle de contenus différents et de décrire ce qui se passe lors de l'écrasement de ces balles sur la table lors de l'impact.

III – Comment la balle rebondit-elle une fois remplie de différents liquides ?

1 – Hauteur du rebond

Nous avons mesuré la hauteur des rebonds (figure 16) de balles entièrement remplies d'éthanol, d'huile, de glycérine, de sable et de silicone (qui durcit en séchant), ces matériaux présentant des caractéristiques différentes, en particulier en termes de masse volumique, de viscosité, de compressibilité, etc. Voici, par exemple, les masses des balles ainsi remplies :

Balle	VIDE	EAU	SABLE	SILICONE	HUILE	ETHANOL	GLYCERINE
Masse (g)	2,79	34,0	51,0	31,9	31,8	34,1	44,0

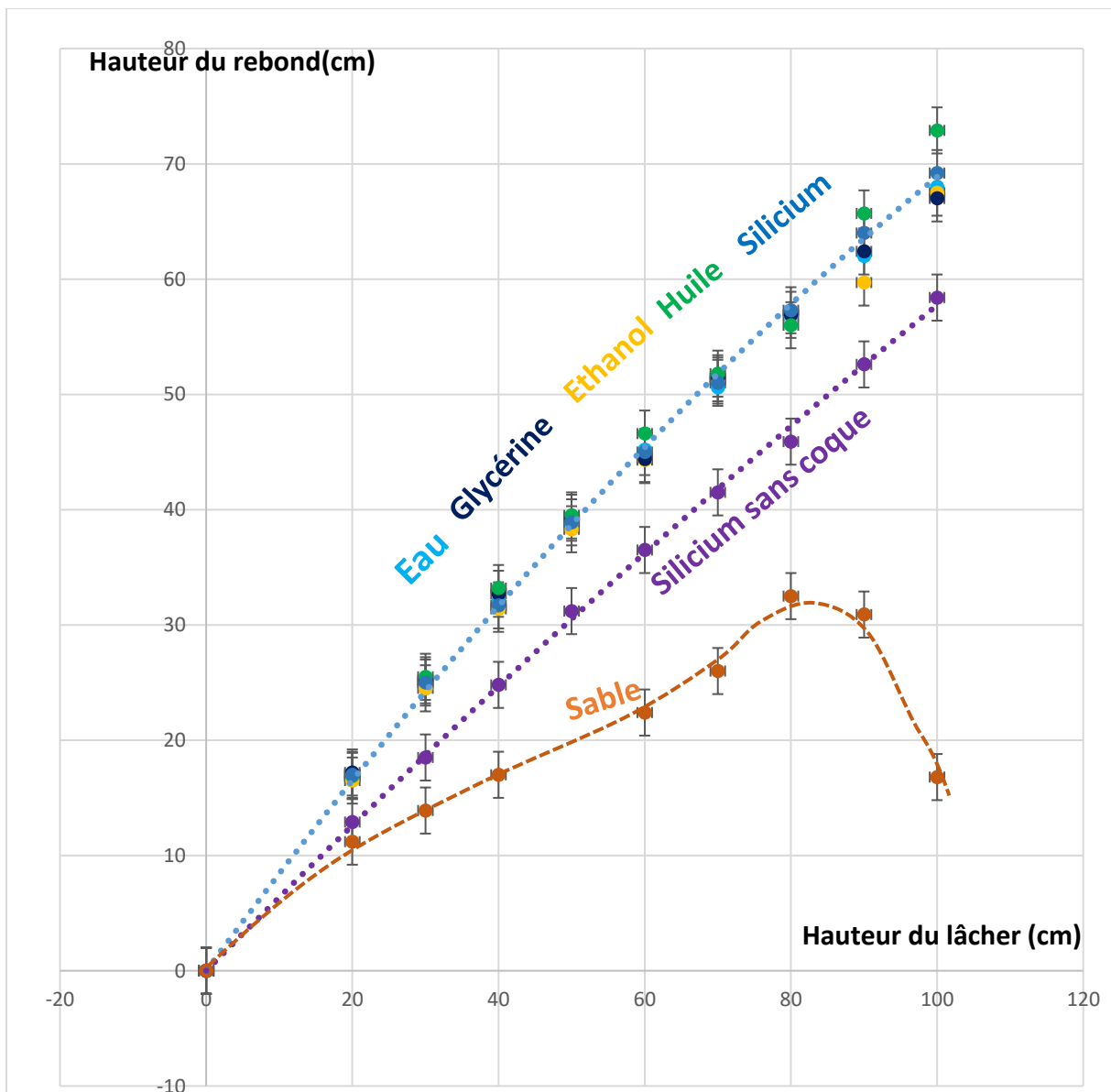


Figure 16 : hauteur du rebonds des balles entièrement remplies de liquides en fonction de la hauteur du lâcher

On remarque que pour toutes les balles contenant un liquide, le rebond se fait à la même hauteur, indépendamment de la masse ou de la viscosité. Il n'en est pas de même pour la balle contenant un matériau solide ou granulaire. Pour autant, cela ne signifie pas que la masse n'est pas un paramètre qui va influencer le rebond. En effet, nous avons mesuré la surface écrasée lors de l'impact en faisant des lâchers sur papier carbone :

2 – Ecrasement de la balle lors de l'impact : figure 17

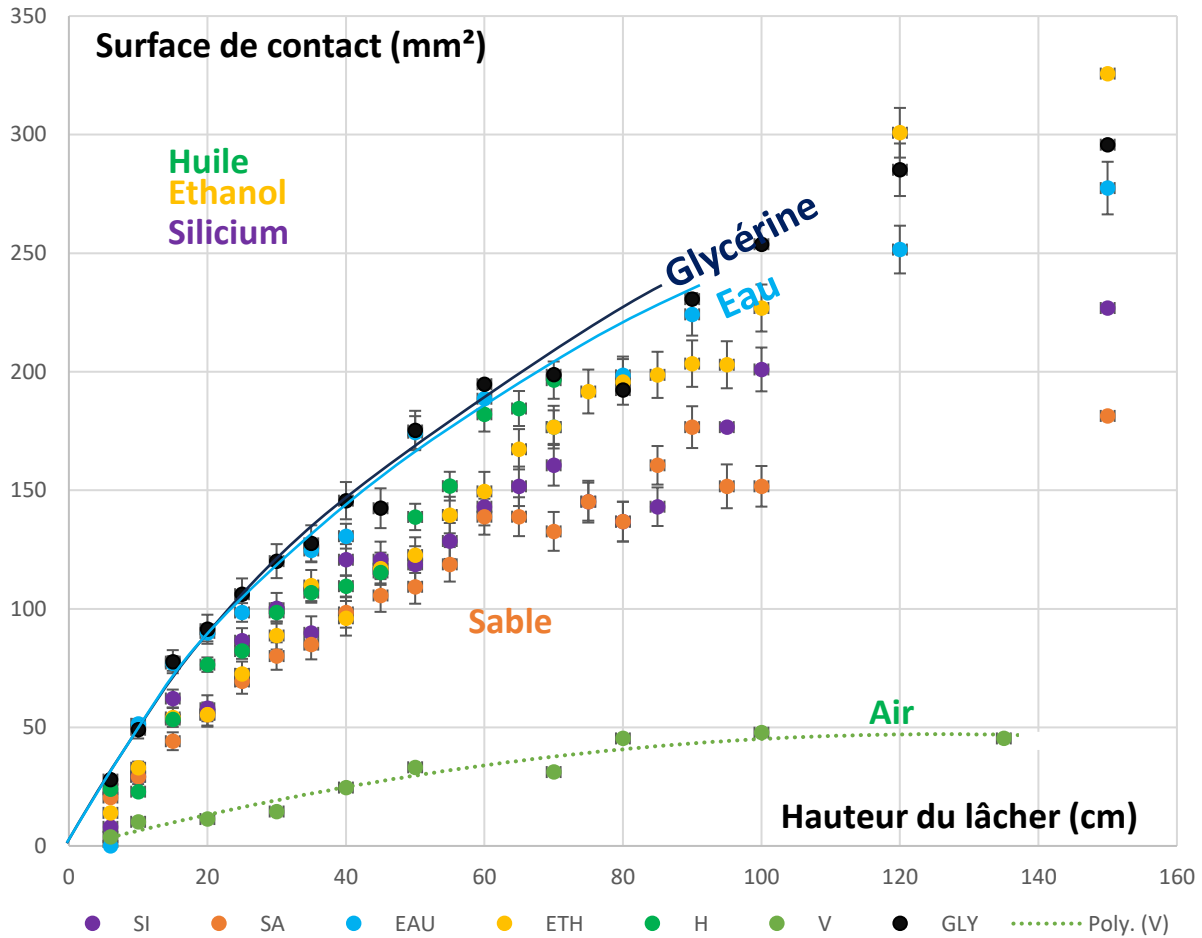


Figure 17 : Surface de l'impact de balles remplies de différents matériaux en fonction de la hauteur du lâcher.

On peut affirmer que la nature du liquide contenu dans la balle a une importance concernant le rebond, étant donné que, malgré une surface écrasée différente entre les balles, et donc une énergie élastique différente engendrée par la déformation de la balle, les balles contenant un liquide rebondissent à la même hauteur. Lorsque l'on compare la surface écrasée de la balle remplie d'air et la balle remplie de liquides, il est évident que la masse de la balle va permettre d'obtenir une surface écrasée plus grande et ainsi une énergie élastique stockée plus grande. Mais la masse du liquide à elle seule ne peut pas suffire pour expliquer la façon dont la balle rebondit. En effet, comparons par exemple l'évolution de la hauteur du rebond des balles remplies d'eau et de glycérine. La masse de la balle remplie de glycérine est 30% plus grande que celle remplie d'eau, or ces deux balles rebondissent à la même hauteur et la surface écrasée lors de l'impact est quasiment identique. D'autres caractéristiques du liquide doivent donc intervenir dans le rebond de la balle.

Nous pensons que lorsque la balle se déforme, le liquide, en contact avec la balle, représente une contrainte pour la coque de la balle, et cette contrainte va dépendre des caractéristiques du liquide.

Il pourrait s'agir de la viscosité, ou pourquoi pas de la compressibilité, même très faible du liquide. Et par le biais de ces caractéristiques, la balle pourrait alors perdre de l'énergie lors du rebond. En partant sur ces hypothèses, nous avons voulu faire la part de choses : quelle énergie est perdue via la viscoélasticité de la coque de la balle, et quelle part est perdue dans le liquide, ou dans l'interaction que peut avoir le liquide sur la balle ? Dans la partie suivante, nous essayons alors de comprendre ce qu'il se passe concernant le liquide lors de l'impact.

IV – Que se passe-t-il dans le liquide lors de l'impact ?

Le liquide subit :

- obligatoirement un déplacement en même temps que la déformation de la coque de la balle.
- éventuellement une compression.

Dans les deux cas, qu'il y ait déplacement ou compression, cela doit s'accompagner de perte d'énergie du fait de la viscosité du liquide. Voyons ce qui peut se passer en termes de compressibilité : quelle variation de volume la balle subit-elle lors de l'impact ?

1 – Le liquide peut-il se comprimer lors de l'impact ?

Si le contenu est de l'air, une deuxième série d'expériences réalisées à l'institut Pprime de l'université de Poitiers nous a permis de nous rendre compte de la déformation globale de la balle lors de l'impact : figure 18. En fait, nous avons grossi l'image sur grand écran et nous avons dessiné un cercle parfait contournant la balle avant l'impact. Nous avons alors déplacé le cercle en question sur la balle au plus fort de son écrasement. Il s'avère alors que la coque de la balle n'est pas déformée ailleurs qu'au niveau de son contact avec l'obstacle frappé.

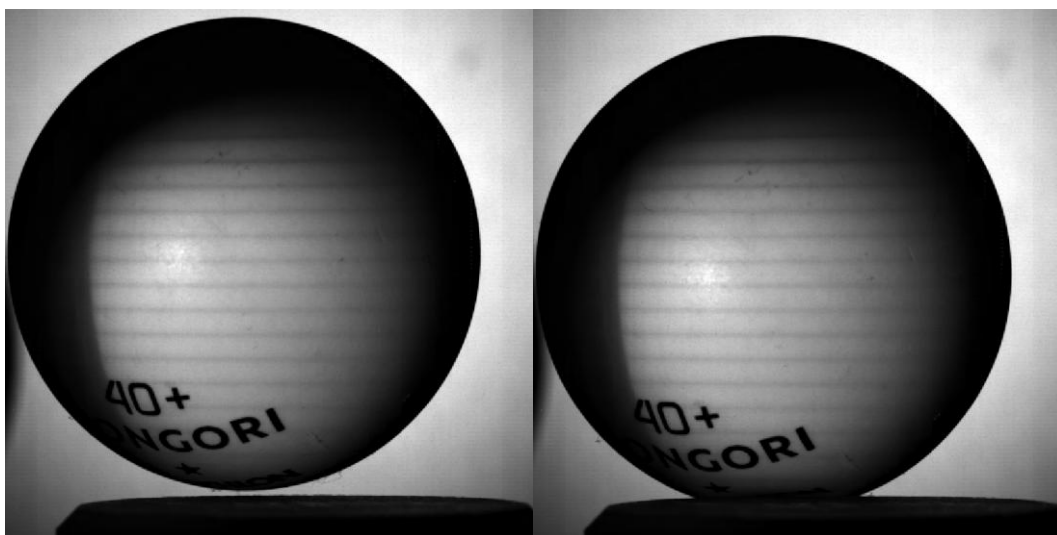


Figure 18 : la balle remplie d'air se déforme-t-elle lors de l'impact ?

Nous avons pu, en travaillant alors à nouveau avec les clichés montrant la zone d'impact, calculer la variation du volume de la balle. Nous avons pour cela recherché la formule permettant de déterminer le volume ΔV de la calotte sphérique dont le volume de la balle a été réduit : en notant R le rayon de la balle, δ la diminution du rayon de la balle lors du contact, et r le rayon de la base de la balle tronquée :

$$\Delta V = \frac{\pi \times h^2 (3R - \delta)}{3} \text{ avec } h = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

Nous trouvons alors, pour un lâcher à 1m de hauteur, pour un rayon r d'environ 4 mm (mesuré lors de nos expériences avec le papier carbone et vérifié avec les clichés précis obtenus à l'institut Pprime) :

$$\Delta V = 1.10^{-2} \text{ cm}^3$$

Ce qui correspond à une variation de volume relatif :

$$\frac{\Delta V}{V} = 3.10^{-4} = 0,03\%$$

Cette très faible déformation relative, et le fait que le contenu de la balle soit de l'air est en adéquation avec la faible énergie perdue par la balle de ping-pong lors de l'impact.

Qu'en est-il de la balle remplie d'eau ? Nous pouvons le voir sur les clichés ci-dessous : figure 19

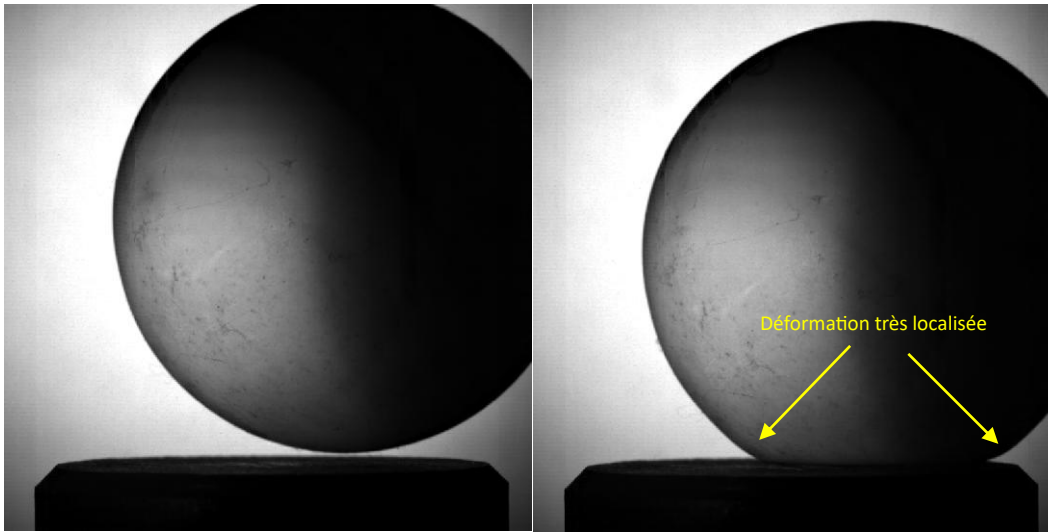


Figure 19 : Déformation de la base de la balle remplie d'eau lors de l'impact

Au plus fort de l'écrasement, la forme de la balle est une fois de plus très similaire à une sphère tronquée. On peut toutefois voir que la balle subit une déformation également dans le voisinage direct de la surface impactée (c'est-à-dire de la surface de la balle en contact avec le support au plus fort de l'écrasement). Cette déformation de la balle semblant très faible, nous avons alors calculé la force qu'il aurait fallu appliquer à la balle pour qu'elle puisse comprimer l'eau sans tenir compte de cette déformation.

En appliquant la même formule que précédemment pour calculer la variation de volume de la balle au moment de l'impact, toujours pour un lâcher d'une hauteur de 1m, on trouve (avec $r = 9mm$)

$$\Delta V = 3.10^{-1} cm^3$$

Ce qui correspond à une variation de volume relatif :

$$\frac{\Delta V}{V} = 8.10^{-3} = 0,8\%$$

En réalité, ce résultat pose question : est-il possible de comprimer un liquide de 0,8% de son volume initial ? Quelle force faudrait-il lui appliquer pour faire cela ? La question nous intéresse, car s'il s'agit d'évaluer l'énergie perdue du fait de la viscosité du liquide, cette énergie ne sera sans doute pas la même s'il s'agit d'une compression ou d'un déplacement du liquide.

Nous avons pu lire, dans l'ouvrage « Physique », que l'eau a un module de compressibilité $K = 2,2.10^9 Pa$. On peut alors calculer la variation de pression de l'eau due à une variation relative de volume grâce à la relation :

$$\Delta P = K \frac{\Delta V}{V} = 2.10^7 Pa$$

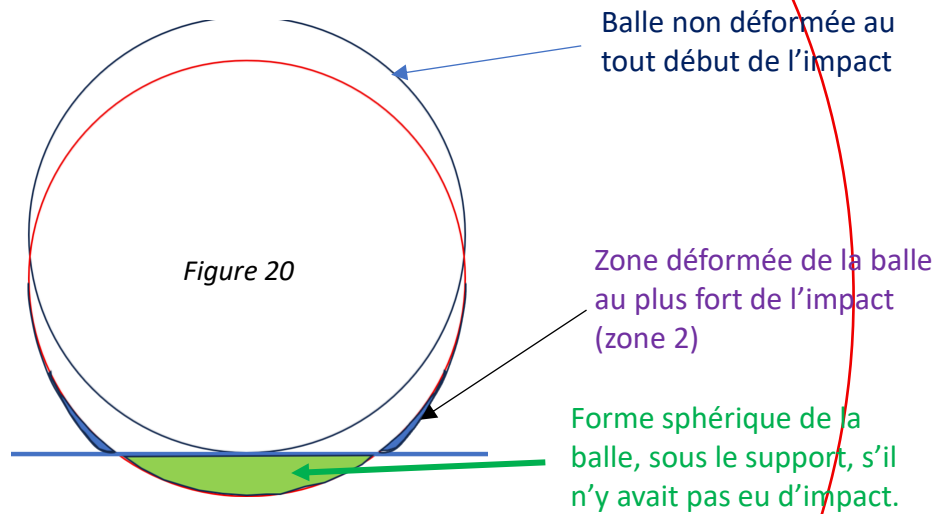
Et dans la mesure où la force de pression s'exerce sur un disque de rayon $r = 9mm$, la force à appliquée est de l'ordre de

$$F = \Delta P \times \pi r^2 = 5.10^3 N \quad !!!$$

Cette force n'est absolument pas atteinte lors de l'impact. Dans le cas de la balle d'eau lâchée à une hauteur de 1m, la force mesurée d'environ 160N pourrait à peine comprimer l'eau avec une variation relative

d'environ 0,007%. Cela signifie que la balle doit se déformer pour que le volume impacté lors du choc se retrouve dans une boursoufflure qui entoure la zone d'impact.

Nous avons voulu confirmer cela en exploitant les clichés pris de la zone d'impact : Grâce à un jeu de comparaison entre l'image de la balle non déformée et celle de la balle déformée (explication schématisée figure 20), on arrive à délimiter, en coupe, la zone déformée par l'impact : figure 21.



Nous pouvons voir ci-dessous ce que cela donne avec les images réelles

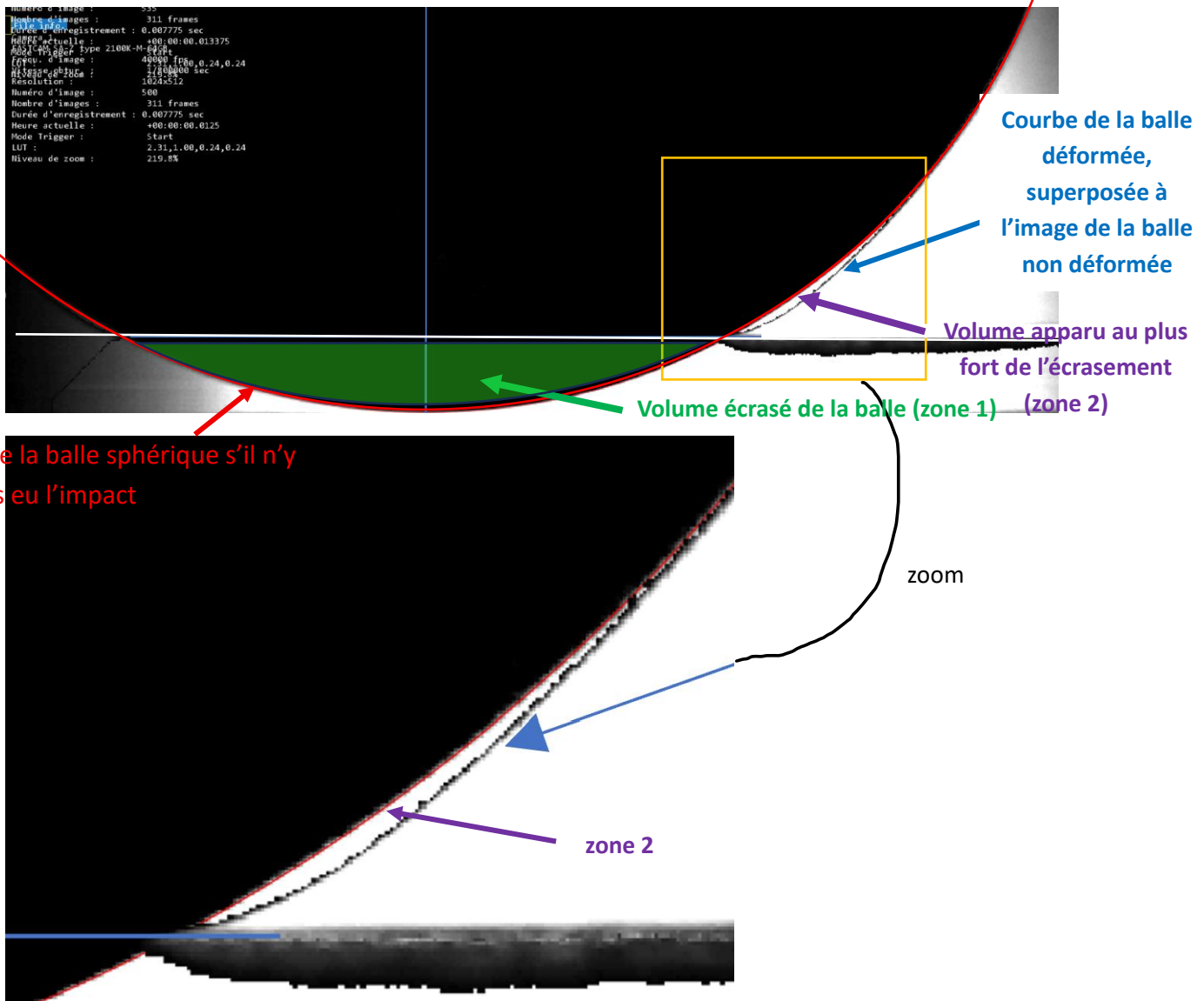


Figure 21 : Déformation de la base de la balle remplie d'eau lors de l'impact

Nous avons alors voulu savoir si cette boursouflure, positionnée autour de la surface impactée, avait un volume similaire au volume de l'écrasement de la balle. Nous avons alors considéré que la zone 2 entoure la surface impactée de façon symétrique autour de la balle. Comme cette zone n'a pas une forme simple, il ne nous a pas été possible de calculer le volume en appliquant une formule connue. Alors, nous avons compté les pixels contenus dans cette zone dans le plan de l'image, et nous avons utilisé la symétrie de la situation pour en déduire le nombre de pixels du volume concerné. Comme nous avons une échelle, nous connaissions la taille réelle représentée par 1 pixel. Voici plus en détail la démarche : figure 22.

Le pixel i est situé à un rayon r_i de l'axe de symétrie de la sphère. Le périmètre du cercle sur lequel se trouve ce pixel est $2\pi r_i$

Le rayon r_i comporte N_{r_i} pixels de dimension « a », donc $r_i = N_{r_i} \times a$

Le nombre de pixels se trouvant sur le cercle de rayon r_i est :

$$N_i = \frac{2\pi r_i}{a} = 2\pi N_{r_i}$$

En nommant H_i le nombre de pixels contenue dans le plan de la feuille sur la colonne i , le nombre de pixels contenus dans l'enveloppe cylindrique de rayon r_i est :

$$N_i \times H_i = 2\pi N_{r_i} \times H_i$$

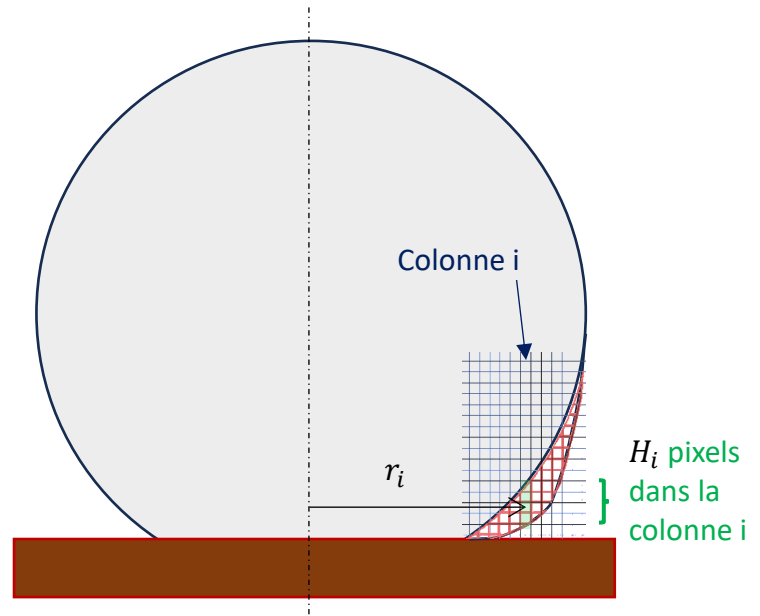


Figure 22 : Mesure du volume de la boursouflure

Ainsi, en ayant les coordonnées (x,y) des points O, A et B en pixels, il nous a été possible de compter N_{r_i} et N_{c_i} , pour chacune des 240 colonnes i de la zone 2.

La somme de toutes ces valeurs nous a donné le volume V_p en pixel^3 de la zone 2. Nous avons trouvé $V_p = 4\,163\,113\,px^3$

Connaissant la longueur du côté d'un pixel (0,0405 mm), un pixel-cube est donc égal à $0,0405^3\text{ mm}^3$. On calcule donc que le volume de la boursouflure est d'environ $276,6\text{ mm}^3$ soit $2,766 \cdot 10^{-1}\text{ cm}^3$.

Le volume de la balle est de $33,5\text{ cm}^3$. On calcule donc que le volume de la boursouflure représente 0,8% du volume de la balle. Or, nous avons calculé précédemment que le volume écrasé de la balle (celui de la zone 2 – figure 21) représente justement 0,8% du volume initial de la balle non déformée !

On peut donc affirmer que le volume "disparu" avec l'écrasement de la balle sur la table se retrouve dans la boursouflure qui se crée. S'il y a une compression lors de l'impact, elle doit donc être négligeable.

Le liquide est donc uniquement déplacé lors de l'impact, pour suivre la déformation de la balle.

Est-ce qu'au cours de ce déplacement, la viscosité du liquide explique la façon dont rebondissent les balles ? En exploitant nos expériences précédentes, au cours desquelles nous avons mesuré les vitesses avant et après l'impact, pour un lâcher de 1m de hauteur, nous avons calculé que la balle perd les énergies cinétiques suivantes en fonction des liquides qu'elle contient :

Liquide	Ethanol	Eau	Huile	Glycérine
$\Delta Ec(mJ)$	11,9	12,4	12,9	6,8

Ce n'est donc pas la viscosité qui explique la perte d'énergie cinétique lors de l'impact, car si cela avait été le cas, elle aurait été plus grande pour la glycérine, qui a une viscosité environ 1400 fois plus grande que celle de l'eau, et environ 80 fois plus grande que celle de l'huile de tournesol.

Cela dit, la notion de pression peut être présente sous la forme d'une « onde de pression » qui se propagerait dans la balle suite à l'impact.

2) Une onde de pression peut-elle se propager dans la balle suite à l'impact ?

Nous avons pensé qu'une onde de pression lors du choc remontait du bas vers le haut de la balle, et que cette onde de choc intervenait dans le rebond de la balle. En effet, durant la chute de la balle, le liquide se trouve en microgravité par rapport à la balle et, par conséquent, la pression dans le liquide est la même dans tout le liquide. Mais au moment de l'impact, la balle subit une accélération « a » liée à la variation brutale de vitesse. Par exemple, pour la balle de glycérine, nos mesures permettent de trouver une accélération de $4,6 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$! De ce fait, en appliquant la loi de l'hydrostatique des fluides, cela engendre une compression dans le liquide égale à, en prenant $h = 4 \text{ cm}$, c'est-à-dire le diamètre de la balle :

$$\Delta P = \rho a h = 1260 \times 4,6 \cdot 10^3 \times 0,04 = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Comme le choc de la balle sur le support concerne tout d'abord le bas de la balle, il doit alors y avoir une onde de pression qui remonte vers le haut. Et comme cette onde de pression éventuelle dépend du facteur d'incompressibilité du liquide, cela pourrait influencer le rebond de la balle. Alors, nous avons cherché les modules K des différents liquides utilisés. A priori, on pourrait penser que le module K de la glycérine rend la balle plus rigide, ce qui pourrait assurer un rebond plus haut, indépendamment de la valeur très élevée de la viscosité de la glycérine :

Liquide	Viscosité Dynamique (η à 20°C)	Module K (Rigidité)
Glycérine	$\approx 1,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	4,5 GPa
Eau	$\approx 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	2,2 GPa
Huile de tournesol	$\approx 0,050 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$\approx 1,3 \text{ GPa}$
Éthanol	$\approx 0,0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	1,1 GPa

Nous avons souhaité mesurer une éventuelle variation de pression lors de l'impact de balles vides ou remplies de différents liquides.

Nous avons pour cela percé les balles avec un foret de 0,5 cm de diamètre pour insérer un tuyau dans la balle, relié à un capteur de pression, lui-même relié à une carte d'acquisition : figure 23

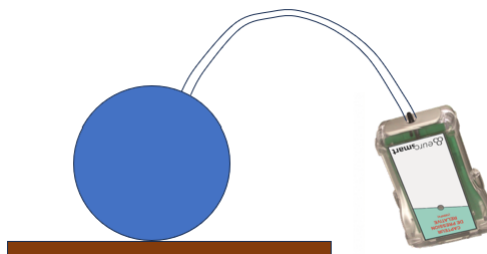


Figure 23 : Mesure de la pression à l'intérieur de la balle lors du choc

Le but étant dans un premier temps de voir si, lors d'un choc de la balle sur un obstacle, on observe une variation de pression, nous avons simplement à ce stade frappé quelques balles, avec des vitesses plus ou moins grandes que nous n'avons pas pris le temps de mesurer pour le moment. Voici alors ce que l'on observe : figures 24 et 25

Avec une balle remplie d'éthanol : figure 24.

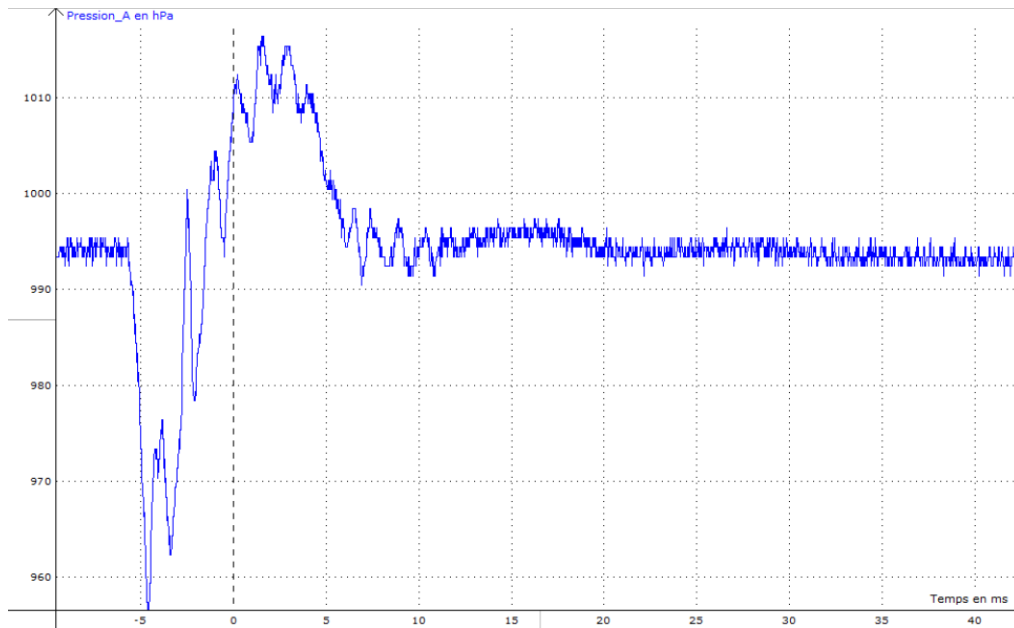


Figure 24 : Evolution de la pression à l'intérieur de la balle remplie d'éthanol

On remarque une vibration rapide de la pression à une fréquence d'environ 780 Hz, ainsi qu'une variation plus lente d'environ 80 Hz. La pression subit quant à elle une variation de l'ordre de 0,3 bar.

Voyons le résultat avec une balle remplie d'eau : figure 25.

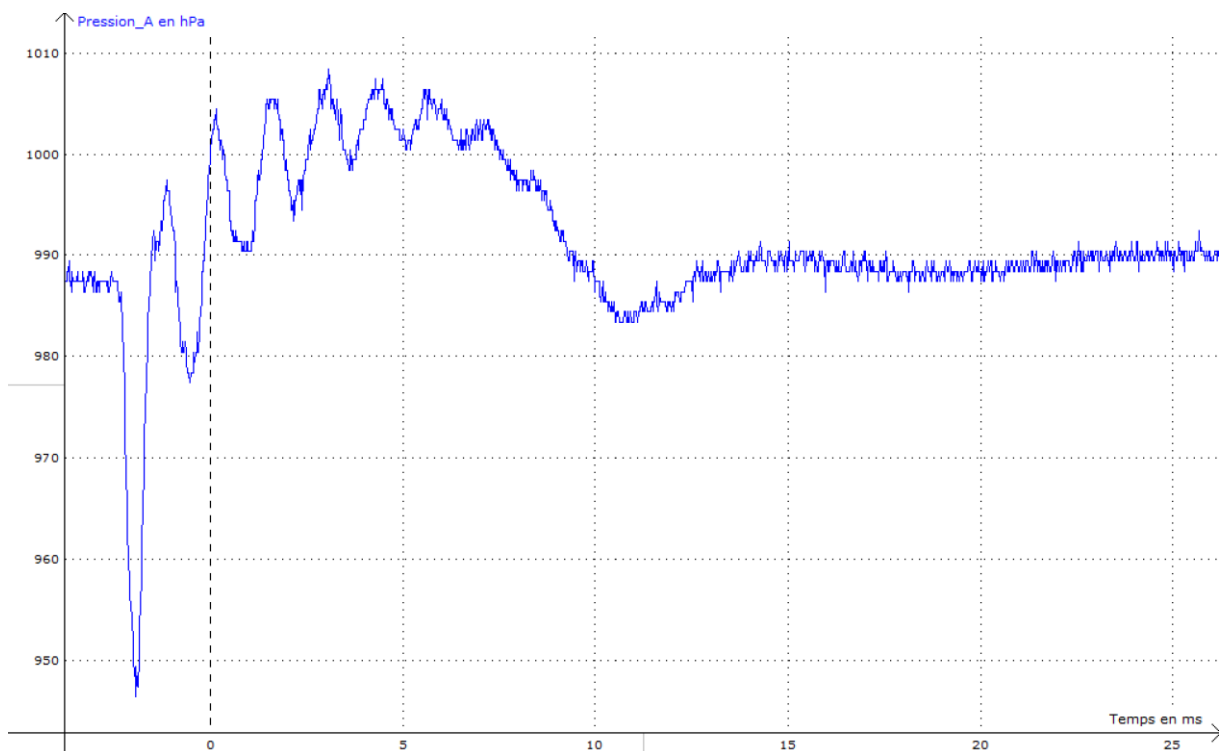


Figure 25 : Evolution de la pression à l'intérieur de la balle remplie d'eau

On note que la pression varie rapidement avec une fréquence d'environ 730 Hz, et également selon une fréquence plus lente de 80 Hz. Les variations de pression au moment du choc sont de l'ordre de 0,5 bar, ce qui n'est pas négligeable.

Mais on peut tout de même d'ores et déjà remarquer que la fréquence rapide correspond à une période du même ordre de grandeur que la durée de contact de la balle lors de l'impact.

Mais surtout, ce qui a attiré notre attention, c'est de voir la variation de la pression. Elle reste certes de faible amplitude par rapport à celle attendue, mais cette variation de la pression témoigne d'une vibration de la coque de la balle qui est sûrement très légère, mais qui se propage sur toute la surface de la balle. Et d'ailleurs, peut-être que la variation périodique de la pression que l'on mesure sur ces graphiques témoigne de cette vibration de la balle. Et il est alors possible que plus le liquide contenu dans la balle est visqueux, plus ces vibrations de la balle seront amorties rapidement. En d'autres termes, une balle remplie d'eau peut vibrer davantage lors de l'impact qu'une balle de glycérine. Et comme la déformation de la coque de la balle s'accompagne de pertes énergétiques dues à la viscoélasticité de la balle, la glycérine permettrait une plus faible perte énergétique en stoppant la vibration de la balle

Donc là encore, cette réflexion est très récente, donc on n'a pas eu le temps de tester cette hypothèse. Mais elle est simple à tester puisqu'à priori, il suffit de faire de nouvelles mesures de pression, cette fois-ci avec une balle remplie de glycérine.

V – Balles partiellement remplies – Vers un marteau sans rebond

1) Mesures

Les rebonds de balles partiellement remplies montrent des résultats complètement différents avec les précédents, et peuvent déboucher vers une application concrète. Il s'est vite avéré toutefois que, pour ces balles, la qualité du lancer avait une influence sur la rotation de la balle lors de sa chute, ce qui avait alors une influence sur la hauteur du rebond. Pour éviter ou du moins, minimiser cette rotation, il fallait pouvoir lâcher la balle sans la tenir manuellement. Pour y parvenir, nous avons collé une petite rondelle en acier sur la balle, ce qui nous a permis de la lâcher depuis un électroaimant dont nous pouvions choisir la hauteur.

Nous avons alors ainsi lâché des balles remplies de 5 mL, 10 mL, 15 mL, 20 mL, 25 mL, 28 mL, et 32 mL d'eau, en répétant l'expérience 1 fois.

Voici alors les résultats obtenus (figure 26), montrant la hauteur du rebond en fonction du volume de remplissage de la balle. S'il n'apparaît qu'un seul point pour un remplissage donné, c'est que les deux mesures pour ce remplissage se superposent.

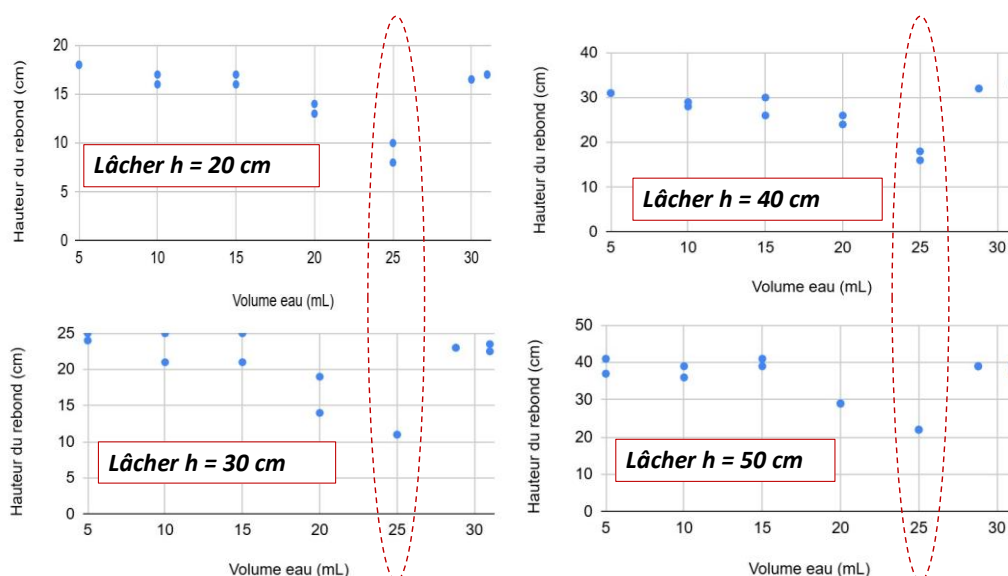


Figure 26 : rebonds de balles partiellement remplies d'eau pour différentes hauteurs de lâcher

Les résultats montrent clairement sans équivoque que, quelle que soit la hauteur du lâcher, le rebond présente une hauteur minimale pour un remplissage à 80% du volume de la balle (remplissage de 25 mL). Alors on se doute que de manière générale, si le rebond est moins grand, c'est dû au fait que lors du choc, une énergie cinétique est donnée à l'eau au détriment de l'énergie cinétique macroscopique de la balle. Mais le fait que cela intervienne toujours pour le même remplissage, alors que les hauteurs de lâchers sont différents, donc pour des forces d'impact différentes, semble montrer que ce n'est pas la masse de l'eau seule qui va intervenir. Nous pensons que pour un remplissage à 25 mL, la forme sphérique de la balle doit permettre plus facilement d'éjecter de l'eau vers le haut lors de l'impact.

Dans un modèle assez simpliste, on pourrait dire que lors de l'impact, une masse m' d'eau s'élève dans la balle avec une vitesse v_{jet} (figure 27). Et pour discuter de la validité de ce modèle, on peut essayer d'évaluer m' et la vitesse d'éjection. Comme on a 2 inconnues, il nous faut 2 équations. La première peut venir de la conservation de l'énergie lors de l'impact :

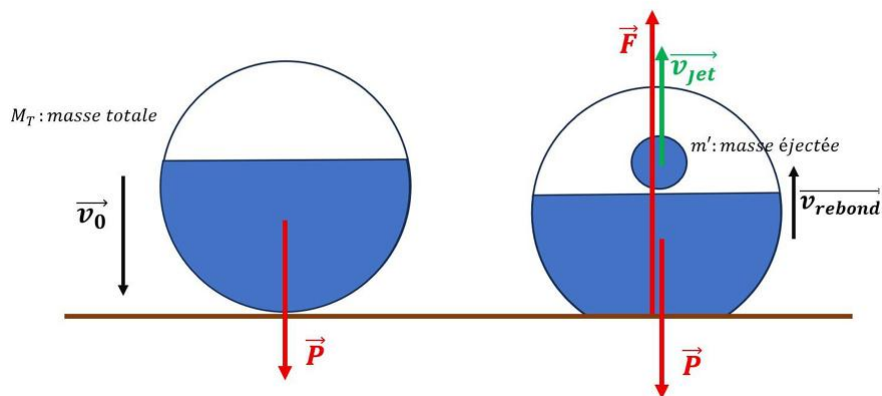


Figure 27 : Modélisation de l'organisation de l'eau lors de l'impact, montrant l'éjection d'une masse m' d'eau vers le haut.

L'objectif de cette étude est de vérifier que lorsque la balle est remplie partiellement avec 25 mL d'eau, la hauteur du rebond est minimale du fait qu'une partie de l'énergie fournie à la balle lors du choc est donnée à une masse m' de l'eau contenue dans la balle. Cette masse m' d'eau est alors éjectée vers le haut à l'intérieur de la balle, à une vitesse v_{jet} . Le reste de l'énergie est communiqué à la balle et à la masse d'eau restante non éjectée lors de l'impact. m' et v_{jet} n'étant pas directement mesurables, nous utilisons deux approches pour les déterminer. En faisant cette étude pour les différentes hauteurs de lâcher, nous pourrions voir si cette façon de modéliser l'eau lors de l'impact est cohérente.

Au moment du choc, le système de masse totale M_t ne se comporte plus comme un bloc solide unique. Nous distinguons :

- La masse éjectée m' (eau projetée vers le haut).
- La masse restante $M_r = M_t - m'$ (coque et reste du fluide).

2) Approche énergétique

Sur les graphiques, nous voyons que la hauteur du rebond est à peu près constante quel que soit le volume de remplissage de la balle, sauf autour de 25 mL. Par exemple, on voit que pour

un lâcher à 40 cm de hauteur, le rebond se fait à environ 30 cm de hauteur. On peut alors en déduire l'énergie cinétique ΔEc "normalement" perdue par le système lors de l'impact. Et pour le remplissage à 25 mL, l'énergie cinétique perdue est $\Delta Ec'$. La différence $\Delta Ec' - \Delta Ec$ correspond donc, dans notre modèle, à l'énergie cinétique gagnée par la masse d'eau éjectée. En notant h_{normal} la hauteur de rebond en dehors de la zone de remplissage de 25 mL et h_{25} la hauteur du rebond mesurée pour le remplissage à 25 mL, l'énergie cinétique gagnée par l'eau éjectée est donc :

$$M_t \cdot g \cdot (h_{normal} - h_{25}) = \frac{1}{2} m' \cdot v_{jet}^2 \quad (1)$$

Cela montre que plus la masse éjectée m' est faible, plus sa vitesse v_{jet} doit être élevée pour expliquer la chute brutale du rebond.

3) Approche dynamique

L'utilisation de la deuxième loi de Newton à l'aide de la quantité de mouvement s'écrit : ($\sum \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$). Pour un axe vertical dirigé vers le haut, en tenant compte de la force de poussée de la table F et le poids $P = M_t g$.

La variation totale $\Delta \vec{p}$ est la somme des variations des deux sous-systèmes :

- $\vec{p}_{avant} = M_t \cdot (-v_0)$ (vers le bas).
- $\vec{p}_{aprs} = (M_t - m')v_{rebond} + m'v_{jet}$ (vers le haut).

En considérant la force de poussée moyenne de la table F et la durée de l'impact Δt , l'équation devient :

$$(F - M_t g) = \frac{((M_t - m')v_{rebond} + m'v_{jet}) - (-M_t v_0)}{\Delta t} \quad (2)$$

Pour une force de poussée F donnée, plus le terme $m' \cdot v_{jet}$ est grand, plus le terme $(M_t - m') \cdot v_{rebond}$ doit être petit. À 25 mL, la poussée du sol est en quelque sorte partiellement transformée en accélération de la masse m' vers le haut.

4) Validation du modèle

En combinant les équations (1) et (2), nous obtenons un système de deux équations à deux inconnues (m' et v_{jet}) :

$$\begin{cases} M_t g (h_{normal} - h_{25}) = \frac{1}{2} m' v_{jet}^2 \\ (F - M_t g) \Delta t - M_t v_0 = (M_t - m') v_{rebond} + m' v_{jet} \end{cases}$$

Toutes les autres variables ($M_t, g, h_{normal}, h_{25}, v_0, v_{rebond}, \Delta t$ et F) sont déterminables expérimentalement (via vidéo que nous pourrions réaliser à l'institut Pprime de l'Université de Poitiers). La résolution de ce système pour chaque hauteur de lâcher permet de mesurer l'évolution de la masse m' et de sa vitesse d'éjection v_{jet} en fonction de la hauteur de l'impact, donc en fonction de l'énergie de la balle juste avant le choc.

5) Application – Un marteau sans rebond

L'application très intéressante que l'on peut faire de cela est un marteau qui permet d'absorber le rebond du marteau après un coup donné. Notre idée est de faire un marteau creux, que l'on remplirait alors de liquide. Alors nous avons fait un premier modèle, en métal (figure 28), mais

visiblement trop lourd par rapport à la masse d'eau que l'on pouvait mettre dedans. La tête du marteau est en effet un tube en acier soudé à un manche en métal. Le tube se finit par un pas de vis de sorte à fermer le réservoir avec un bouchon adapté. Alors nous avons fait un deuxième modèle, plus léger, en plastique, pouvant en plus contenir un volume d'eau plus important, mais toujours sans succès. Nous pensons que cela est dû au fait que l'intérieur du marteau doit avoir une forme hémisphérique à l'intérieur pour que l'eau puisse être éjectée vers le haut lors de l'impact, de façon organisée., et puis peut-être toujours trop lourd par rapport à la masse d'eau.



Figure 28 : 2 prototypes de marteau creux dans le but d'éliminer le rebond (ou la vibration du marteau au niveau du manche lors de l'impact)

Par contre, lors de nos expériences précédentes, nous avons remarqué que le rebond d'une balle remplie de sable se faisait à une hauteur nettement plus faible que celui d'une balle remplie d'eau. Nous avons alors étudié ce qui se passe lorsque l'on remplit cette fois-ci partiellement une balle de sable. Nous pouvons voir les résultats expérimentaux, montrant la hauteur du rebond en fonction de la masse de sable contenue dans la balle (figure 29). Les résultats montrent ainsi que non seulement les rebonds de ces balles sont plus faibles que ceux obtenus avec les balles contenant de l'eau, mais en plus, ces rebonds sont cette fois-ci relativement les mêmes en fonction du taux de remplissage. Cela signifie que non seulement l'absorption de l'énergie sera plus forte, mais en plus qu'elle sera probablement indépendante de la forme interne de la cavité à l'intérieur du marteau.

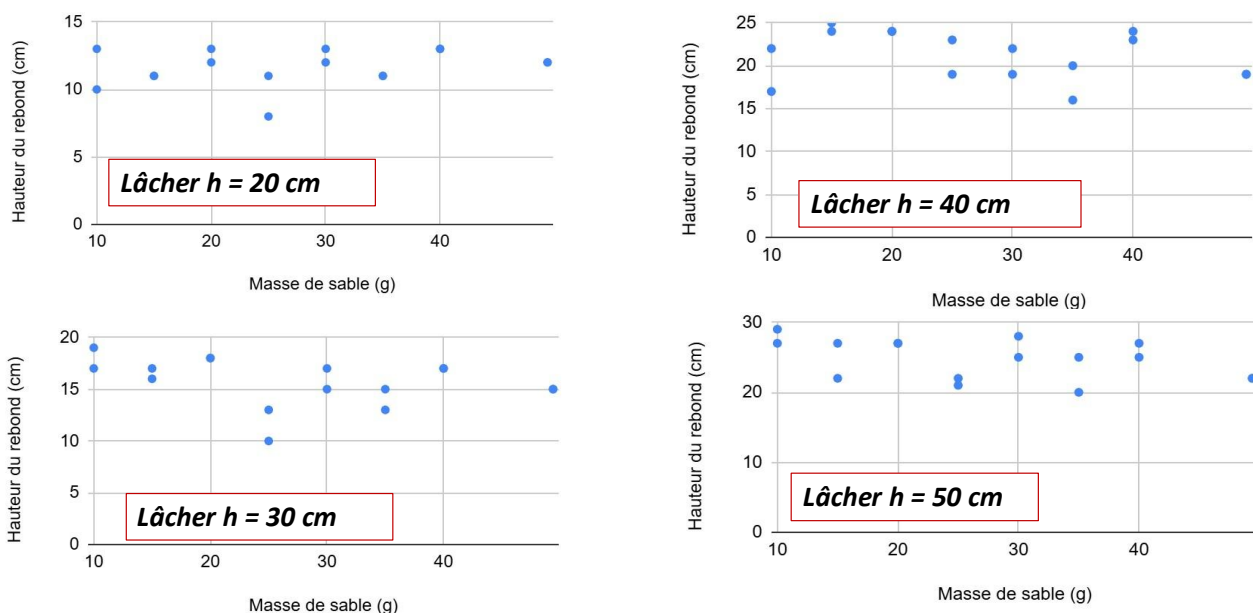


Figure 29 : rebonds de balles partiellement remplies de sable pour différentes hauteurs de lâcher

Nous avons alors rempli le marteau avec différentes masses de sable, sachant que la cavité interne du marteau peut en contenir une masse d'environ 100 g. Nous avons laissé tomber le marteau d'une hauteur fixée et avons alors trouvé que pour une masse de 80g, le marteau ne rebondissait plus du tout. Ainsi, avec les conditions expérimentales choisies, toute l'énergie était donc absorbée par les grains. Nous avons alors modifié la hauteur du lâcher du marteau, et nous avons alors observé que pour des hauteurs supérieures à la précédente, le marteau cette fois-ci rebondit, mais c'est pour ce remplissage que le rebond est le moins haut. Ces expériences étant récentes, nous allons poursuivre nos investigations à ce sujet.

Conclusion :

Le rebond est déjà quelque chose qui semble complexe, car différentes énergies entrent en jeu. Le fait de rajouter des matériaux dans les balles ne rend pas la tâche plus simple, mais la rend encore plus intéressante. L'ensemble de notre démarche nous amène à une conclusion intéressante et crédible quant aux raisons qui expliquent qu'une balle remplie de glycérine va paradoxalement permettre à la balle de moins perdre d'énergie cinétique lors du rebond.

Comme nous l'avons évoqués dans ce mémoire, nous avons émis certaines hypothèses, et nous avons également construit certains modèles pour expliquer nos observations, que nous comptons vérifier expérimentalement.

Outre le fait que les simples rebonds de ces balles nous ont amenés à réfléchir et construire une démarche d'investigation, ceux des balles partiellement remplies conduisent à une application concrète que nous souhaitons davantage maîtriser. En particulier, nous souhaitons choisir la forme interne de la cavité du marteau, ou encore être capable de prévoir quelle masse d'eau ou de sable serait nécessaire en fonction de la façon dont le marteau sera utilisé. Nous espérons vous présenter cela de vive voix.