

Tu tires ou tu pointes ?

Une histoire qui fait des vagues



**Eymerick Jarousse, Evan Geay, Macéo Mie, Cyprien Chabasse,
Clément Durupt, Clément Fauconnet**

Accompagnés par Jean-Brice Meyer et Tristan Clément

Résumé

Marseille... capitale mondiale de la pétanque. Et si nous aussi, du côté du LP2I, nous jouions à la pétanque ? Mais au lieu de taper une boule simplement contre une autre, mettons une feuille d'aluminium entre les deux ! Ce qui se passe alors est surprenant : on observe une série de cercles concentriques autour d'un point d'impact, très nets. Alors, nous nous sommes posés bon nombre de questions et nous avons essayé d'y répondre en menant une véritable démarche d'investigation : Comment se forment ces cercles concentriques ? Leurs nombres et rayons ont-ils un lien avec la façon de les lancer ? Les boules de pétanque sont-elles les plus adaptées pour observer le phénomène ? Le papier d'aluminium est-il le seul où l'on peut observer ces cercles ? Enfin bref, beaucoup de questions (et sans doute d'autres en cours de route) et aussi quelques réponses... C'est toute cette démarche et ce questionnement qui sont présentés dans ce mémoire.

Sommaire

Introduction	Page 3
I – Que voit-on si on fait varier la vitesse des billes lors de l'impact ?	Page 3
1) Choix des matériaux	Page 3
2) Dispositif expérimental et premières observations en fonction de la vitesse :	Page 5
a – Dispositif expérimental	Page 5
b – Influence de la vitesse sur la figure obtenue	Page 6
II – Analyse énergétique	Page 9
1) Quelle est l'énergie communiquée au papier aluminium ?	Page 9
2) Que devient cette énergie ?	Page 9
III – Etude mécanique et ondulatoire	Page 12
1) Présentation de l'hypothèse	Page 12
2) Calcul de la force exercée par une bille sur le papier d'aluminium	Page 13
3) Estimation de la déformation engendrée par le choc	Page 16
4) Conclusion de l'étude mécanique	Page 17
5) Un choc pas si élastique que ça	Page 19
Conclusion	Page 20

Bibliographie – Webographie

- [1] La vidéo du phénomène : <https://www.youtube.com/watch?v=I4cVADCfHQY>
- [2] Dureté des boules de pétanque <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/jeux-de-boules-creuses-ou-pleines-2613.php>
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature_de_fusion_d%27un_polym%C3%A8re

Introduction

Tout est presque dit dans le titre. Mais au moment où nous avons découvert le phénomène, rien n'a été fait pour trouver une explication.

Lorsqu'on tape deux boules de pétanque sur une feuille de papier d'aluminium, des vagues se dessinent autour du point d'impact [1]. C'est un peu comme si on jetait un caillou dans l'eau, mais ici, les vagues restent figées dans le temps. Cela ressemble à une onde, mais une onde qui ne se propage pas. Cette figure veut nous raconter quelque chose, sans pour autant nous la révéler.

Alors comment se forment ces vagues ? Est-ce pour des raisons thermiques ? mécaniques ? Observe-t-on quelque chose de similaire avec d'autres matériaux que de l'aluminium ? C'est ce que nous allons tenter de découvrir en menant une démarche d'investigation.

I – Que voit-on si on fait varier la vitesse des billes lors de l'impact ?

1) Choix des matériaux

Nous avons pu découvrir ce phénomène dans une vidéo sur internet [1]. Bien entendu, aucune explication n'était donnée (sinon, cela aurait enlevé tout l'intérêt de faire ce projet).

Nous avons alors décidé de reproduire le phénomène à l'aide de boules de pétanque, que nous avons simplement cognées l'une contre l'autre en intercalant du papier d'aluminium entre les 2.

Le résultat, le voici (figure 1) : quelques cercles concentriques.



Figure 1 : Cercles obtenus après le choc des boules de pétanque

On remarque cela dit que la zone de contact entre les deux boules est loin d'être ponctuelle. Il s'agit de la zone centrale, dans laquelle aucune vague n'apparaît. Cela nous a semblé étrange puisque les boules de pétanque étant sphériques, on s'attendait à avoir une surface de contact quasi ponctuelle. Mais en réalité, en regardant la boule de pétanque après l'impact, il s'avère que celle-ci s'est aplatie lors du choc.

Dès lors, nous nous sommes dit qu'il serait intéressant que le contact soit plus ponctuel pour voir si on obtenait plus de vagues. Pour cela, nous avons recherché des boules de plus petit diamètre que les boules de pétanque, et avec des duretés plus grandes.

Nos boules de pétanque avaient un diamètre de 7,3 cm, et des recherches nous ont appris que la dureté des boules de pétanque était de l'ordre de 35 HRC [2], ce qui correspond à 110 kg/mm².

En cherchant sur internet, nous avons vu que les roulements à bille pouvaient avoir des duretés nettement plus grandes, entre 60 et 64 HRC, soit pratiquement deux fois plus grandes que celle des

boules de pétanque. Nous en avons alors acheté 4, qui sont des roulements à billes de 4 cm de diamètre, utilisés généralement pour des camions.

Il s'agit de billes en acier au chrome 52100 dont voici les caractéristiques :

Module d'élasticité	190-210 GPa
Coefficient de Poisson	0,27-0,30
Dureté Rockwell C	62
Densité	7,81
Coefficient de dilatation thermique à 23-280 °C	11,9 $\mu\text{m} / \text{m}^{\circ}\text{C}$
Conductivité thermique (acier typique)	46,6 W / mK

Une fois reçues, nous les avons cognées, et effectivement, suite à l'impact, aucune trace, même pas une rayure sur la surface de la boule.

Et lorsque nous les cognons en intercalant une feuille de papier aluminium entre les deux, voici ce que nous obtenons : figure 2

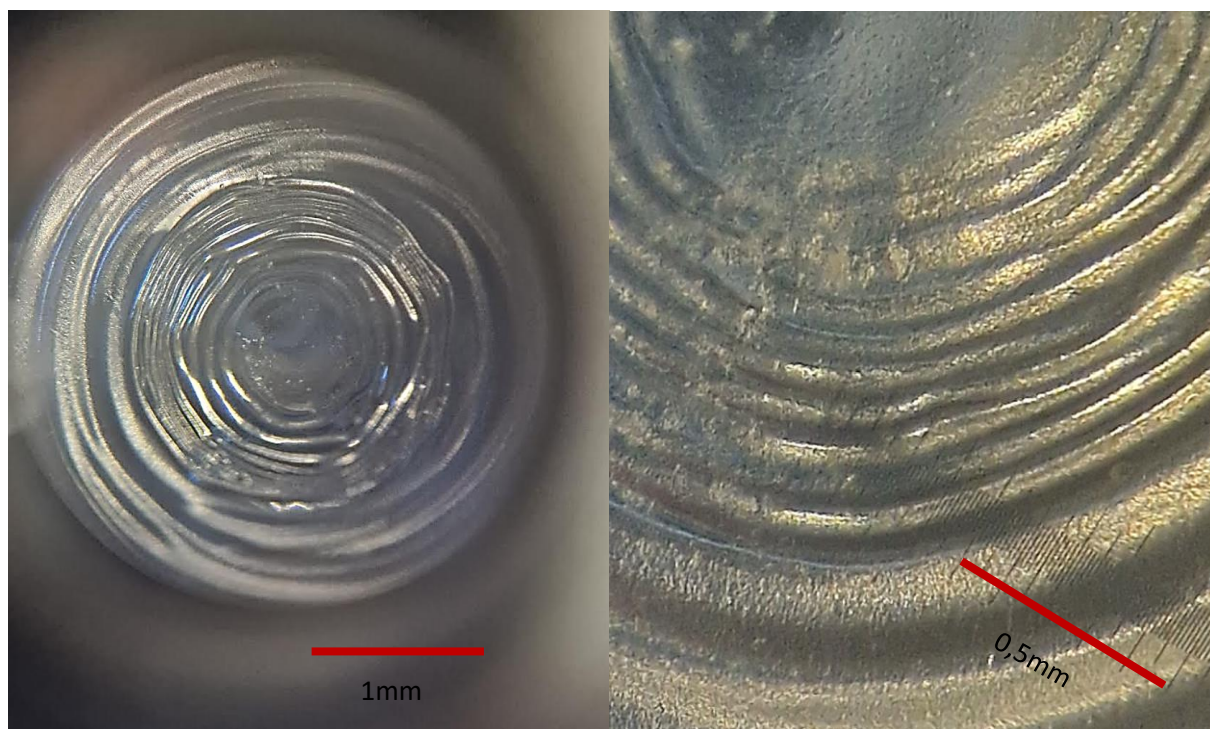


Figure 2 : Observations au microscope des cercles obtenus après le choc des roulements à billes sur une feuille d'aluminium

Alors plusieurs questions se posent : en particulier sur les vagues obtenues. Leur nombre ainsi que les rayons ou leurs amplitudes varient-ils en fonction de la vitesse à laquelle les boules se cognent ?

Des premières expériences très qualitatives nous ont alors montré que plus l'on cogne les boules avec une grande vitesse, et plus il y a de vagues concentriques. Alors, pour étudier cela quantitativement, il a fallu construire un dispositif expérimental adapté, permettant de contrôler la vitesse au moment de l'impact.

2) Dispositif expérimental et premières observations en fonction de la vitesse :

a – Dispositif expérimental

1 - Premier dispositif :

Notre premier dispositif était le suivant : il était composé de 2 rampes permettant de guider les billes jusqu'à leur contact. figures 3 et 4.

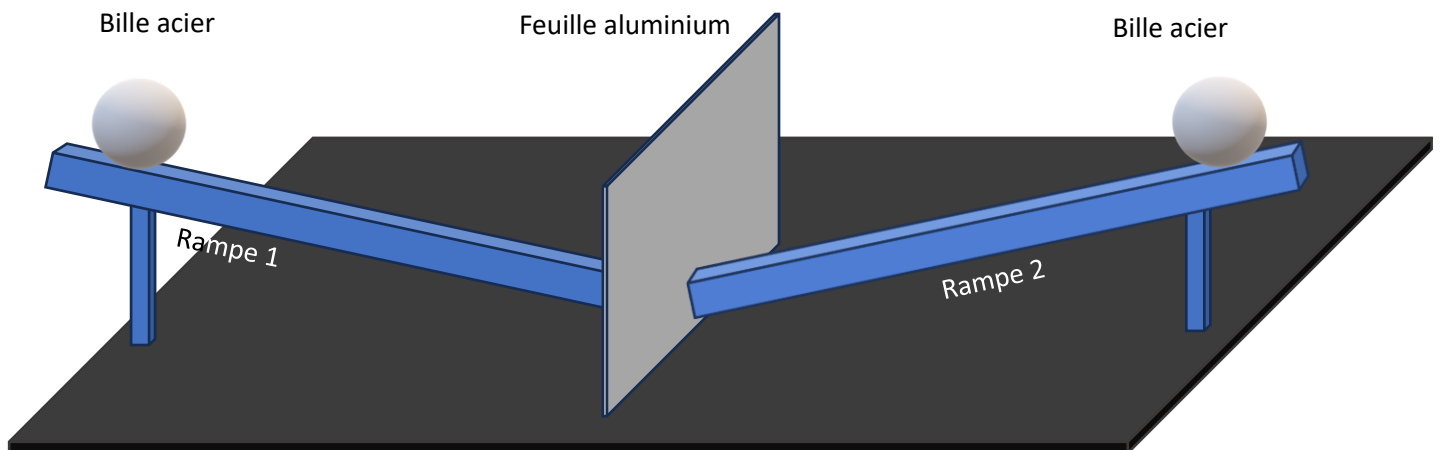


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental



Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental

Ce dispositif présentait néanmoins 2 problèmes :

Les billes étaient lâchées à la main et il fallait alors de la réussite pour que le choc se passe exactement à l'endroit voulu, c'est-à-dire à l'endroit où était disposée la feuille d'aluminium.

D'autre part, le choc entre les billes n'était pas frontal. Une fois que les billes se cognaient, elles avaient du mal à repartir en arrière. Or nous comptons faire des études énergétiques dans le but de connaître la quantité d'énergie que les billes perdaient lors du choc. Nous avons alors choisi de confectionner un autre dispositif expérimental :

2 – Deuxième dispositif :

Dans ce dispositif, figure 5, les boules sont maintenues par 2 électroaimants contrôlés par le même circuit électrique, ce qui permet de lâcher les billes en même temps. Nous pouvons faire varier la hauteur des électroaimants de façon à faire varier la vitesse des billes au moment de l'impact.

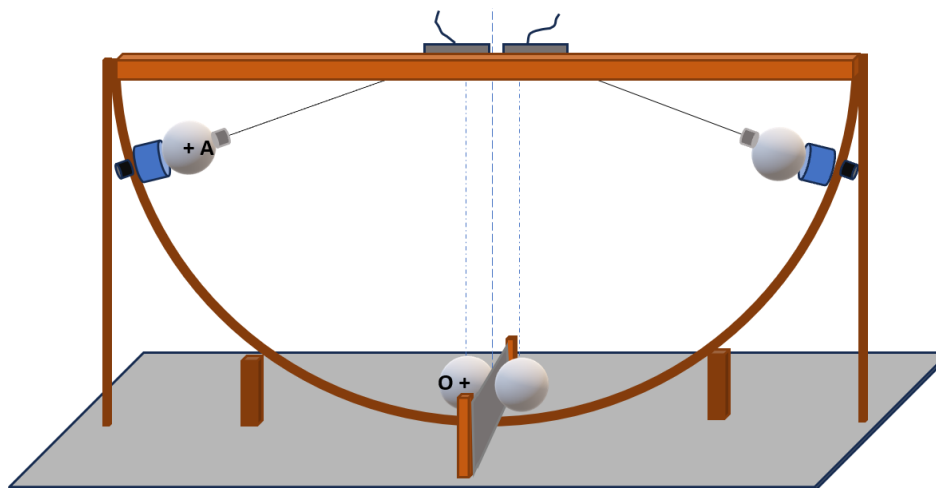


Figure 5 : Schéma du deuxième dispositif expérimental

Comme la planche arrondie est un arc de cercle, nous avons dû faire en sorte que la longueur des fils maintenant les billes soit ajustable. Les deux éléments en gris en haut du dispositif permettent également d'ajuster le point de fixation des deux fils par rapport à la direction horizontale, de sorte que lors du choc, les fils soient dans des directions verticales (comme le montrent les lignes en pointillés sur le schéma). Enfin, le papier d'aluminium est maintenu grâce à deux morceaux de bois dans lesquels nous avons fait une incision pour y insérer la feuille.

Des premiers lâchers que nous avons filmés ont pu montrer que le choc sur le papier d'aluminium se faisait le plus souvent à l'endroit prévu, mais pas toujours. Le problème vient en particulier de l'attache du fil au niveau des billes. Comme il n'a pas été possible de percer la bille (et oui.. c'est l'inconvénient d'avoir choisi de travailler avec une grande dureté), nous avons collé un élément métallique sur la bille, doté d'un pas de vis dans lequel nous avons vissé un crochet. C'est à ce crochet qu'est attaché le fil.

Nous avons alors remarqué que parfois (figure 6), la bille arrivait de telle sorte que l'axe du crochet n'était pas selon la direction du fil, ce qui engendrait alors un retard d'une bille par rapport à l'autre. Nous avons alors dû, lors de nos mesures tenir compte de cela pour ne prendre en compte que les chocs qui se faisaient dans le plan médian.

Nous réfléchissons en parallèle à modifier l'attache des fils pour ne plus être gênés par cela.

Maintenant que nous avons un dispositif expérimental qui nous paraît satisfaisant (même s'il est perfectible), nous pouvons l'exploiter.

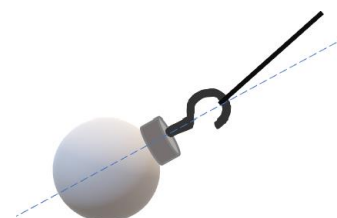


Figure 6 : Illustration de l'attache des billes au dispositif

b) Influence de la vitesse sur la figure obtenue :

Voyons en particulier ce que nous observons sur le papier d'aluminium lorsqu'on modifie la vitesse des billes lors de l'impact. La vitesse des billes lors de l'impact est connue en appliquant simplement la conservation de l'énergie mécanique, en supposant que les frottements fluides sont négligeables :

$$\begin{aligned} E_m(O) = E_m(A) &\Leftrightarrow (E_c(O) + E_p(O)) = (E_c(A) + E_p(A)) \\ &\Leftrightarrow \left(\frac{1}{2}mv_O^2 + 0\right) = (0 + mgh_A) \Leftrightarrow v_O = \sqrt{2gh_A} \end{aligned}$$

Voici alors ce que nous obtenons pour différentes vitesses des billes au moment du choc : figure 7

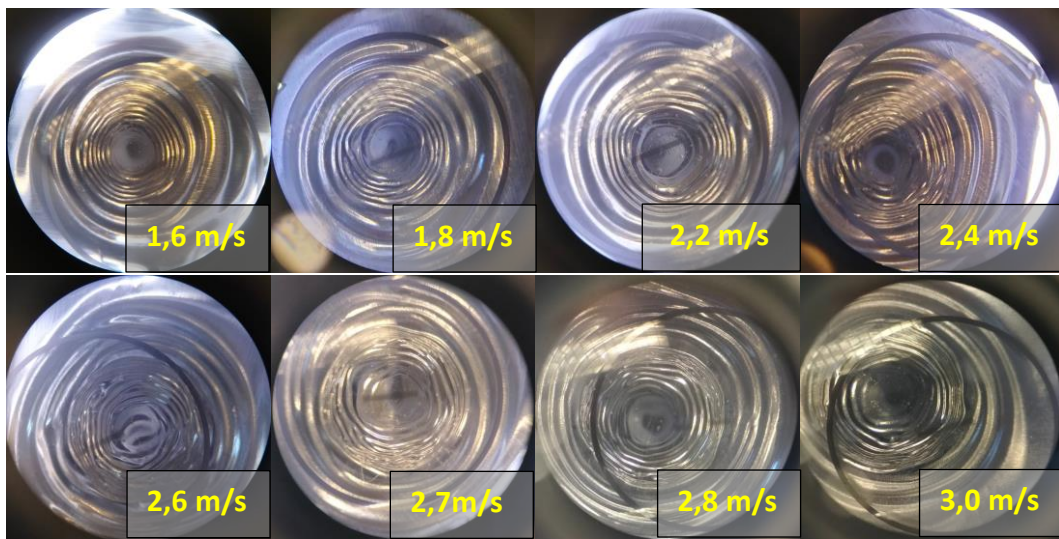


Figure 7 : Observation au microscope des cercles obtenus sur le papier d'aluminium pour différentes vitesses des billes au moment de

Nombre de cercles obtenus pour différentes vitesses d'impact : figure 8

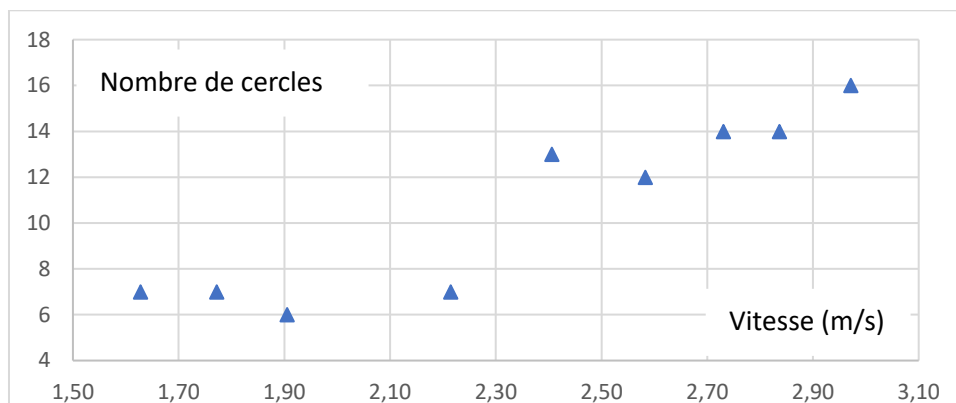


Figure 8 : Graphique représentant le nombre de cercles observés en fonction de la vitesse des billes au moment de l'impact

Distance à laquelle se trouve le cercle le plus éloigné du point d'impact en fonction de la vitesse : figure 9

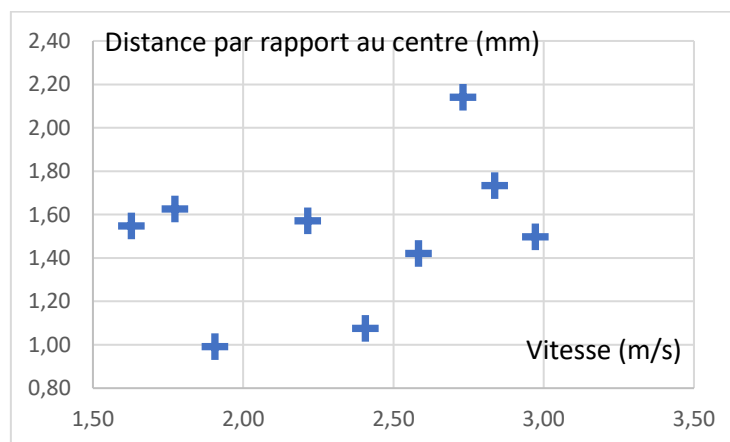


Figure 9 : Graphique représentant la distance à laquelle se trouve le cercle le plus éloigné du point d'impact par rapport au centre du point d'impact en fonction de la vitesse des billes au moment de l'impact

de

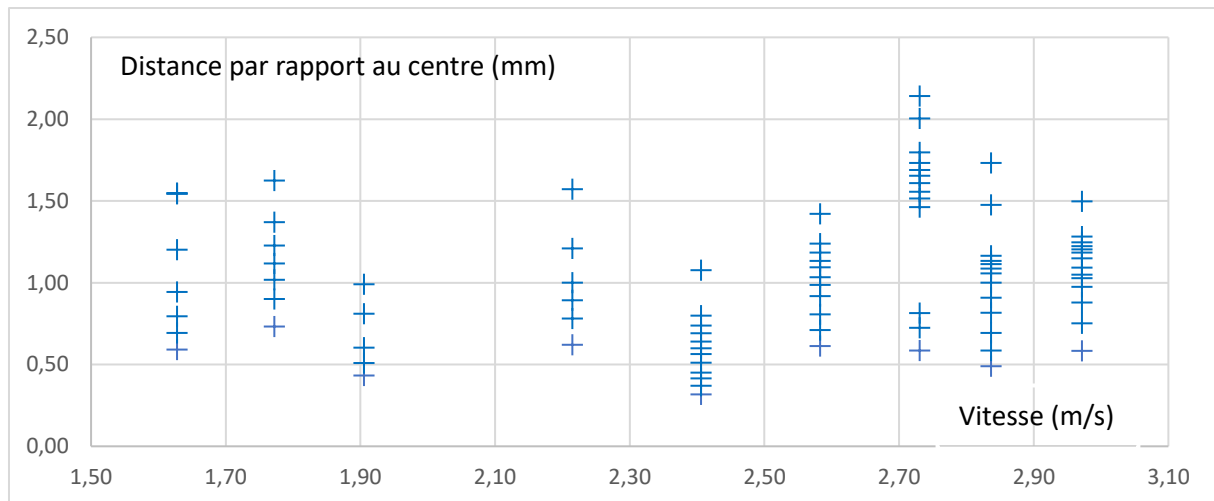


Figure 10 : Graphique représentant le rayon des cercles sur la feuille d'aluminium en fonction de la vitesse des billes lors de l'impact

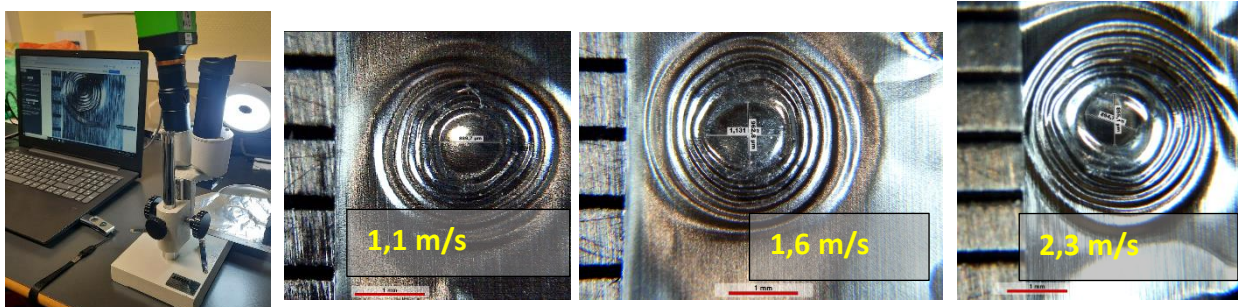
Ce graphique montre les rayons de tous les cercles en fonction de la vitesse des billes lors de l'impact. On retrouve donc le nombre de cercles sur une même colonne pour une vitesse donnée, ainsi que le rayon du cercle le plus éloigné du centre de l'impact. Il est alors intéressant de remarquer que souvent les cercles situés au milieu des figures obtenues sont plus resserrés que ceux situés loin de l'impact. C'est d'autant plus vrai lorsque la vitesse des billes est grande.

Au vu de ces constatations, nous nous posons plusieurs questions :

- Nous avons alors voulu savoir, dans un premier temps, s'il y avait un rapport entre l'énergie communiquée au papier d'aluminium et la figure obtenue. Pour cela, il nous fallait mesurer l'énergie transmise au papier d'aluminium lors de l'impact.
- Nous aimerions calculer la force de pression subie par l'aluminium lors du choc pour évaluer la déformation engendrée.

Mais pour tout cela, il nous fallait refaire des mesures plus précises et plus complètes, comme par exemple pour la mesure de la durée de l'impact.

Les mesures demandaient une telle précision qu'à l'heure où nous écrivons le mémoire, il ne nous a été possible d'en réaliser que pour 4 hauteurs différentes concernant les lâchers de billes (figure 11). Les observations du papier d'aluminium ont été réalisées également avec un matériel plus précis (voir figure 12), ce qui ne sera pas sans conséquences, comme nous le verrons par la suite. Voici d'ailleurs quelques clichés obtenus :



Figures 11 et 12 : Nouveaux clichés observés avec le matériel plus précis (image de gauche) – Echelle : barre rouge 1 mm.

II – Analyse énergétique

1 – Quelle est l'énergie communiquée au papier d'aluminium ?

Pour le savoir, nous avons lâché les billes depuis une hauteur h_A avec le dispositif précédent, puis nous avons noté à quelle hauteur h_B elles remontaient après le choc, sans présence de papier d'aluminium dans un premier temps, puis avec papier d'aluminium dans un deuxième temps. On note $h_{B'}$ la hauteur à laquelle les billes remontent après l'impact sur le papier d'aluminium.

Sans papier d'aluminium, on peut dire que la variation d'énergie mécanique perdue lors du choc, si on néglige les forces de frottement, est égale à :

$$E_m(B) - E_m(A) = (E_c(B) + E_p(B)) - (E_c(A) + E_p(A)) = E_p(B) - E_p(A) = mg(h_B - h_A)$$

Avec papier d'aluminium, l'énergie mécanique perdue par les billes est :

$$E_m(B') - E_m(A) = (E_c(B') + E_p(B')) - (E_c(A) + E_p(A)) = E_p(B') - E_p(A) = mg(h_{B'} - h_A)$$

Or on peut considérer que cette énergie perdue contient l'énergie perdue par les billes sans présence de papier d'aluminium. Si bien que l'énergie réellement transférée au papier d'aluminium est, en tenant compte des 2 billes :

$$E_{Al} = 2mg(h_B - h_{B'})$$

Nous avons réalisé ces mesures pour différentes hauteurs de h_A . Les mesures ont été réalisées 10 fois pour chaque hauteur avec feuille aluminium et de même sans feuille aluminium. Voici alors ce que nous obtenons : figure 13

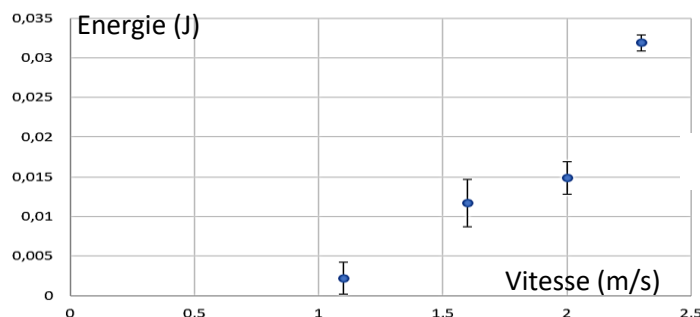


Figure 13 : Energie gagnée par l'aluminium lors

2 - Que devient cette énergie ?

Nous pouvons penser qu'une partie de cette énergie communiquée à l'aluminium permet la déformation, et une autre partie de cette énergie doit sans doute provoquer une élévation de température de l'aluminium. Autrement dit, l'énergie communiquée à l'aluminium, E_{Al} doit se répartir en deux termes : une énergie d'ordre mécanique E_m et une énergie thermique Q :

$$E_{Al} = E_m + Q$$

Pour évaluer l'énergie thermique gagnée par l'aluminium, nous avons utilisé une caméra thermique.

En effet, sachant que, en appelant m_{Al} la masse d'aluminium qui gagne cette énergie thermique, c_{Al} la chaleur massique de l'aluminium, T_f et T_i respectivement les températures immédiatement après et avant le choc :

$$Q = m_{Al} \times c_{Al} \times (T_f - T_i)$$

La mesure de la variation de température nous permettra de déterminer l'énergie thermique Q .

Cela dit, cela impose de connaître la masse d'aluminium qui gagne cette énergie thermique immédiatement après le choc. Pour cela, nous avons supposé que la zone concernée par ce gain d'énergie thermique était la zone aplatie du papier d'aluminium, représentant la surface S impactée par les billes (on voit très bien cette zone centrale figure 12). Ainsi, connaissant la masse volumique ρ_{Al} de l'aluminium, et après avoir mesuré la masse d'une surface donnée d'aluminium, il a été possible d'en déduire son épaisseur e . Ainsi, nous pouvons écrire finalement :

$$Q = \rho_{Al} \times S \times e \times c_{Al} \times (T_f - T_i)$$

Problème : expérimentalement, nous ne mesurons aucune élévation de température de l'aluminium après le choc. Comment l'expliquer ?

Pourtant il nous semble bien qu'en cognant deux objets l'un contre l'autre, cela provoque une élévation de température. C'est d'ailleurs ce que nous avons observé en faisant l'expérience sur du papier :

En cognant les billes sur une feuille de papier, nous avons pu mesurer une élévation de la température immédiatement après l'impact, de l'ordre de 80°C, voire plus, car la caméra thermique a un certain temps de réponse et nous n'avons pas la température avant 1 dixième de seconde après le choc. Nous voyons d'ailleurs que le papier est brûlé localement au niveau de l'impact (figures 14 et 15)

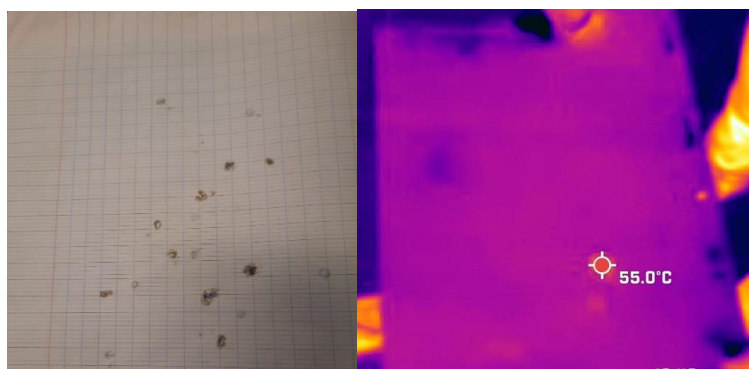


Figure 14 : Photographie d'une feuille de papier brûlée suite à plusieurs impacts

Figure 15 : Photo issue d'une caméra thermique du papier après le choc des billes

Alors pourquoi n'en est-il pas de même pour l'aluminium ? La question nous semble importante car nous voulons savoir ce que devient l'énergie communiquée à la feuille d'aluminium.

Alors pour comprendre les différences observées entre la feuille d'aluminium et la feuille de papier, nous avons recherché les caractéristiques intéressantes de ces 2 matériaux :

	Conductivité thermique W/m.K	Chaleur massique J/kg.K	Masse volumique kg/m ³	Épaisseur mm
Aluminium	185	900	2700	0,02
Papier	0,05	1300	734,6	De 0,16 à 0,52

La différence flagrante est donc la conductivité thermique, qui montre que l'énergie thermique gagnée dans la zone de l'impact se dissipe très vite dans la feuille d'aluminium, contrairement à ce qui se passe dans le papier. C'est donc sans doute pour cela que la température quelques dixièmes de secondes après le choc est si élevée dans le papier contrairement à l'aluminium.

On peut alors supposer que l'énergie thermique se répartissant rapidement sur la surface de la feuille de papier aluminium, la grande surface du papier aluminium en contact avec l'air fait rapidement perdre cette énergie thermique, ce qui serait responsable du fait que nous ne parvenons pas à mesurer l'élévation de température de l'aluminium.

Et peut-être aussi que la plus faible capacité thermique de l'aluminium traduit une plus grande difficulté à faire gagner de l'énergie thermique à l'aluminium. D'autant plus que la masse concernée de l'aluminium est très faible.

Finalement, la différence observée entre le papier et l'aluminium pourrait venir du fait que l'énergie transmise par les billes se transforme essentiellement en énergie thermique dans le cas du papier, et en énergie mécanique conduisant à la formation des vagues dans le cas de l'aluminium.

Pour essayer de vérifier cette hypothèse, nous avons refait l'expérience cette fois-ci avec une feuille de plastique. Il s'agit de feuille transparente de 200 μm d'épaisseur, en PVC.

La conductivité thermique du PVC est entre 0,16 et 0,20 W/m.K et la chaleur massique est environ 1000 J/kg.K

Et voici ce que nous observons avec la feuille de plastique : figure 16

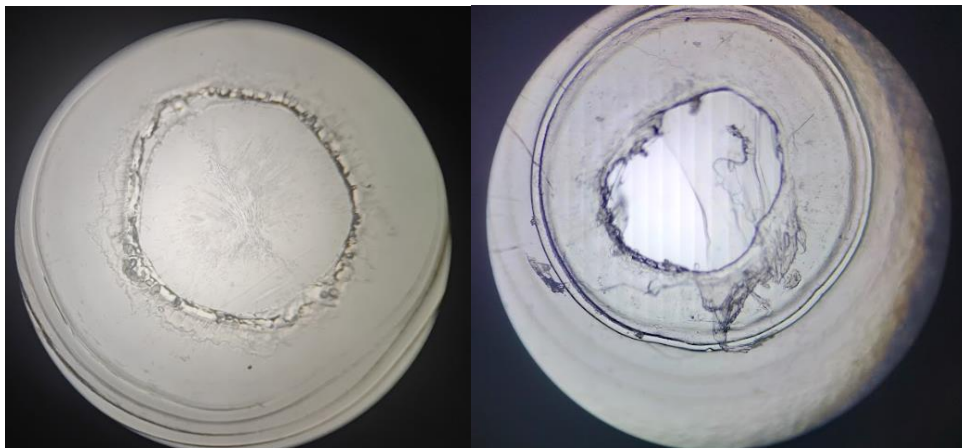


Figure 16 : Observations au microscope du point d'impact des billes sur une feuille de plastique

Non seulement le plastique fond dans la zone de l'impact, mais il apparaît également des vagues de déformation du plastique.

Dans la littérature scientifique, nous avons vu que le PVC commence à se ramollir autour de 80°C, et fond complètement aux alentours de 125°C [3].

Cette expérience semble donc infirmer notre hypothèse précédente qui visait à dire que si la température de l'aluminium n'augmente pas, cela provient du fait que l'énergie transmise à l'aluminium lors du choc est intégralement transformée en énergie mécanique. En effet, on voit bien dans le cas du PVC que celui-ci chauffe et pourtant cela n'empêche pas la formation des ondulations autour du point d'impact.

En fait, nous avons eu l'occasion de nous entretenir avec Florian Moreau, chercheur à l'institut Pprime de l'Université de Poitiers à ce sujet. Et il s'avère que si nous ne parvenons pas à mesurer une élévation de la température de l'aluminium, cela provient du fait qu'il est très réfléchissant. Son coefficient d'émissivité est très faible et la caméra thermique mesure davantage les ondes électromagnétiques réfléchies par l'aluminium que celles émises par l'aluminium.

Florent Moreau nous a alors proposé de peindre nos papiers d'aluminium avec une peinture noire de coefficient d'émissivité connue dans son laboratoire. C'est ce qui est en train d'être réalisé à l'heure où nous écrivons le mémoire. Nous serons alors sans doute en mesure de mesurer l'élévation de température après le choc.

Remarques :

1 – L'expérience semble aussi montrer que finalement, les vagues observées ne sont pas être liées à l'élévation de la température. Car les cercles dans le cas du PVC sont assez éloignés de la zone fondue de l'impact. Vu la faible conductivité thermique du PVC, la propagation de l'énergie thermique dans le PVC ne va pas jusque-là et cela a été confirmé par des observations avec la caméra thermique.

Cela dit, est ce que la température aurait pu malgré tout être responsable du phénomène, en créant une dilatation qui aurait ensuite déformé le matériau en le poussant depuis la zone centrale vers l'extérieur ?

Pour étudier cette hypothèse, nous avons cherché les coefficients de dilatation thermique des matériaux avec lesquels nous avons travaillé :

	PVC	Papier	Aluminium
Coefficient de dilatation thermique ($\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	78	35-55	23

On s'aperçoit que le coefficient de dilatation du PVC est bien plus fort que celui de l'aluminium. Or on observe beaucoup plus de vagues sur l'aluminium que sur le PVC. Cela indique donc que des effets de dilatation ne sont pas responsables de la formation des vagues sur l'aluminium.

2 – Deuxième remarque: il y a une question de temporalité qui semble également indiquer que l'énergie thermique n'est pas à l'origine des vagues observées. En effet, selon la littérature scientifique, la propagation de l'énergie thermique dans le papier d'aluminium devrait être de l'ordre de quelques secondes. Or les vagues semblent apparaître plus rapidement. Le phénomène semble quasi immédiat. Donc s'il y a propagation de quelque chose, cela doit se faire plus rapidement.

Alors explorons maintenant une autre piste et voyons si ce qui se propage n'est pas plutôt une onde mécanique ou une déformation mécanique sans que ce soit une onde.

III – Etude mécanique et ondulatoire

1) Présentation de l'hypothèse :

Une autre hypothèse pourrait expliquer l'apparition de ces cercles : lors du choc par les billes, le papier d'aluminium subit localement une grande pression, qui pourrait alors le déformer. Il s'aplatirait alors à l'endroit du choc, et comme le volume de la matière resterait malgré tout constant, l'épaisseur de la feuille d'aluminium diminuerait lors de l'impact, ce qui augmenterait la surface. On pourrait modéliser cela de la façon suivante : à l'endroit de l'impact, on passerait d'un cylindre de caractéristiques géométriques e, h , à e', h' , tel que le montre le schéma suivant : figure 17

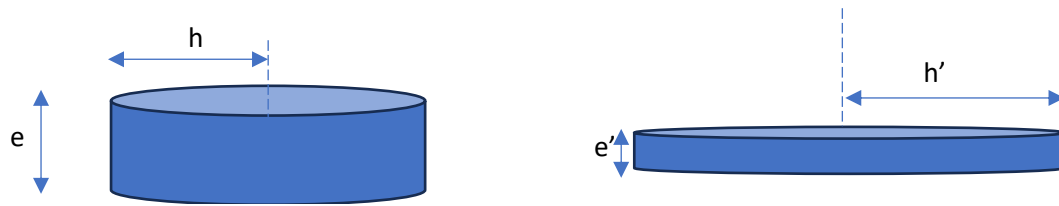


Figure 17 : Illustration de l'évolution de la forme du point d'impact de la feuille d'aluminium avant et après le choc

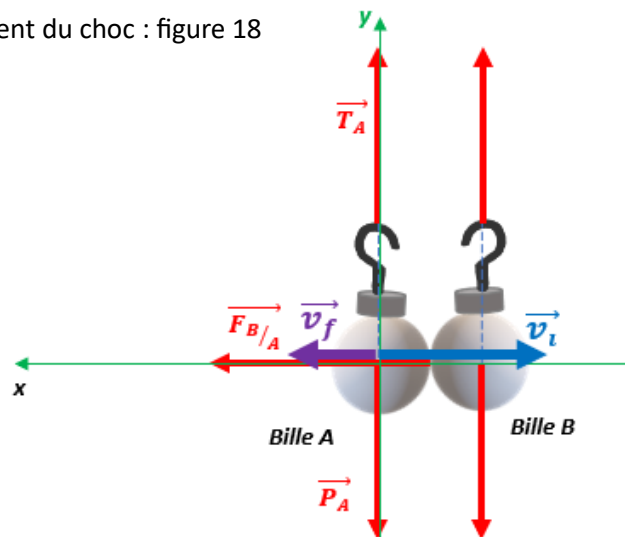
Cette augmentation de surface pousserait alors le papier aluminium sur le côté, et pourquoi pas, conduirait à son plissement sous forme de vagues concentriques. Et d'autre part, la compression temporaire peut être élastique. On pourrait alors avoir une oscillation de la géométrie de l'aluminium, qui pourrait être à l'origine d'ondes qui se propageraient depuis le point d'impact vers la périphérie.

Alors voyons maintenant si ces deux hypothèses sont possibles, en évaluant la déformation subie par le papier d'aluminium lors du choc.

2) Calcul de la force exercée par une bille sur le papier d'aluminium :

Représentons les billes au moment du choc : figure 18

Figure 18 : Schéma représentatif des billes au moment de l'impact



D'après la deuxième loi de Newton appliquée à la bille A, la bille 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 bille 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 (Ox),

$$a_x = \frac{v_{fx} - v_{ix}}{\Delta t} = \frac{v_f + v_i}{\Delta t}$$

Comme par ailleurs,

$$\sum_i \vec{F}_{i \text{ ext}} = \vec{0}$$

En appelant $\vec{P}$ la force de pesanteur appliquée à la bille, et $\vec{F}$ la force exercée par le papier aluminium sur la bille,

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

Comme

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

On en déduit que

$$F_x = m \frac{v_f + v_i}{\Delta t}$$

Du fait de la présence des deux billes, on peut donc dire que la feuille d'aluminium subit une force égale à deux fois F_x : $F = 2m \frac{v_f + v_i}{\Delta t}$

Les vitesses v_f et v_i peuvent être déterminées en mesurant la hauteur h de laquelle s'élance la boule de départ, et en notant la hauteur h' à laquelle elle remonte. En effet, en appliquant la conservation de l'énergie cinétique dans un premier temps avant le choc :

$$E_c = \frac{1}{2}mv_i^2 = mgh \Leftrightarrow v_i = \sqrt{2gh}$$

Et de même après le choc :

$$E_c = \frac{1}{2}mv_{if}^2 = mgh' \Leftrightarrow v_f = \sqrt{2gh'}$$

Donc

$$F = 2m \frac{\sqrt{2gh'} + \sqrt{2gh}}{\Delta t}$$

Nous connaissons déjà les hauteurs h et h' , mais qu'en est-il de la durée du choc ?

En filmant le choc avec une caméra à 1000 images par seconde, nous n'arrivons pas à avoir une seule image pile au moment de l'impact. Le choc dure donc un temps sûrement très inférieur à 1 ms.

Pour mesurer cette durée, nous avons eu l'idée de faire un circuit électrique qui se ferme lorsque les billes se touchent. Le circuit est illustré sur le schéma suivant : figure 19

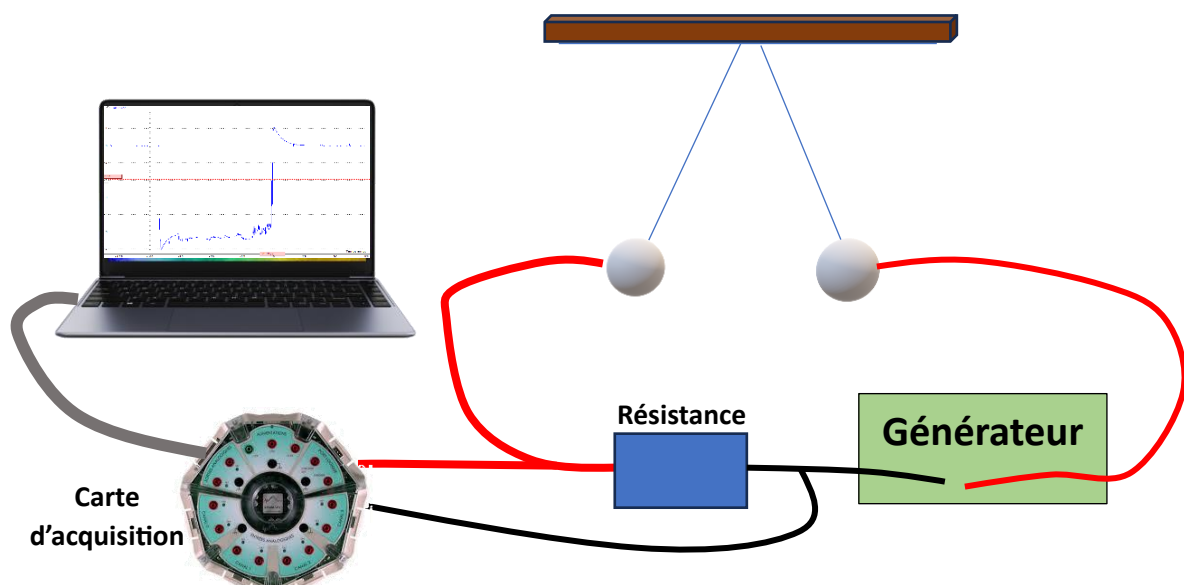


Figure 19 : Schéma du dispositif expérimental utilisé pour mesurer la durée de l'impact des billes

Nous avons alors réalisé la mesure de la durée du contact sans papier d'aluminium entre les boules, et avec papier d'aluminium entre les boules.

Voici alors un exemple de mesure de la durée du choc : Avec papier d'aluminium entre les 2 boules : figure 20

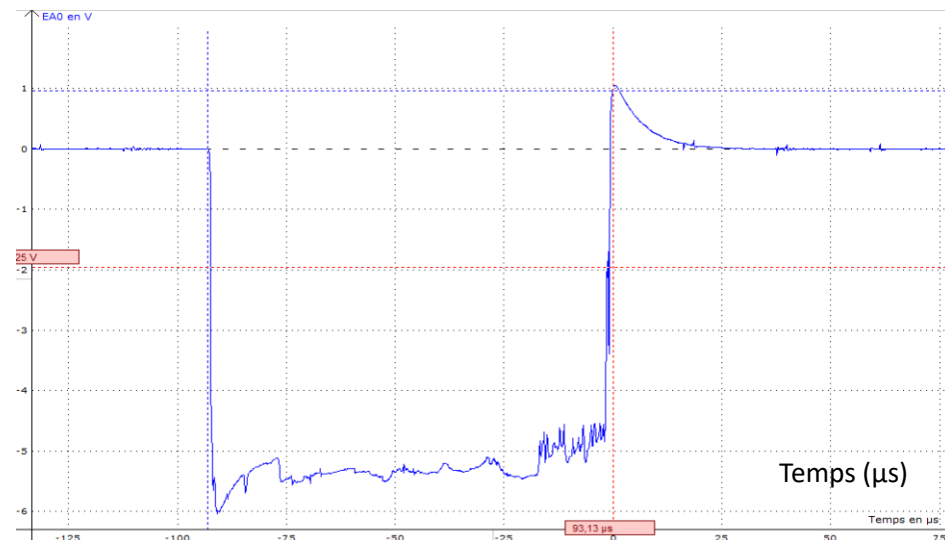


Figure 20 : Mesures obtenues sur lattis pro montrant la durée de l'impact des billes

Et voici ici le graphique qui montre comment évolue la durée de contact en fonction de la hauteur des billes au départ avec papier aluminium entre les billes (figure 21)

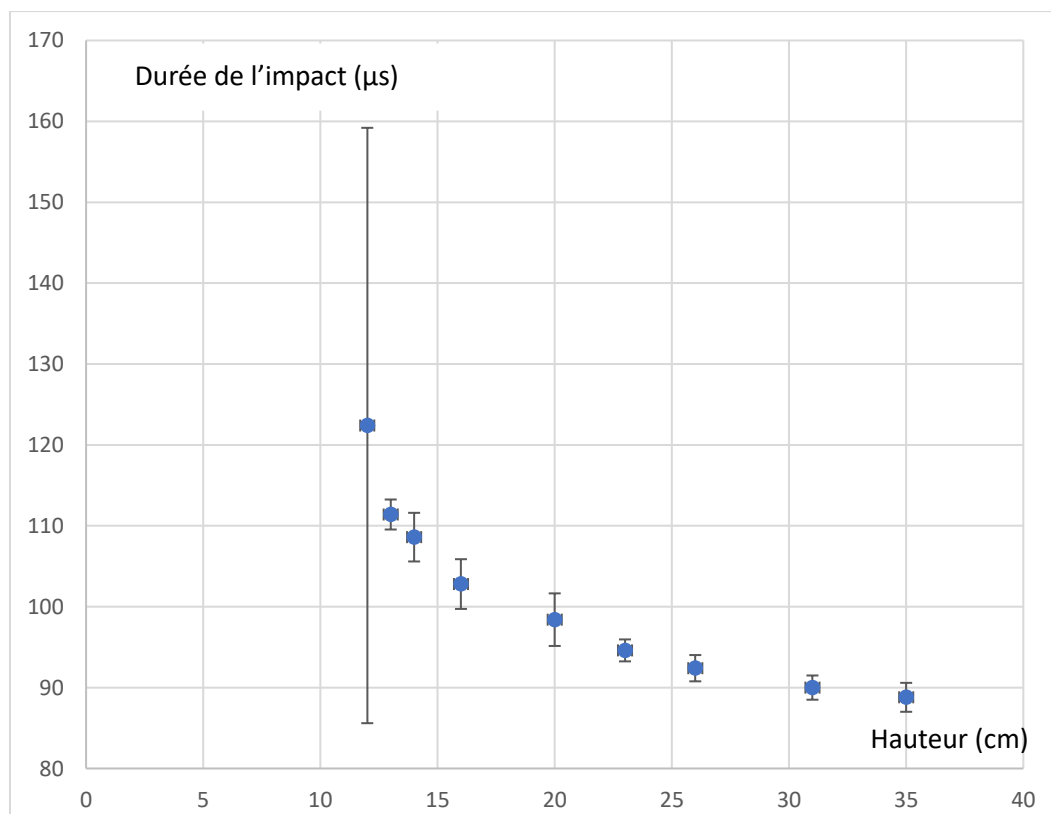


Figure 21 : Evolution de la durée du choc en fonction de la hauteur à partir de laquelle les billes sont lâchées

On peut donc tracer la force subie par chaque bille en fonction de la vitesse des billes au point d'impact : figure 21 bis

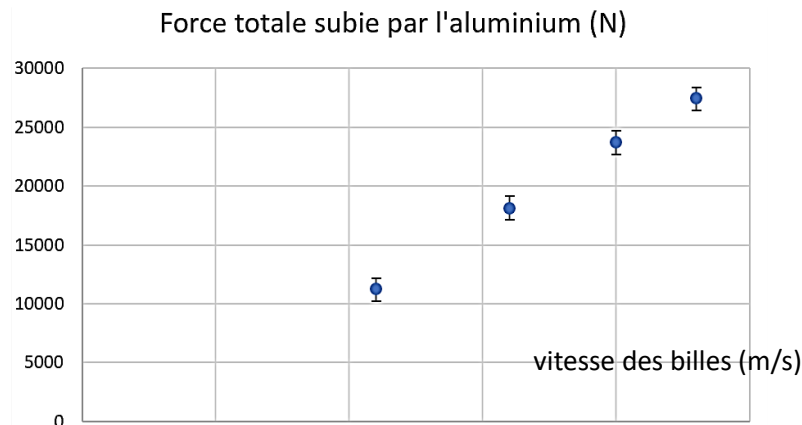


Figure 21 bis : Evolution de la force subie par l'aluminium en fonction de vitesse des billes lors de l'impact

3 – Estimation de la déformation engendrée par le choc

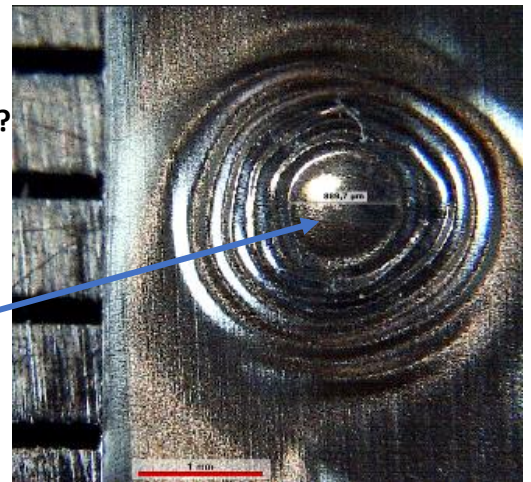
En termes de pression, notée P_r , quelle est la contrainte engendrée ?

$$P_r = \frac{F}{S} = 2m \frac{\sqrt{2gh} + \sqrt{2gh'}}{S\Delta t} = 2m\sqrt{2g} \frac{\sqrt{h} + \sqrt{h'}}{S\Delta t}$$

Les surfaces S de contact ont été évaluées à partir des clichés :

On estime qu'il s'agit de la zone centrale sans ondulation.

À partir de là, comment estimer la déformation engendrée par le coup donné sur le papier d'aluminium ?



S est la surface de contact entre le papier d'aluminium et les billes. Nous l'avons évaluée en considérant qu'il s'agit de la zone dans laquelle n'apparaît aucun cercle.

Si la déformation est temporaire et élastique, elle peut être modélisée par la loi d'Hooke.

Dans ce cas-là, on aurait, en appelant ε_l la déformation relative de l'épaisseur de l'aluminium, que l'on peut nommer déformation longitudinale :

$$\varepsilon_l = \frac{P_r}{E}$$

Où E est le module d'Young de l'aluminium ($E = 69 \text{ GPa}$).

Et la déformation relative de la surface de l'aluminium, appelée déformation transversale :

$$\varepsilon_t = \nu \varepsilon_l$$

Où ν est le coefficient de Poisson de l'aluminium ($\nu = 0,34$).

Voici alors comment évoluent les déformations relatives de l'épaisseur et de la largeur de la feuille d'aluminium dans la zone du contact : figures 22 et 23

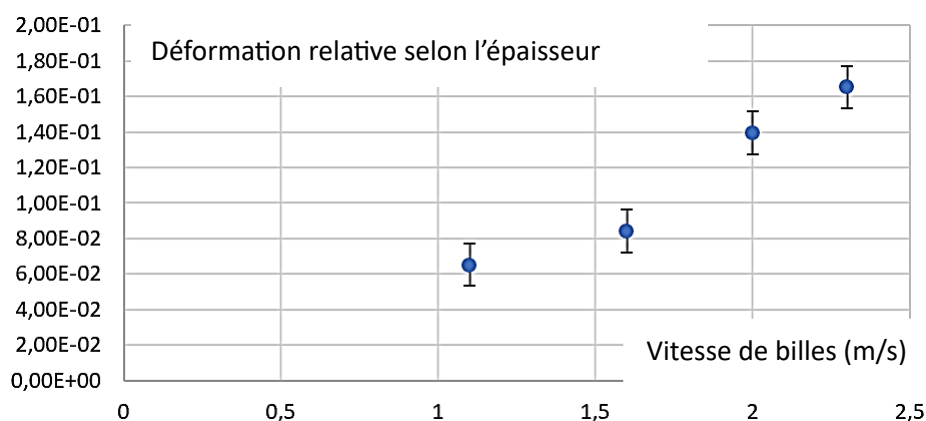


Figure 22 : Graphique représentant la variation d'épaisseur relative en fonction de la vitesse des billes

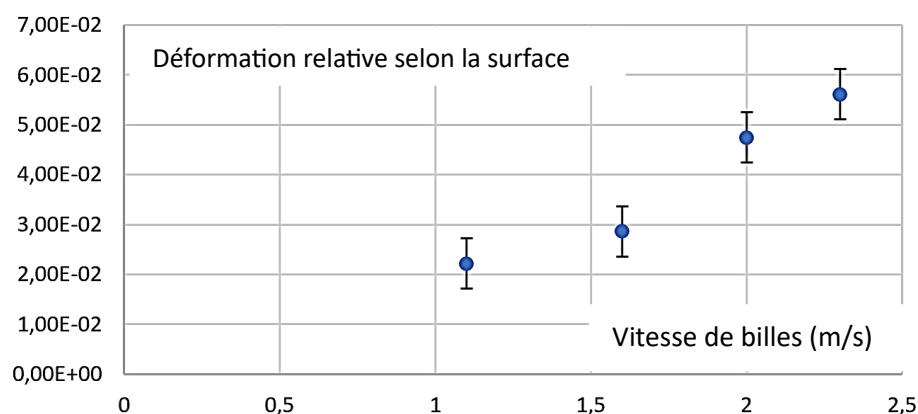


Figure 23 : Graphique représentant la déformation relative de l'aluminium dans le plan de la feuille en fonction de la vitesse des billes

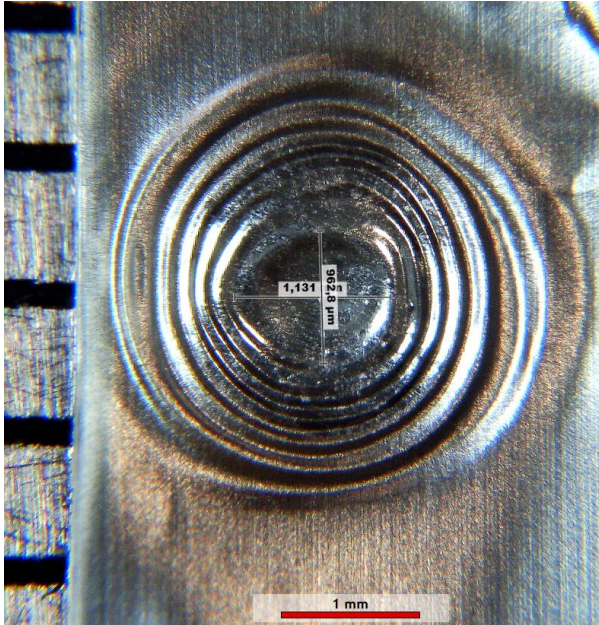
4 - Conclusion sur l'étude mécanique :

Finalement, on peut imaginer que ces déformations peuvent être à l'origine d'ondes au sein de la feuille d'aluminium conduisant aux cercles autour de la zone d'impact. Pourquoi penser cela ?

Tout d'abord, les déformations relatives calculées dans la partie précédente (en supposant un choc élastique) ne sont pas négligeables. Il faut donc bien dans ce cas-là que cette déformation se répercute dans les matériaux.

Et comme nous l'évoquons, cela peut se faire sous la forme d'onde transversale qui se propagent dans le matériau.

En effet, la clarté des images obtenues permettent de se rendre compte d'une certaine régularité dans la position des vagues concentriques, comme le montre le cliché suivant : .



En notant les rayons des ondulations pour chacun des clichés obtenus pour 4 vitesses de billes différentes, voici ce que l'on obtient : Figure 24

On s'aperçoit que la différence entre les rayons des cercles, qui correspondrait à une longueur d'onde, est peu différente pour différentes vitesses de billes au moment de l'impact. Autrement dit, puisque d'un cliché à l'autre, la longueur d'onde resterait sensiblement la même, la célérité des ondes devrait en être de même, ce qui est cohérent avec une description ondulatoire, puisque la célérité d'une onde dans le milieu de dépend que des caractéristiques du milieu de propagation (en supposant le milieu non dispersif).

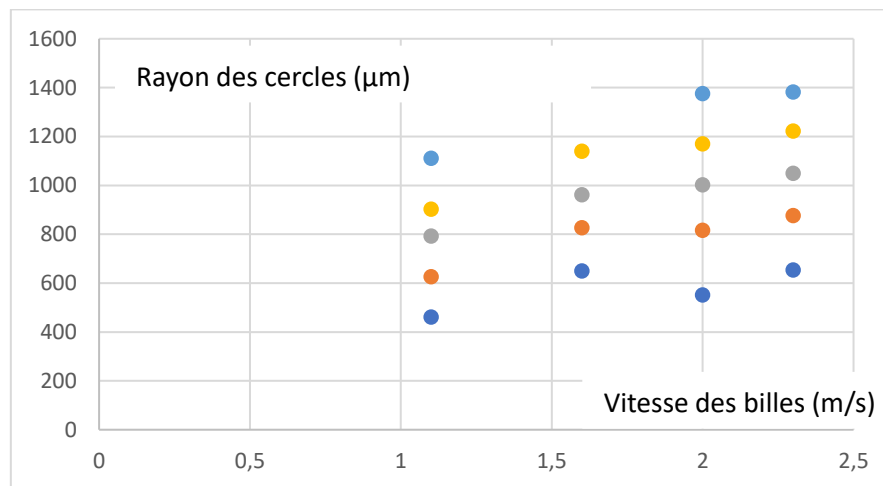


Figure 24 : Rayons des cercles en fonction de la vitesse des billes

Cette onde transversale serait alors issue de la vibration de l'épaisseur et de la surface de l'aluminium lors de l'impact.

Par contre, il est intéressant de voir que, malgré le fait que l'énergie donnée à l'aluminium augmente avec la vitesse des billes, cela ne change pas le nombre de périodes spatiales observées sur les clichés, ni leur répartition par rapport au centre. Alors peut-être qu'une plus grande énergie ne modifie pas cela, mais modifie l'amplitude des ondulations.



Mais comment mesurer l'amplitude des ondulations pour vérifier cette hypothèse ?

Ces derniers jours, nous avons eu l'occasion de réaliser des observations de nos clichés au SP2MI (Faculté des Sciences Physiques Mathématiques Mécaniques et Informatiques), avec Frédéric Pailloux, chercheur à l'université de Poitiers, avec un microscope ultra performant (figure 25) qui, par un jeu de focalisation, permet l'observation de nos clichés en 3 dimensions. Voici quelques images issues de nos observations : figures 26 et 27 a, b c.

Figure 25 : Microscope du SP2MI

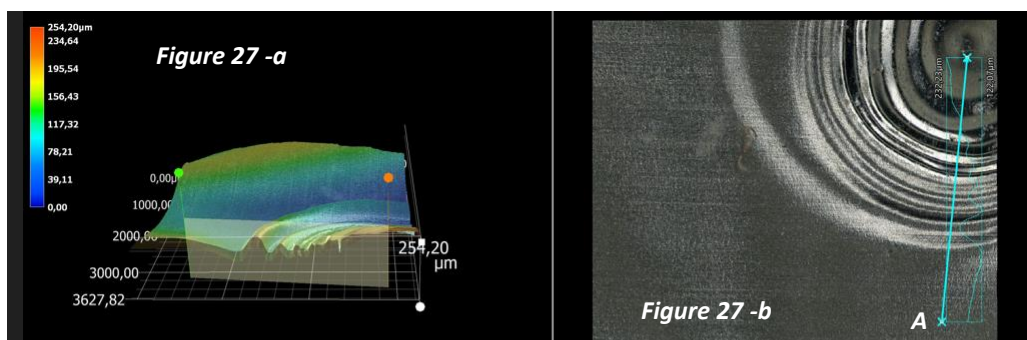
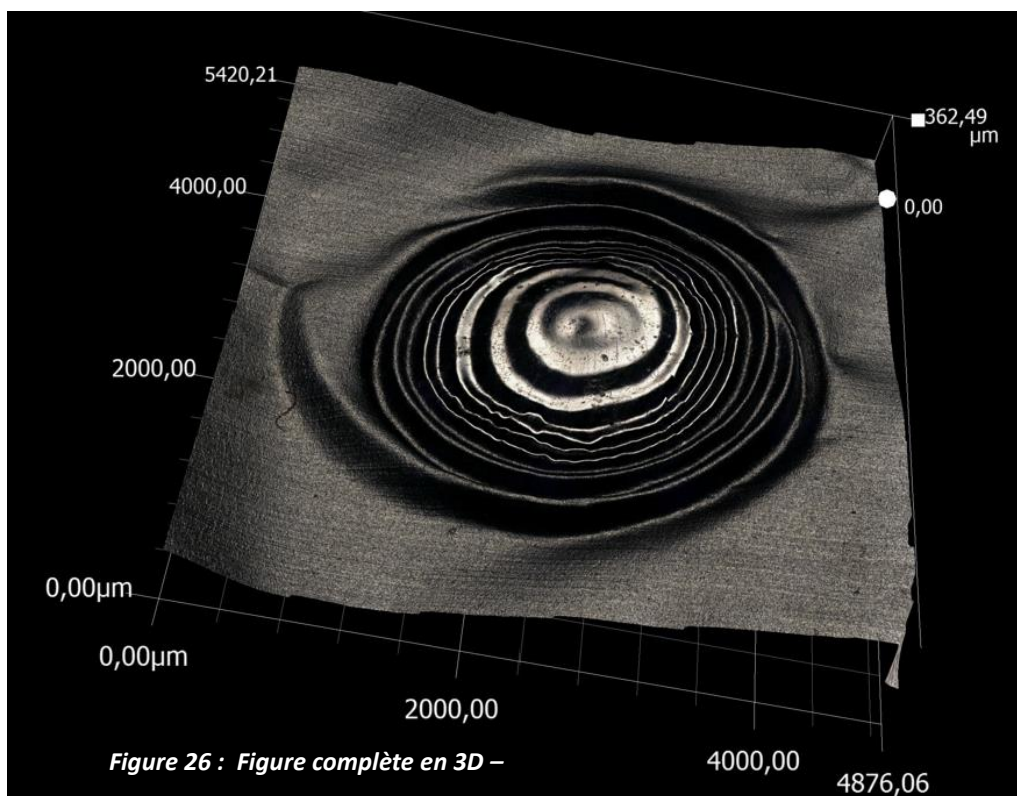
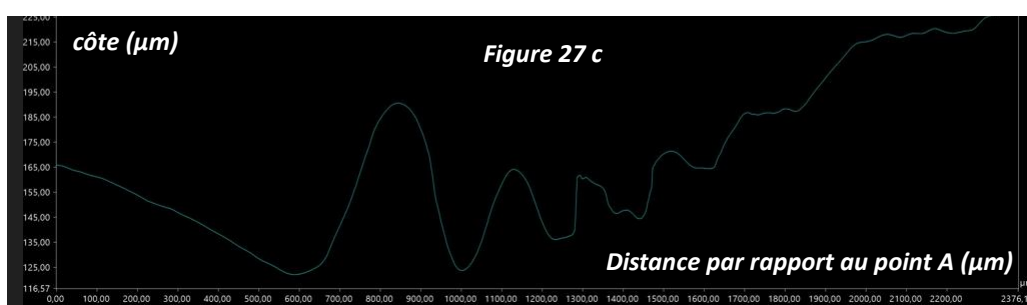


Figure 27 a) – profile de l'aluminium selon la direction tracée sur la figure 27 b) – Figure 27 c) : mesure de la côte de l'aluminium selon cette direction.



Ces premières observations montrent qu'il nous sera possible de mesurer l'amplitude des ondulations pour voir s'il y a un lien entre l'énergie transmise à l'aluminium et l'amplitude des ondulations.

5 – Un choc pas si élastique que cela

Cela dit, nous venons de faire une nouvelle observation : nous avons à nouveau cogné les deux billes sur le papier d'aluminium, puis nous avons coupé la feuille d'aluminium de sorte de pouvoir observer la zone percutée selon sa tranche, c'est-à-dire selon l'épaisseur du papier.

Et le résultat est très intéressant : on voit nettement que la zone percutée a une épaisseur plus faible que la zone autour du point d'impact (figure 28).

Alors cela a au moins 2 conséquences :

- Tout d'abord, la déformation du papier d'aluminium lors de l'impact n'est pas élastique. Elle l'est probablement partiellement, mais elle est aussi en partie plastique puisque l'épaisseur du papier ne reprend pas sa valeur initiale.
- Comme la masse du papier d'aluminium ne varie pas et que l'épaisseur diminue sous l'impact, la surface de la feuille dans la zone de l'impact a forcément augmenté. Ce déplacement de matière a pu pousser la feuille d'aluminium depuis le point d'impact vers l'extérieur, provoquant ainsi un plissement de l'aluminium en forme d'accordéon.

Avec cette hypothèse, on pourrait penser que les cercles observés peuvent donc résulter d'un plissement de la feuille d'aluminium. Grâce aux observations réalisées au SP2MI, nous pouvons tenter de répondre à cette hypothèse. En effet, nous pouvons estimer l'augmentation de la surface de l'aluminium après l'impact à partir du profil des ondulations, et comparer cette augmentation à la diminution du volume de l'aluminium. Mais cette comparaison ne sera possible que si nous parvenons à mesurer beaucoup plus précisément que nous l'avons fait (figure 28) l'épaisseur de l'aluminium après l'impact. Nous avons déjà une idée pour réaliser cette mesure.



Figure 28 : Observation au microscope de la feuille d'aluminium après l'impact

Conclusion –

Nos expériences nous ont permis d'améliorer notre compréhension du phénomène se produisant lors du choc de deux billes en métal sur une feuille d'aluminium. Notamment au niveau des cercles formés sur la feuille, leurs propriétés et leur origine. Ces cercles proviendraient d'ondes mécaniques transversales se propageant à travers la feuille d'aluminium. L'énergie thermique du choc n'aurait pas d'influence sur les cercles.

Nous comptons par la suite changer le type de feuilles utilisées pour observer une propagation différentes des ondes car cette propagation dépend du matériau dans lequel les ondes se déplacent. Nous nous sommes procurés des feuilles composées de métaux différents de l'aluminium afin d'observer s'il y a des différences au niveau des cercles ou bien si le phénomène est toujours observable avec d'autres métaux. Par ailleurs, nous avons l'intention d'observer l'onde mécanique en question à l'aide d'une caméra à haute précision en collaboration avec l'université de Poitiers.

Nous remercions Aurélie Elie et Florence Baudiffier qui nous ont aidés dans notre projet mais aussi Romain Bellanger ingénieur d'études à l'institut Pprime de Poitiers, Florian Moreau, chercheur à l'institut Pprime de Poitiers, et Frédéric Pailloux, chercheur au SP2MI de Poitiers, avec qui nous avons pu échanger à propos de notre projet.