



OLYMPIADES  
DE PHYSIQUE FRANCE

Histoire à rebondissements



**LPI**

*Lycée Pilote Innovant International*



Lucas BLAQUIERE  
Lou—Ann GUIGNARD  
Corentin CAO  
Léa BROSSARD  
Juliette ROBIN  
Chengwei LI

## Résumé :

Cela aurait juste pu rester un jeu, mais les ricochets sont bien plus que cela. Plusieurs questions tournent autour de cette activité. Comment lancer un galet ? Comment le galet peut-il rebondir sur l'eau ? Faut-il faire tourner le galet le plus vite possible pour battre les records de nombre de rebonds ?

Pour répondre à ces questions nous avons lancé des galets. Cela paraît si simple, et pourtant il y a tant à dire une fois que l'on voit les vidéos des lancers, que chacune d'entre elles nous permettait d'avancer dans notre réflexion, d'imaginer des expériences pour répondre à nos nouveaux questionnements. Et comme lancer des cailloux à la main ne nous suffisait pas, nous avons imaginé une machine à ricochets.

## Sommaire :

### Introduction

I – Quels paramètres interviennent lorsque l'on fait un ricochet ?

II – Acquisitions vidéo des lancers et analyse

III – Comment la portance et la traînée peuvent-elles modifier la trajectoire du galet ?

IV - A quelle condition sur la vitesse initiale le galet peut-il rebondir ?

V – Notre machine à ricochets

### Conclusion

## Introduction :

Lors de ce projet, nous avons voulu savoir s'il était possible d'établir les conditions optimales qui permettent de faire des ricochets.

Et par « conditions optimales », on peut viser 2 objectifs en termes de performance :

- Faire un ricochet qui conduise au plus grand bond du galet après l'impact sur l'eau.
- Faire en sorte d'avoir le plus de rebonds sur l'eau avec un seul lancer.

Nous ne savions pas, quand nous avons commencé ce projet, si ces deux objectifs allaient être identiques. Mais nous pensons que non : ce n'est pas parce que le premier ricochet conduira à un grand bond que le nombre de ricochets sera important, car l'angle d'arrivée du galet lors du deuxième ricochet par rapport à l'horizontale risque alors de ne pas être favorable pour que le galet redécolle de l'eau après le premier impact. Mais ce ne sont là que des intuitions qu'il va falloir mettre en équation, et tester aussi expérimentalement.

Dans ce mémoire, nous commencerons par décrire les variables qui interviendront dans notre étude. Puis nous analyserons différents lancers de galets, avec différentes conditions initiales. Nous essayerons de décrire ce qui se passe durant tout le moment où le galet se trouve au contact de l'eau. Enfin nous présenterons notre machine à ricochets, qui va s'avérer être un outil indispensable pour poursuivre avec précision notre travail.

## I – Quels paramètres interviennent lorsque l'on fait un ricochet ?

### 1 ) Les grandeurs physiques que nous allons utiliser pour décrire le ricochet :

Lorsqu'on lance un galet dans l'eau, plusieurs paramètres entrent en compte pour décrire la façon dont le ricochet se déroule :

- La vitesse  $v_1$  du centre d'inertie du galet par rapport à l'eau.
- La vitesse de rotation  $\omega_1$  du galet sur lui-même, autour de l'axe de rotation par rapport auquel on le fait tourner,
- L'angle  $\alpha_1$  que fait le plan du galet par rapport à la surface horizontale de l'eau au moment de l'impact.
- L'angle que fait la direction du centre d'inertie du galet juste avant l'impact par rapport à la surface horizontale de l'eau :  $\theta_1$ .

Ces différents angles et vitesses sont ainsi représentés sur le schéma figure 1a

D'autre part, après que le galet ait touché l'eau, d'autres grandeurs physiques vont permettre de décrire la façon dont s'est déroulé le ricochet :

- La vitesse  $v_2$  du centre d'inertie du galet par rapport à l'eau
- La vitesse de rotation du galet sur lui-même, autour de l'axe de rotation par rapport auquel on le fait tourner,
- L'angle que fait le plan du galet par rapport à la surface horizontale de l'eau au moment de l'impact,
- L'angle que fait la direction du centre d'inertie du galet juste avant l'impact par rapport à la surface horizontale de l'eau.

- L'angle  $\beta$  (figure 1c) que fait le plan  $P_1$  d'incidence du galet, c'est-à-dire le plan contenant le vecteur vitesse  $\vec{v}_1$  juste avant l'impact et la perpendiculaire à la surface de l'eau au lieu de l'impact, et le plan  $P_2$  contenant le vecteur vitesse après ricochet  $\vec{v}_2$  et la perpendiculaire à la surface de l'eau à l'endroit où le galet décolle de l'eau, en quête d'autres horizons à atteindre !

Ces différents angles et vitesses sont ainsi représentés sur le schéma figure 1b

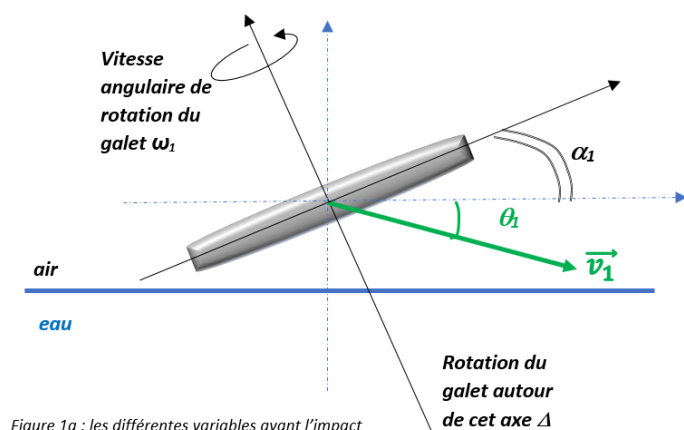


Figure 1a : les différentes variables avant l'impact

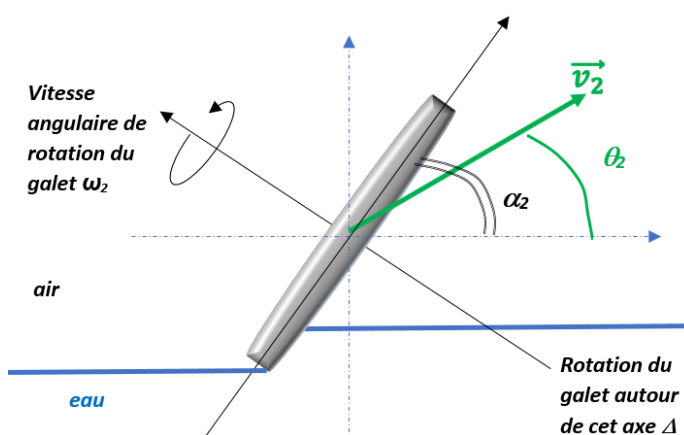


Figure 1b : les différentes variables après l'impact

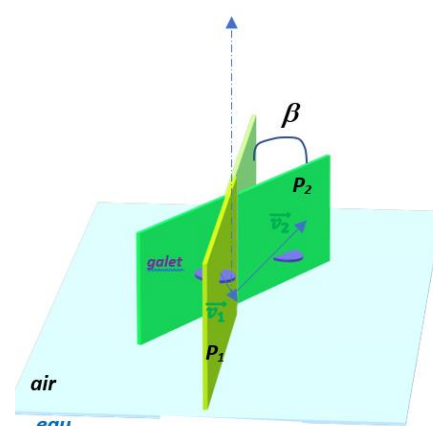


Figure 1c : l'angle  $\beta$

### Remarque : Le lancer idéal :

- Dans le cas d'un ricochet idéal, le galet glisse sur l'eau au moment de l'impact, et son inclinaison au moment de l'impact est égale à l'orientation de sa direction après l'impact :  $\theta_2 = \alpha_1 = \alpha_2$ . Nous verrons que les lancers sont parfois loin de cet idéal.
- Dans le cas d'un lancer idéal, l'inclinaison du galet ne varie pas au cours du ricochet :  $\alpha_1 = \alpha_2$
- Nous verrons que les lancers s'écartent souvent de ce cas idéal.

Enfin, lorsque le ricochet est dans l'eau, il est compliqué de décrire exactement comment il se comporte. Néanmoins, nous avons pu relever certaines informations que nous essayerons d'exploiter dans notre étude.

Durant cette phase, on pourra essayer alors de parler de :

- La vitesse de son centre d'inertie,
- Sa vitesse de rotation,
- La durée de son trajet dans l'eau

## 2 ) Les notions physiques qui vont intervenir dans notre étude :

Pour étudier le ricochet, nous utiliserons donc des notions de cinématique, et de dynamique.

En filmant le ricochet, nous aurons ainsi accès à la position du galet au cours du temps, ce qui nous permettra de remonter à son accélération. Nous pourrions également faire des bilans d'énergie. Par contre, il sera plus délicat à l'aide de simples vidéos de discuter en termes de forces durant la phase où le galet est en contact avec l'eau. Nous avons alors été amenés à imaginer d'autres expériences complémentaires pour discuter de cette phase particulière, où logiquement, le galet subit une force de frottement exercée par l'eau. Cette force de frottement peut se décomposer en deux termes :

- Une force qui tend à empêcher le galet d'avancer, appelée traînée  $\vec{T}'$
- Une force qui tend à soulever le galet, d'où son nom « portance »  $\vec{N}'$

Ces forces sont représentées sur le schéma suivant :

Figure 2

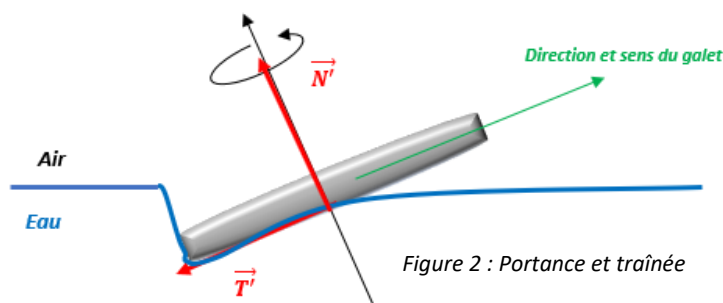


Figure 2 : Portance et traînée

Notons dès à présent que le galet subit également deux autres forces, dont l'une est :

- La force de pesanteur  $\vec{P}$ , toujours présente
- L'autre est la poussée d'Archimède  $\vec{\Pi}$  si le galet est en partie immergé dans l'eau

## 3 ) Préparation des acquisitions vidéo :

Nous avons préparé une scène pour que le galet (figure 3), véritable star de l'instant, puisse être filmé sous tous les angles. D'ailleurs, à propos de galet, comme nous voulions que les résultats de nos expériences puissent être comparés entre eux, nous avons toujours travaillé avec des galets identiques. Et pour cela, nous les avons faits nous même avec de la résine et un moule. Nous avons par ailleurs dessiné en noir une portion du galet, de sorte de pouvoir mesurer sa vitesse de rotation sur les vidéos.

Pour pouvoir mesurer les vitesses et les angles avec le maximum de précision, nous avons donc installé 3 caméras disposées de la façon suivante :

- Caméra 1 : filme de face, dans un plan parallèle à la plus grande surface de l'aquarium
- Caméra 2 : filme sur le dessus de la surface de l'eau
- Caméra 3 : filme le galet depuis la position du lanceur

Nous sommes maintenant prêts à lancer le galet, en essayant de faire varier les conditions d'arrivée du galet sur la surface de l'eau. Nous avons donc essayé de faire varier les angles  $\alpha_1$  et  $\theta_1$ , la vitesse  $v_1$ , ainsi que la vitesse de rotation. Mais il était compliqué de faire varier un seul paramètre à la fois, car instinctivement, le fait de lancer le galet plus doucement nous faisait le tourner également moins vite sur lui-même. Nous avons donc dû faire un très grand nombre de lancers pour pouvoir avoir une variété de conditions initiales suffisamment grande.

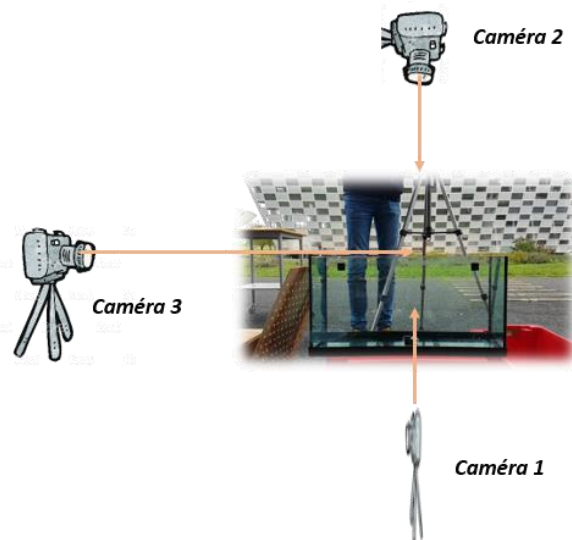


Figure 3 : 3 caméras pour filmer les ricochets

## II – Acquisitions vidéo des lancers et analyse

### 1 – Acquisition et traitement des vidéos.

Nous avons filmé à 240 images par seconde. Mais en réalité il s'avère que selon la caméra utilisée, le nombre d'images par seconde n'était pas vraiment 240. Il nous a alors fallu compter à chaque fois le nombre d'images par seconde, pour chaque vidéo, pour qu'une fois ralentie avec un autre logiciel, nous disposions d'une base de temps correcte. Un exemple de vidéo est disponible en suivant le lien :

<https://youtu.be/geRzde3ecW8>

En pointant alors sur la position du galet sur chaque image de la vidéo obtenue, nous avons ensuite récupéré les coordonnées  $x$  et  $y$  du galet grâce au logiciel LATIS PRO. Une petite précision : pour étalonner la vidéo, nous avons mesuré la longueur de l'aquarium : 80 cm. Mais encore faut-il savoir où, dans la largeur de l'aquarium, le galet percute l'eau. En visualisant la vidéo de la caméra 2, on peut voir que sur l'exemple de la vidéo que l'on traite ici, le galet percutant l'eau au milieu de la largeur de l'aquarium, la barre de l'étalonnage (double flèche bleue sur la figure 4) doit être positionnée en conséquent, c'est-à-dire ici :



Figure 4 : Etalonnage : attention à la profondeur de champ

Voici par exemple (figure 5) les coordonnées pour la vidéo dont le lien figure ci-dessus :

Coordonnées  $x(t)$  et  $y(t)$

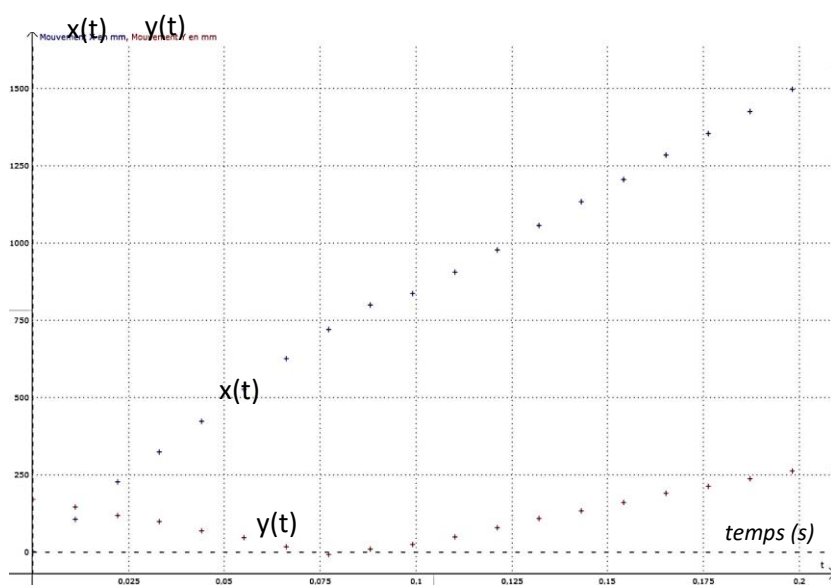


Figure 5 : coordonnées  $x$  et  $y$  du galet avant et après ricochet

Une fois les coordonnées de  $x(t)$  et  $y(t)$  obtenues, nous les avons modélisées. Pour cela, nous avons utilisé un modèle linéaire (figure 6) pour  $x(t)$  avant l'impact, ainsi qu'après l'impact. Conformément aux lois de Newton, cela signifie que les frottements du galet dans l'air peuvent être négligés, au moins durant la durée de la vidéo. Pour  $y(t)$  nous avons vu qu'un modèle parabolique convient tout à fait, ce qui reste là aussi cohérent avec la deuxième loi de Newton. Nous avons appelé ces modèles  $X(t)$  et  $Y(t)$ .

Comme on peut le voir sur la figure 6, nous avons choisi de modéliser dans le même fichier Latis pro les coordonnées avant et après le ricochet. Le fait de garder la même origine du repère ne pose pas de problème particulier car nous voulons exploiter l'expérience en termes de vitesse et d'énergie.



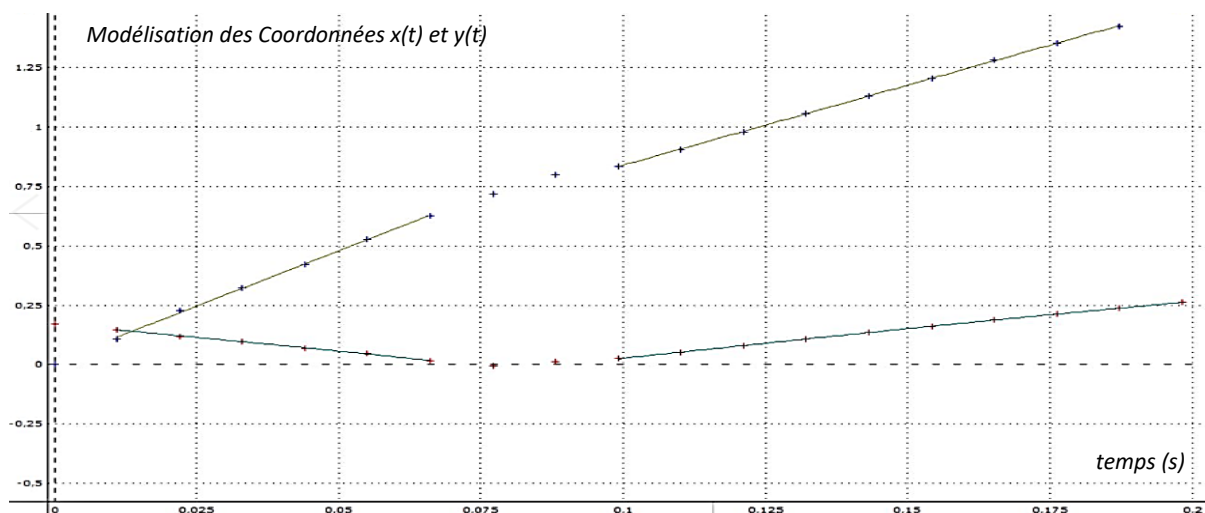


Figure 6 : Modélisation par partie des coordonnées, avant et après l'impact

Une remarque : Dans un premier temps, nous avons commencé par travailler avec une vidéo dans laquelle on voyait le galet faire un ricochet avec un angle  $\beta$  de  $30^\circ$ . Cet angle posait alors un problème car l'étalonnage réalisé sur la vidéo n'est valable que pour les mouvements situés dans un plan perpendiculaire à l'axe optique de la caméra. Il ne nous a pas paru évident de corriger alors les coordonnées, et nous avons alors préféré ne travailler qu'avec des ricochets dont la trajectoire ne s'écartait pas plus de  $10^\circ$  d'un plan perpendiculaire à l'axe optique de la caméra 1. Pour minimiser les erreurs dues à un éventuel angle  $\beta$ , nous avons, quand cela s'avérait nécessaire, privilégié les points expérimentaux proches de l'impact pour calculer les modèles.

Connaissant alors  $X(t)$  et  $Y(t)$ , nous avons pu calculer les vitesses juste avant et après impact. Dans l'exemple traité ici,  $v_1 = 10,2 \text{ m/s}$  et  $v_2 = 7,8 \text{ m/s}$ . Les composantes des vitesses avant et après impact, selon les axes horizontal et vertical nous ont permis de déterminer l'angle que fait la direction du centre d'inertie du galet par rapport à la direction horizontale avant et après le ricochet. En effet, conformément à la figure 7 :

$$\theta_1 = \text{Arctan}\left(\frac{v_{1y}}{v_x}\right)$$

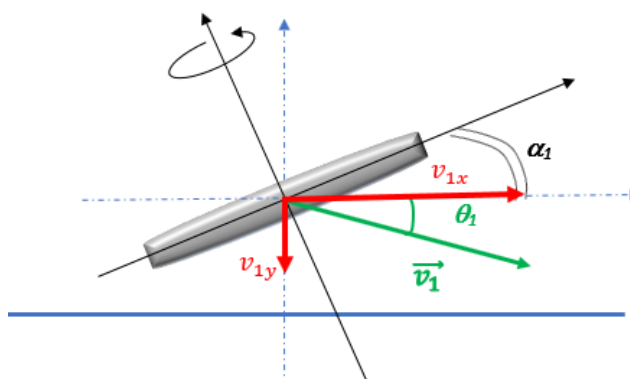


Figure 7 : Détermination de l'angle d'incidence

Ainsi, pour la vidéo traitée en détail ici, nous avons trouvé un angle de  $\theta_1 = 15^\circ$  et un angle  $\theta_2 = 21^\circ$ , ce qui est en parfaite adéquation avec les angles que l'on peut mesurer directement au rapporteur sur la chronophotographie réalisée avec le logiciel Latis Pro.

Nous avons ensuite mesuré les énergies mécaniques avant et après l'impact : figure 8

Toujours sur le même lancer, on peut ainsi voir que l'énergie mécanique du centre d'inertie du galet passe de 2,66 J juste avant l'impact du galet sur l'eau, à 1,52 J.

Nous avons enfin estimé la vitesse de rotation du galet sur lui-même avant et après le ricochet grâce à la caméra 2 : on trouve  $\omega_1 = 63 \text{ rad/s}$  et  $\omega_2 = 45 \text{ rad/s}$ . Ceci nous permet alors de déterminer l'énergie cinétique de rotation du galet autour de son axe.

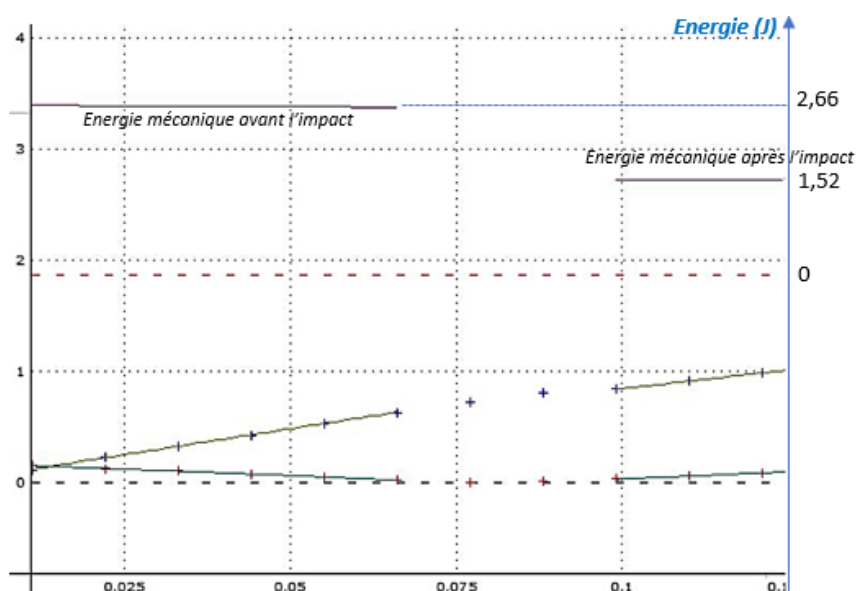


Figure 8 : Evolution de l'énergie mécanique

Nous devons toutefois préalablement estimer son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation. Comme le galet est un cylindre de 8mm de hauteur et de rayon 2,25 cm, et de masse  $M = 0,050 \text{ kg}$ , le moment d'inertie  $J_{\Delta} = \frac{1}{2}MR^2$  vaut :  $J_{\Delta} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ Kg.m}^2$

Ainsi, les énergies cinétiques de rotation du galet avant et après ricocher valent respectivement :

$$E_{C1} = \frac{1}{2}J_{\Delta}\omega_1^2 = 0,031\text{J} \text{ et } E_{C2} = \frac{1}{2}J_{\Delta}\omega_2^2 = 0,016\text{J}$$

L'énergie mécanique totale du galet est alors égale à 2,69 J, et 1,54 J après l'impact.

Sur le graphique figure 8, nous pouvons aussi estimer le temps que le galet surfe sur l'eau avant de reprendre son envol : environ 0,015 s.

Connaissant alors la variation d'énergie mécanique du galet pendant le laps de temps durant lequel le galet est en contact avec l'eau, nous pouvons en déduire la puissance perdue par le galet durant ce temps-là :

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{-1,15}{0,015} = -7,7 \cdot 10^1 \text{ W}$$

Il va être très intéressant de relier cette perte de puissance aux forces subies par le galet lorsqu'il est en contact avec l'eau. Mais avant cela, nous allons présenter quelques résultats que nous avons obtenus lors d'autres lancers de galets.

## 2 ) Résultats avec d'autres conditions initiales : figure 9

Nom de la vidéo	Nom	A	B	C	D	E	F
Vitesse d'arrivée sur l'eau	$v_1$ (m/s)	7,1	7,4	6,7	5,6	11,3	10,2
Vitesse après ricochet	$v_2$ (m/s)	4,2	4	1,32	1,42	7,2	7,8
Angle d'arrivée du galet	$\theta_1$ (°)	29,3	19,1	35	38,4	28,3	13,8
Angle de départ après ricochet	$\theta_2$ (°)	29,7	26,5	9,1	27	29,3	21,4
Inclinaison galet avant ricochet	$\alpha_1$ (°)	0	35	-10*	-25*	0	15
Inclinaison galet après ricochet	$\alpha_2$ (°)	50	45	90	90	40	25
Rotation galet avant ricochet	$\omega_1$ (°)	70	63	55	?	63	63
Rotation galet après ricochet	$\omega_2$ (°)	57	42	?	?	63	45
Durée de l'impact	$\Delta t$ (s)	0,03	0,024	0,07	0,1	0,015	0,015
Energie mécanique d'arrivée	$E_{m1}$ (J)	1,43	1,4	1,3	1	3,3	2,66
Energie mécanique après	$E_{m2}$ (J)	0,45	0,42	0,06	0,07	1,3	1,52
Energie cinétique de rotation avant	$E_{c1}$ (J)	0,04	0,03	0,02	?	0,03	0,03
Energie cinétique de rotation après	$E_{c2}$ (J)	0,03	0,01	?	?	0,03	0,02
Variation d'énergie totale	$\Delta E$ (J)	-0,99	-1,00	?	?	-2,00	-1,15
$\Delta E / E_{m1}$	$\Delta E / E_{m1}$	-0,69	-0,71	-0,95	-0,93	-0,61	-0,43
Puissance perdue	P (W)	-33	-42	-18	-9	-133	-77

Figure 9 : Différents lancers- \* Les signes – sur les angles correspondent à des incidences du galet sur l'eau telles que l'avant du galet touche l'eau en premier

- Commentaire sur la vitesse de rotation  $\omega$

On peut dire que de façon générale, si le but est de faire un grand nombre de ricochets, ce n'est pas la vitesse de rotation  $\omega$  du galet qui va représenter le point sensible. En effet, la perte d'énergie durant l'impact, due à la diminution de la vitesse de rotation du galet ne représente qu'environ 3% de l'énergie totale perdue. Par contre, il faut tout de même que le galet tourne sur lui-même, car sinon le ricochet ne se fait pas. Nous nous sommes amusés, pour nous en convaincre, à



lancer un galet avec une bonne vitesse et un angle  $\alpha$  favorable pour optimiser la chance de faire rebondir le galet sur l'eau, mais sans succès. La rotation du galet est donc essentielle, mais ce n'est pas ce qui va limiter le nombre de ricochets que l'on pourra faire au cours d'un lancer, car l'énergie cinétique de rotation diminue très faiblement par rapport à l'énergie cinétique de translation du galet au moment de l'impact. (De ce fait, il n'est pas grave dans nos analyses de ne pas avoir pu remplir certaines cases qui concernent la rotation du galet pour les lancers C et D).

- Commentaire sur la vitesse initiale  $v_1$

Par contre, le paramètre le plus important semble être la vitesse avec laquelle le galet arrive sur l'eau. En effet, on remarque que plus cette vitesse est faible, et plus le galet perd une vitesse relativement grande par rapport à sa vitesse de départ. Il en est de même pour l'énergie. On le voit clairement lorsqu'on compare les lancers C et D aux autres lancers.

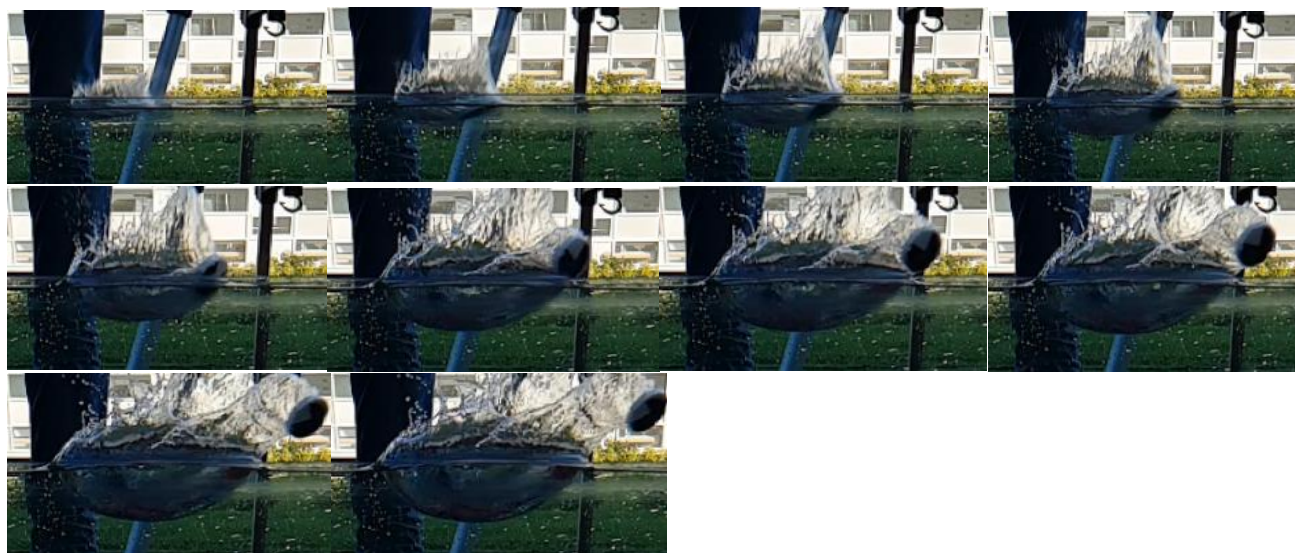
- Commentaire sur l'inclinaison du galet  $\alpha$

On remarque que l'inclinaison du galet est modifiée après chaque ricochet : l'angle augmente, mais il est difficile de faire le lien avec les autres paramètres mentionnés dans le tableau. Nous pensons toutefois qu'une plus grande vitesse initiale accompagnée d'une grande rotation du galet devrait permettre au galet de conserver son inclinaison lors du ricochet. En effet, nous avons pu voir, lors de certains lancers, que pour une vitesse faible, le galet, en percutant l'eau, fait un cratère qui peut influencer son inclinaison après l'impact. En fait, nous avons remarqué que l'inclinaison  $\alpha_2$  est différente de  $\alpha_1$  dès lors que la vitesse avec le galet glisse sur l'eau au moment de l'impact est plus faible que la vitesse avec laquelle la cavité se forme dans l'eau, du fait de l'impact avec le galet. On peut le voir dans les différentes vidéos, comme par exemple celles-là : figures 10F, 10A et 10D

F :

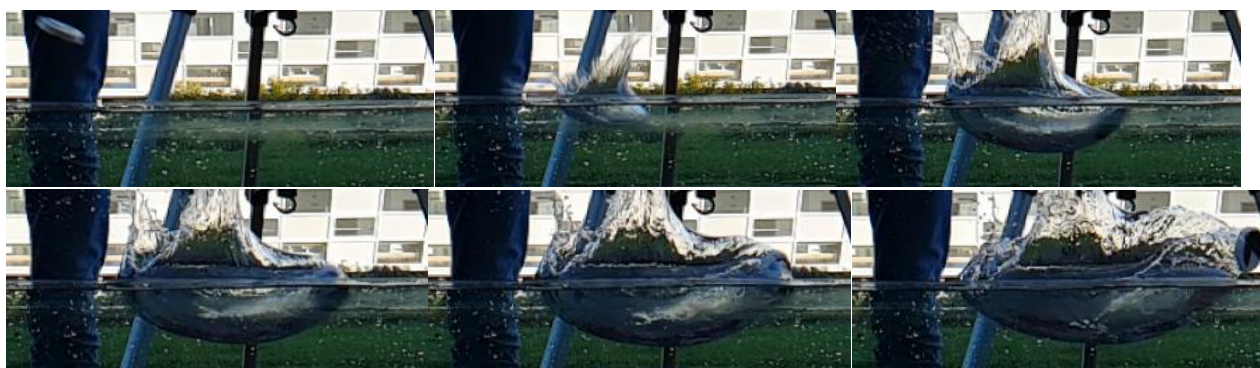


A : *Figure 10F : vitesse  $v_1$  élevée*



*Figure 10A : vitesse  $v_1$  moyenne*

D :



*Figure 10D: vitesse  $v_1$  faible*

On peut voir dans ces trois exemples, choisis du fait que la vitesse initiale du galet est différente pour chacun d'entre eux, que dans tous les cas, l'inclinaison du galet est liée à la courbure de la cavité creusée dans l'eau au moment où il sort de l'eau. Par contre, on remarque dans le tableau figure 9, que l'angle  $\alpha_2$  après ricochet n'est pas égale à l'angle  $\theta_2$ . Le cratère ne va donc pas jusqu'à jouer un rôle de rampe de tremplin.

Quoi qu'il en soit, en voyant ce qui se passe dans l'eau sur les vidéos précédentes, on comprend donc bien pourquoi l'inclinaison du galet dépend de la vitesse relative entre celle de son centre d'inertie, et celle avec laquelle la surface de la cavité grandit. On pourrait d'ailleurs en déduire une relation qui resterait à vérifier, entre la vitesse du galet, et son inclinaison. C'est un travail sur lequel nous sommes en train de réfléchir.

En attendant, nous avons mesuré la vitesse d'extension de la cavité en fonction du temps selon l'axe horizontale (figure 11). (La vitesse selon l'axe verticale est plus faible). On constate alors que cette vitesse est maximale au moment de l'impact et vaut environ 12 m/s. Cela signifie que si la composante horizontale de la vitesse du galet est inférieure à cette valeur, le galet ira moins vite dans les premiers instants, que la déformation de la cavité. Si bien que lorsque la vitesse d'extension de la cavité va diminuer, le galet subira la pente de la cavité et son orientation en dépendra. Tous les lancers que nous avons analysés sont dans ce cas-là. Si on veut que le galet rebondisse sans que son inclinaison ne soit modifiée par l'impact, il faut alors le lancer, d'après notre raisonnement, ait une vitesse telle que sa composante selon l'axe des abscisses soit supérieure à 12 m/s. Ce doit être le cas pour des lancers en extérieurs. En ce qui nous concerne, comme nous lançons les galets dans un récipient de taille limitée, nous le lançons avec un peu de retenue.

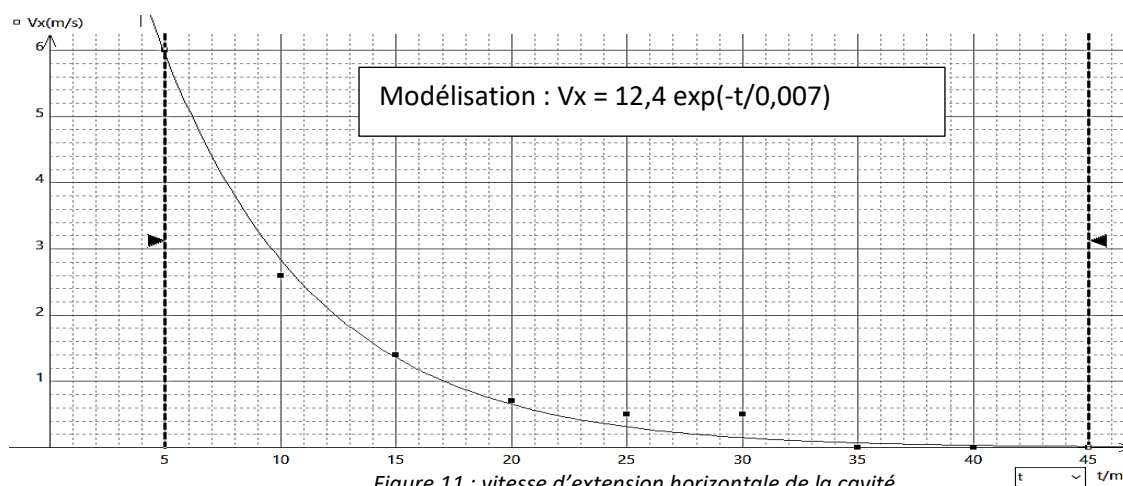


Figure 11 : vitesse d'extension horizontale de la cavité

- Revenons sur la rotation du galet sur lui-même :

Il est intéressant de voir, pour les lancers C et D, que même si l'angle d'incidence  $\theta_1$  est inférieur à 0, on arrive tout de même à faire des ricochets. Mécaniquement, au point de contact, le galet devrait basculer, ou s'enfoncer dans l'eau (figure 12)



Figure 12 : Culbute d'un galet sans rotation

S'il ne le fait pas, c'est que quelque chose le stabilise. Et en réalité, c'est la rotation du galet sur lui-même qui permet cette stabilisation, grâce à un effet gyroscopique, qui a pour tendance à maintenir constante la direction de l'axe de rotation du galet. C'est cet effet qui permet de faire du vélo sans tenir le guidon du moment que l'on va en ligne droite. Et si on veut tourner, on change la direction de l'axe de rotation de la roue dans un plan horizontal. Pour compenser cela, il faut se pencher sur le côté. Pourquoi faire cette analogie ici ? Et bien parce qu'on voit dans la figure 9 que la variation de l'inclinaison du galet avant ricochet et après ricochet peut varier dans des grandes proportions : une variation qui peut aller de 40 à 100°. De ce fait, lors de cette variation de direction, par analogie avec ce qui se passe lorsqu'on tourne à vélo, l'axe de rotation du galet doit pivoter dans un plan perpendiculaire au plan  $P_1$  d'incidence.

Et effectivement, nous mesurons souvent un léger angle  $\beta$ , qui peut être plus important lorsque la vitesse de rotation du galet sur lui-même est plus faible.

Mais peut-être que l'agitation de la surface de l'eau, elle aussi, aussi faible soit-elle, peut avoir une influence sur la direction du galet après l'impact, de même que les frottements du galet sur l'eau, puisqu'en quelque sorte, il s'appuie sur l'eau en tournant.

- Et que dire de la puissance perdue ?

Faisons un dernier commentaire sur ce tableau, qui finalement révèle beaucoup de choses. Les lancers de A à F montrent que la puissance perdue est d'autant plus forte que la vitesse du galet est importante. C'est notamment le cas des lancers E et F.

Autrement dit, alors que le galet passe, pour ces lancers, un temps de contact avec l'eau au moins 2 fois plus court que pour les autres lancers, et que la distance durant laquelle le galet reste en contact avec l'eau est également plus faible pour les lancers E et F, le galet perd plus d'énergie pour justement ces deux lancers lors du contact avec l'eau. Physiquement, cela ne peut s'expliquer que par le fait que la force exercée par l'eau sur le galet, tout le long du contact, doit être plus forte dans le cas des lancers E et F. Cette force dépend donc fortement de la vitesse du galet.

Mais cette force doit aussi dépendre de l'inclinaison  $\alpha_1$  du galet. Intuitivement, cela se comprend, car la surface apparente du galet, c'est-à-dire sa surface projetée dans un plan perpendiculaire à la direction du galet, sera d'autant plus grande que l'angle sera proche de  $90^\circ$ . Mais ce n'est pas la seule action que l'eau va exercer sur le galet. L'eau exerce également une poussée d'Archimède, et une force de réaction puisque sans cette dernière, il est impossible d'expliquer pourquoi le galet décollerait de l'eau. Par similitude avec celle exercée sur une aile d'avion cette force est appelée la « portance », alors que la force exercée par l'eau et qui s'oppose au mouvement du galet est appelée « trainée ». Il est alors clair que la façon dont se passera le ricochet dépendra de la force de trainée et de portance, qui dépendent de l'inclinaison du galet et de sa direction incidente sur l'eau et également de sa vitesse. Nous avons alors voulu en savoir plus à ce sujet.

### III – Comment la portance et la trainée peuvent-elles modifier la trajectoire du galet ?

#### 1 ) Quelques questions :

Nous avons envie de savoir beaucoup de choses à propos de la force  $\vec{F}$  exercée par l'eau sur le galet. Il est peu probable que nous disposions de suffisamment de temps pour tout faire avant le 4 décembre.

Commençons par représenter les composantes de cette force dans un repère  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  : figure 13

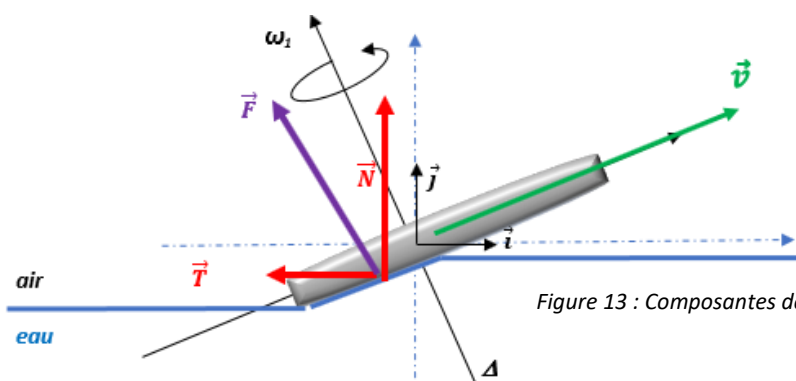


Figure 13 : Composantes de la force  $\vec{F}$  exercée par l'eau sur le galet

Attention :  $\vec{T}$  et  $\vec{N}$  ne sont pas les trainée et portance de  $\vec{F}$ , mais elles vont nous permettre d'accéder à  $\vec{T}'$  et  $\vec{N}'$ , respectivement trainée et portance de  $\vec{F}$

La première chose que l'on peut dire, c'est que le contact du galet sur l'eau n'étant pas instantané la force  $F$  va dépendre des vitesses avec lesquelles nous travaillons. Ces forces varient durant tout le moment où le galet est en contact avec l'eau. On pourra peut-être malgré tout déduire une force moyenne de trainée et de la portance, en faisant un bilan de quantité de mouvement avant et après l'impact.



Nous essayerons de déduire de nos études la façon dont la force de traînée dépend de la vitesse du galet.  
Enfin, comme un ricochet est un rebond sur l'eau, nous souhaiterions mieux comprendre l'origine de ce rebond, qui ne peut s'expliquer que par la force de portance.

## 2 ) Evaluation de la traînée et de portance par la quantité de mouvement :

Pour les lancers dont le contact est bref, tel que le lancer F, même si le contact n'est pas ponctuel, nous allons tenter d'avoir un ordre de grandeur des forces de traînée et de portance.

Reprenons alors la chronophotographie du lancer F, de sorte d'avoir les directions des vecteurs vitesse du galet avant et après ricochet (figure 14). Les points verts sont issus du pointage avec le logiciel Latis pro. Les vitesses  $v_1=10,2$  m/s et  $v_2=7,8$  m/s sont prélevées du tableau figure 9.

Comme la masse du galet reste constante au moment du contact, les vecteurs quantité de mouvement  $\vec{p}_1$  et  $\vec{p}_2$  auront des tailles dans la même proportion que ceux des vecteurs  $\vec{v}_1$  et  $\vec{v}_2$ .

$\vec{p}_1 = m \vec{v}_1$  et  $\vec{p}_2 = m \vec{v}_2$ . Compte tenu que  $m = 0,05$  kg,  $v_1=10,2$  m/s et  $v_2=7,8$  m/s, avec une échelle de 1cm pour représenter une quantité de mouvement de 0,1 kg.m/s, on représentera  $p_1$  par un vecteur de dimension 5,1 cm, et  $p_2$  par un vecteur de dimension 3,6 cm (voir figure 14).

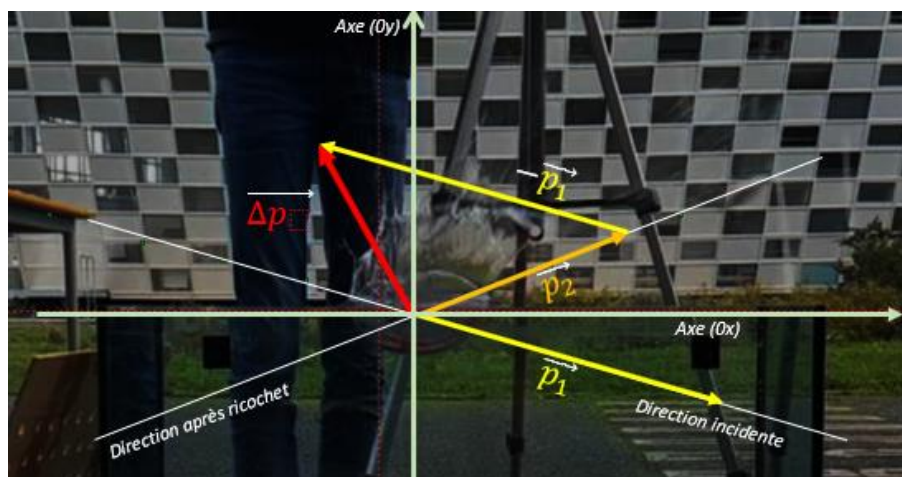


Figure 14 : calcul de la traînée et de la portance par un bilan de quantité de mouvement

On construit alors graphiquement le vecteur variation quantité de mouvement, et on en déduit les valeurs de ses composantes selon l'axe (Ox) :  $\Delta p_x = -0,151$  kg.m/s et  $\Delta p_y = 0,272$  kg.m/s.

Or la deuxième loi de Newton appliquée au galet, dans le référentiel terrestre supposé galiléen permet d'écrire que la somme des forces extérieures est égale à la dérivée du vecteur quantité de mouvement. Or dans les forces extérieures, il y a la force de pesanteur  $\vec{P}$ , la composante  $\vec{T}$  et la composante  $\vec{N}$ .

Donc,

$$\vec{P} + \vec{N} + \vec{T} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Soit dans notre cas,

$$\vec{P} + \vec{N} + \vec{T} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Ainsi, en projetant l'équation précédente sur les axes (Ox) et (Oy), on obtient :  
sur (Ox) :

$$0 - T = \frac{\Delta p_x}{\Delta t}$$

Sur (Oy) :

$$-P + N = \frac{\Delta p_y}{\Delta t}$$

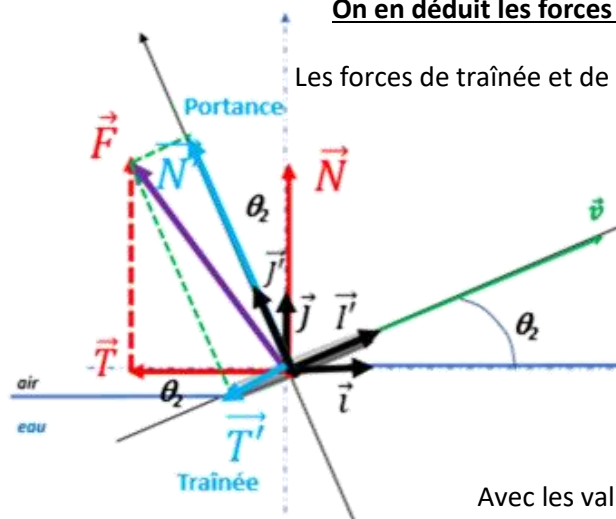
Sachant que le galet est en contact avec l'eau durant 0,015 s, on en déduit la composante T :

$$T = \frac{-\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{0,151}{0,015} = 10N$$

La composante N sera égale à :

$$N = P + \frac{\Delta p_y}{\Delta t} = 0,05 \times 9,81 + \frac{0,272}{0,015} = 18,6N$$

### On en déduit les forces de traînée et de portance : figure 14 bis



Les forces de traînée et de portance sont les composantes de la force  $\vec{F}$  dans la base  $(\vec{i}', \vec{j}')$ .

$$\vec{F} = -T\vec{i} + N\vec{j} = -T'\vec{i}' + N'\vec{j}'$$

$$\vec{F} = -T(\cos\theta_2\vec{i}' - \sin\theta_2\vec{j}') + N(\sin\theta_2\vec{i}' + \cos\theta_2\vec{j}')$$

$$\vec{F} = (-T\cos\theta_2 + N\sin\theta_2)\vec{i}' + (T\sin\theta_2 + N\cos\theta_2)\vec{j}'$$

$$N' = T\sin\theta_2 + N\cos\theta_2$$

$$T' = T\cos\theta_2 - N\sin\theta_2$$

Avec les valeurs de T et N trouvées précédemment, cela donne, pour le lancer F :

$$T' = 2,5 \text{ N et } N' = 21 \text{ N}$$

Figure 14 bis – Passage de N et T à N' et T'

### 3 ) Vérification de la valeur de la force de traînée.

Nous avons voulu mesurer la force de traînée et de portance pour différentes vitesses d'écoulement, et différents angles du galet. Pour cela, nous avons imaginé l'expérience suivante : figure 15

Le principe est le suivant : A l'extrémité de la tige bleue peut pivoter une autre petite tige noire, au bout de laquelle est fixée le galet (en gris). Cela permet de modifier l'axe du galet par rapport à l'axe de la tige bleue. La tige bleue peut pivoter autour de la tige grise. Le galet se trouve à la surface de l'eau contenue dans une gouttière. Lorsque l'on ouvre le robinet, l'eau s'écoule d'une extrémité de la gouttière, à l'extrémité opposée, légèrement plus basse que celle du côté du robinet. Cela a pour conséquence de faire pivoter la tige bleue à cause de la traînée exercée sur le galet. Grâce à un dynamomètre, on ramène alors la tige dans sa position verticale. Dans le même temps, la force de portance est mesurée par les balances sur lesquelles reposent les 2 tasseaux de bois (en marron). Ainsi, pour un débit donné et pour un angle donné, on peut en même temps mesurer la force de traînée ainsi que la force de portance.

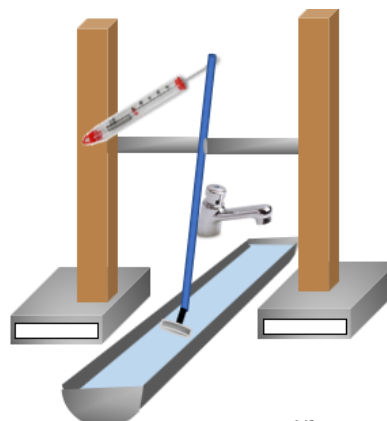


Figure 15 : dispositif pour mesurer la traînée et la portance

Mais cette expérience n'a rien donné. Le débit de l'eau n'était visiblement pas assez fort pour que la force de traînée soit mesurable avec nos appareils de mesure. Nous avons alors procédé autrement pour mesurer uniquement la force de traînée : figure 16

Une masse accrochée au fil à gauche tracte un bras au bout duquel est positionné le galet que l'on peut toujours incliner. Ainsi, grâce à ce dispositif, en accrochant une masse différente, cela permet d'obtenir des vitesses différentes du galet dans l'eau.

Comme la valeur de la traînée dépend de la vitesse, il y aura un moment où la force de traction exercée par le fil sur le bras sera compensée par la force de traînée. Le mouvement du galet sera alors rectiligne uniforme, et en vertu de la première loi de Newton, la force de pesanteur exercée sur la masse  $m$  sera égale à la force de traînée.

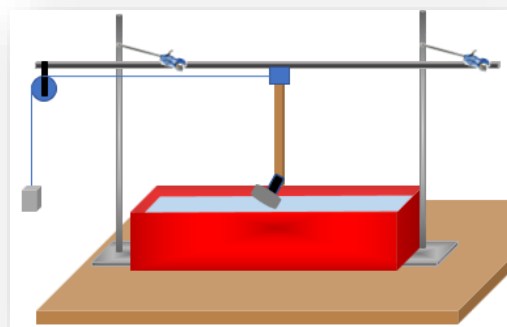


Figure 16 : Dispositif permettant la mesure de la portance

Nous pensions dans un premier temps faire ces mesures pour différentes inclinaisons du galet, mais finalement, comme lors d'un ricochet idéal, le galet doit glisser à plat sur la surface de l'eau qui s'est inclinée par rapport à l'horizontale (figure 2 page 5) lors de l'impact, nous nous sommes contentés de mesurer cette force de portance pour une inclinaison nulle.

La longueur du trajet parcouru sur le rail n'étant pas assez longue, il a fallu donner une vitesse initiale au galet de sorte d'atteindre le régime permanent plus rapidement. Nous avons filmé les expériences pour mesurer la vitesse du galet.

Comme dans certains documents, nous avons pu lire que les modèles les plus courants pour les forces de frottement fluide sont des modèles où la force est proportionnelle à la vitesse, ou proportionnelle à la vitesse au carré, ou encore proportionnelle à la vitesse puissance 1,4, nous avons alors tracé  $F$  en fonction de  $v$ , de  $v^2$ , et de  $v^{1,4}$  (figure 17)

$F \text{ (N)}$	$v \text{ (m/s)}$	$v^2 \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$	$v^{1,4}$
0	0	0	0
0,01	0,57	0,32	0,46
0,02	0,75	0,56	0,67
0,03	0,95	0,90	0,93
0,04	1,1	1,21	1,14
0,05	1,32	1,74	1,48
0,06	1,4	1,96	1,60

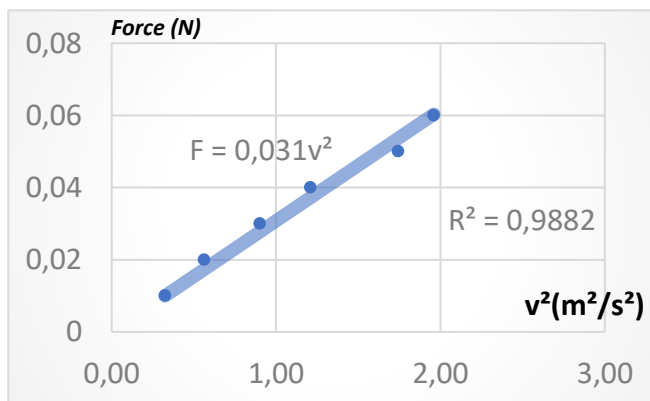
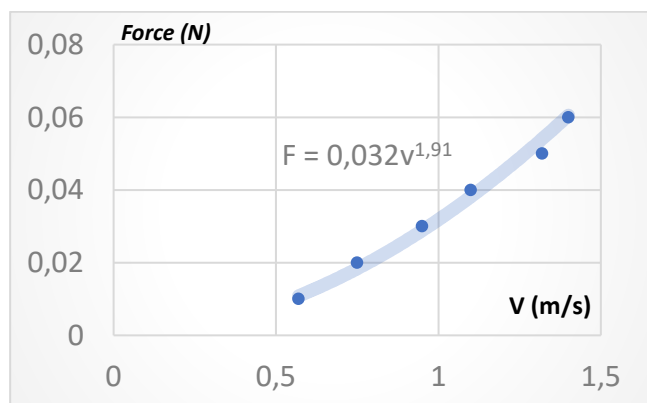
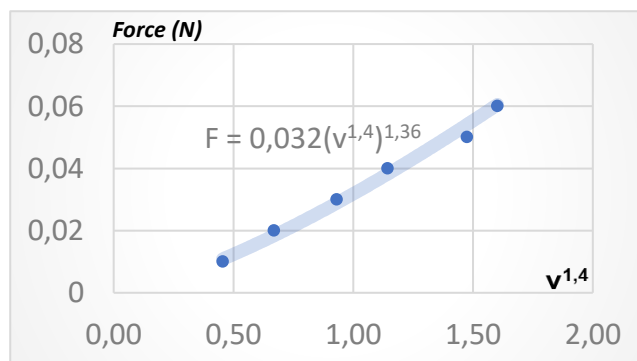


Figure 17 : Choix d'un modèle pour la force de traînée

Les résultats montrent alors sans équivoque que le modèle le plus adapté est celui pour lequel la force de traînée est proportionnelle à  $v^2$ .



Nous avons voulu utiliser la relation trouvée pour évaluer la force de traînée exercée par l'eau lors du ricochet dans le cas du lancer F. Nous pourrions ainsi comparer la valeur obtenue à celle trouvée T' dans le paragraphe III – 2 ) de la page 13. Nous venons de voir que

$$F = 0,031 \times v^2$$

Ainsi, si on prend une vitesse moyenne de 9 m/s pour le galet dans la vidéo F lorsque le galet est en contact avec l'eau, la force de traînée devrait alors être égale à

$$F = 0,031 \times v^2 = 2,5 \text{ N}$$

On est donc bien dans des mêmes ordres de grandeur par rapport à la force de traînée calculée en utilisant la quantité de mouvement puisqu'on retrouve la valeur précédemment obtenue de la force de traînée T' (page 13). Cela dit, en réalité, alors que dans l'expérience que nous venons de réaliser, toute la surface du dessous du galet est en contact avec l'eau, cela peut ne pas être le cas lors du ricochet. Or la force de traînée, qui est une force de contact dépend forcément de la surface de contact. Nous nous contenterons alors de dire que l'ordre de grandeur mesuré pour T' est bon.

## 4 - La portance

De même que nous avons tenté d'en savoir davantage sur la force de traînée dans le paragraphe précédent, et de voir en particulier sa dépendance en fonction de la vitesse, nous avons voulu faire une étude similaire pour étudier la force de portance.

### a – Première méthode :

Nous avons réalisé ce dispositif expérimental (voir ci-contre), au cours duquel une masse accrochée à un fil permet de tirer le galet initialement disposé dans l'eau. L'eau s'opposant au déplacement du galet exerce alors une force de portance F sur la face du dessus du galet. En disposant des masses de valeurs différentes, le galet peut ainsi atteindre différentes valeurs de vitesses limites. Les mesures obtenues nous ont alors permis de voir que comme la force de traînée, la force de portance F est proportionnelle à la vitesse au carré.

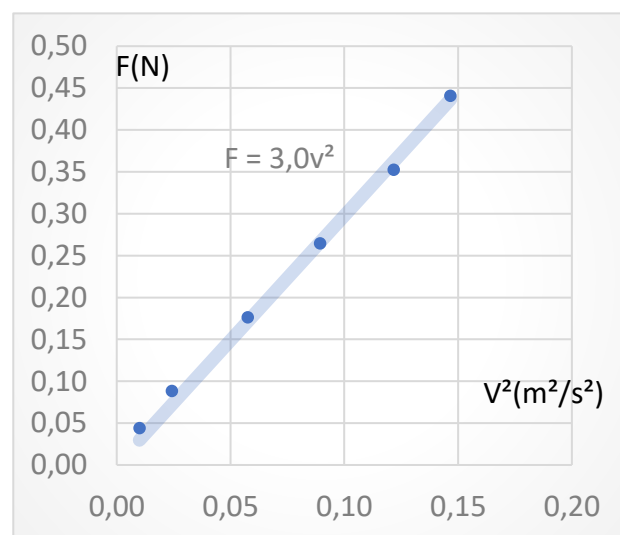
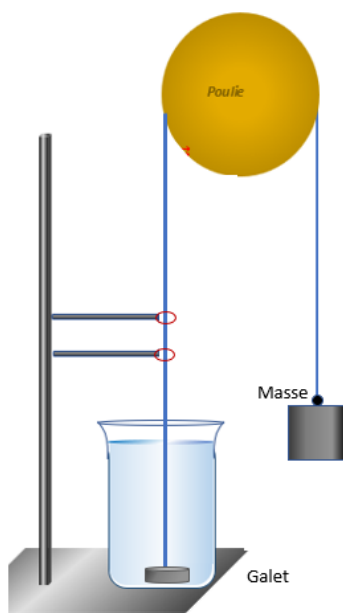


Figure 17 bis – Portance en fonction de  $v^2$

Avec la relation trouvée (figure 17 bis), à savoir  $F = 3,0 v^2$ , Quelle force de portance trouverait-on pour le lancer « F » ?

Pour répondre à la question, il faut d'abord évaluer la vitesse incidente du galet dans la direction de la portance : Le galet percute l'eau avec un vecteur vitesse  $\vec{v}_1$ , comme le montre le schéma figure 18 : Ainsi, la valeur de la vitesse v avec laquelle nous avons fait nos mesures de portance correspond à la valeur de la composante  $v_{1y}$  de la composante du vecteur initial  $\vec{v}_1$  du lancer.

$$v_{1y} = v_1 \sin(\alpha_1 + \theta_1) = 5 \text{ m/s} .$$

Ainsi, pour le lancer F, on obtient  $F = 75 \text{ N}$

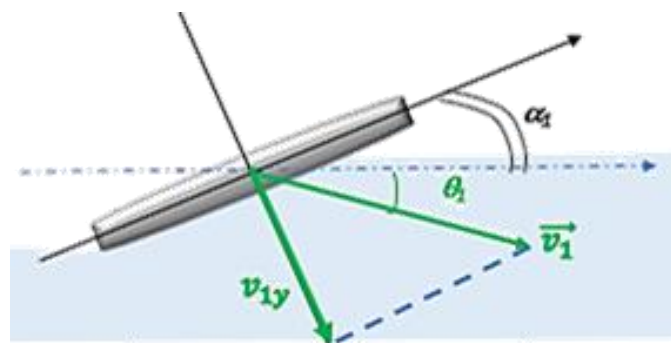


Figure 18 : Evaluation de la composante de la vitesse selon la direction de la portance

Mais en réalité, après réflexion, cette expérience ne permet pas uniquement de mesurer la force de portance, car une force de traînée s'exerce aussi sur la face du dessous du galet. Il nous faut donc trouver une autre méthode pour étudier la force de portance. Donc, même si nous pensons que dans l'expérience que nous venons de réaliser, la force de portance domine par rapport à la force de traînée, nous avons voulu améliorer notre étude de la portance.

## b – Deuxième méthode : figure 19

Nous avons tenté de mesurer la variation de l'accélération subie par le galet au moment de son impact sur l'eau. Pour cela, nous avons réalisé le dispositif suivant, dans lequel nous mesurons l'accélération du galet, par le biais d'un smartphone de masse  $m'$ . Pour forcer le galet à tomber dans l'eau, nous accrochons une masse  $m$  supplémentaire en haut de la tige rigide. Le galet et la tige rigide ont quant à eux une masse  $M$ . Ainsi, tant que le galet ne touche pas l'eau, il subit une accélération constante (qui dépendra entre autres de la valeur de la masse  $m$ ), puisqu'il est soumis à un ensemble de forces constantes. C'est bien ce que l'on observe par ailleurs sur la courbe montrant l'évolution de l'accélération sur le smartphone (figure 20). Puis, dès qu'il touche l'eau, son accélération diminue, et la différence de la composante verticale de l'accélération  $\Delta a_y$  au moment de l'impact est alors reliée à la force de portance  $N$  par la relation :

$$F = |\Delta a_y|(M + m + m')$$

Pour trouver cette relation, il suffit d'appliquer

- la deuxième loi de Newton au système 1 composé de la {tige, du galet et de la masse  $m$ }, avant que le galet ne touche l'eau :  
En ajoutant une force  $\vec{f}$  de frottement lorsque du fait que la tige coulisse entre les 2 anneaux qui sont juste là pour guider la tige, on a :

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{f} = (M + m)\vec{a}$$

Projeté sur un axe vertical (Oy) dirigé vers le haut, cela donne :

$$-(M + m)g + T + f = (M + m)a_y \quad (1)$$

- Deuxième loi de Newton sur le système 2 composé du téléphone, avant l'impact :  $\vec{P}' + \vec{T}' = m'\vec{a}'$   
qui donne sur l'axe (Oy) :

$$-m'g + T' = m'a'_y \quad (2)$$

Or  $\vec{T} = -\vec{T}'$  et  $a'_y = -a_y$

Les équations (1) et (2) donnent alors :  $-(m + M)g + m'g + f = (M + m + m')a_y \quad (3)$

Au moment du contact avec l'eau, une force de portance  $\vec{F}$  s'ajoute sur le galet, dirigée vers le haut. On appelle maintenant l'accélération au moment du contact :  $\vec{a}_c$ .

Un raisonnement similaire au précédent conduit alors à :  $-(m + M)g + m'g + f + F = (M + m + m')a_{cy} \quad (4)$

Ainsi, si on fait l'opération (4) – (3), on obtient bien

$$F = |\Delta a_y|(M + m + m')$$

Quant à la vitesse au moment de l'impact, nous avons pu la déterminer connaissant la hauteur  $H$  (voir figure) de la chute du galet, et l'accélération du galet  $a_y$  :

En effet, par intégration de la composante de l'accélération, on obtient la composante de la vitesse :

$$v_y(t) = a_y \times t$$

Puis par intégration de la vitesse, on obtient la position  $y(t)$  du galet au cours du temps :

$$y(t) = \frac{1}{2}a_y t^2 + H$$

en prenant l'origine de l'axe (Oy) au niveau de la surface de l'eau. Comme par ailleurs  $t = \frac{v_y}{a_y}$

On obtient :

$$y = \frac{1}{2}a_y \left(\frac{v_y}{a_y}\right)^2 + H$$

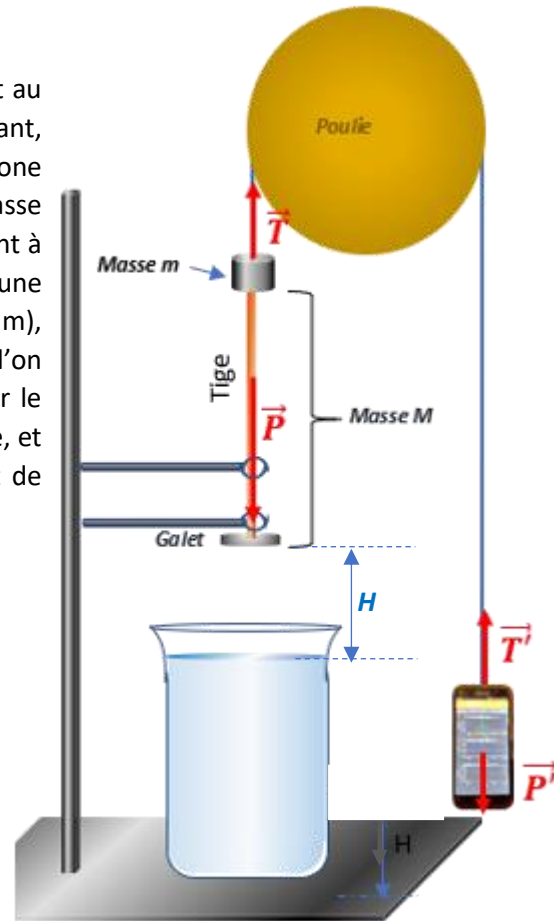
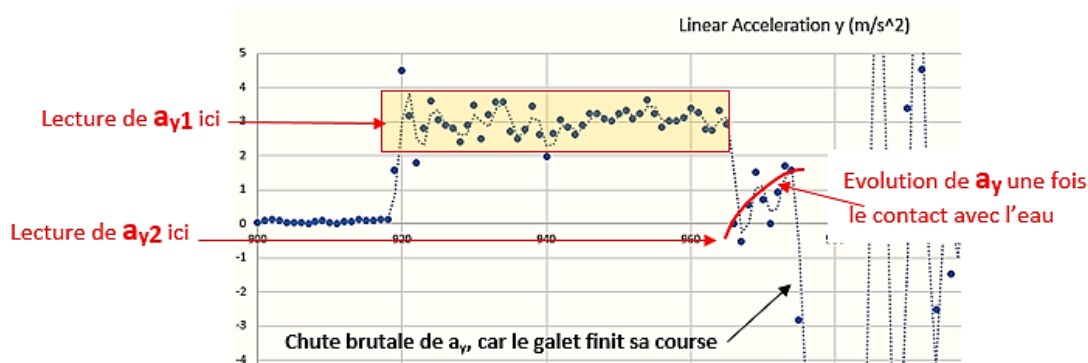


Figure 19 : dispositif permettant la mesure de la force de portance sur le galet

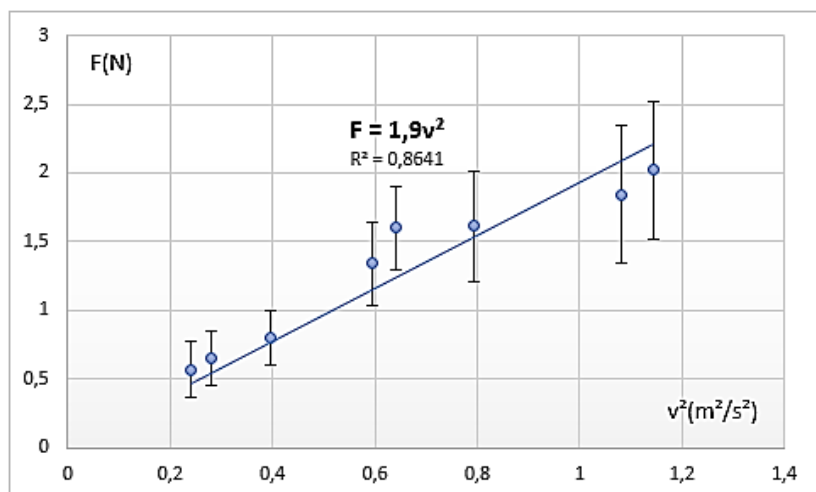
Ainsi, lorsque le galet touche l'eau, comme  $y = 0$ , cela donne :

$$v_y = \sqrt{-2ha_y}$$

Les mesures manquaient de précision car la mesure de l'accélération au moment de l'impact était délicate, surtout pour les grandes valeurs de vitesse. On peut le voir sur un exemple de mesure, figure 20. La vidéo de l'expérience est visible en suivant le lien : <https://youtu.be/CiL8T6bW9f4>



Nous avons alors réalisé 5 chutes pour chaque masse  $m$  accrochée à la tige, pour pouvoir ensuite faire des moyennes et minimiser ainsi les incertitudes de mesures. Cela qui nous a permis de tracer le graphique figure 19 bis ci-dessous :



Mais même en minimisant les incertitudes de mesures, il est difficile d'affirmer une dépendance de la portance en  $v^2$ , comme tend pourtant à le montrer l'expérience précédente. Cela dit, nous avons tout de même voulu exploiter les résultats obtenus ici pour déterminer la force de portance pour le lancer  $F$ . Ainsi, si on suppose que la relation obtenue est effectivement  $F = 1,9.v^2$ , sachant que le lancer  $F$  a une composante perpendiculaire à la surface du galet égale à 5 m/s, nous obtenons une valeur de  $F = 1,9.5^2 = 48$  N.

Figure 19 bis : Evolution de la force de portance en fonction de  $v^2$ , obtenue en faisant chuter le galet dans l'eau avec différentes de vitesses

Cela dit, nous ne voulions pas rester sur cette étude qui semblait manquer de précision. Alors nous avons cherché à vérifier la dépendance de la force de portance en  $v^2$  par une troisième méthode :

### c – Troisième méthode :

Dans cette troisième méthode, nous avons versé de l'eau sur la surface du galet retenu par des ressorts. La section du filet d'eau déversé sur le galet est égale à la surface de la face du galet, de sorte que celle-ci soit percutée sur toute sa surface. L'eau est contenue dans un bidon situé au-dessus du galet et s'écoule avec une vitesse qui diminue au cours de la vidange du bidon. La force exercée par l'eau sur le galet diminuera alors durant cette vidange, et il sera possible de mesurer alors la force subie par le galet en fonction de la vitesse à laquelle l'eau percute le galet. Pour déterminer la vitesse de l'eau, nous avons utilisé les lois de l'hydrodynamique, et pour déterminer la force subie par le galet, nous avons préalablement étalonné le dispositif en disposant différentes masses sur le galet qui repose lui-même sur une rondelle en bois fixée à l'extrémité de 4 ressorts.

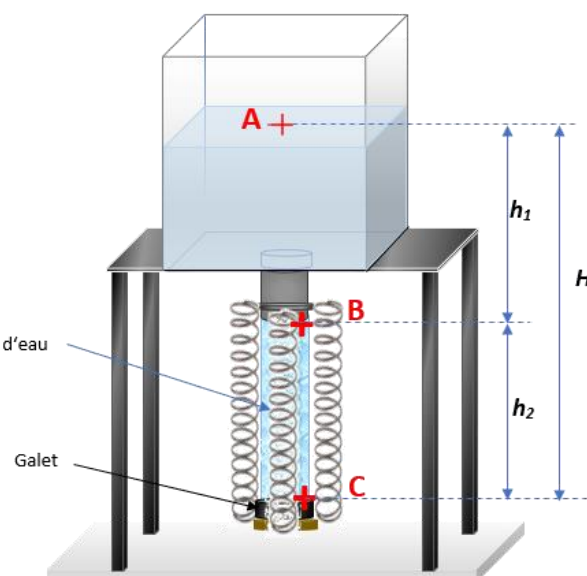


Figure 21 : Mesure de la force de portance en faisant couler un jet d'eau sur le galet 17

En appliquant la loi de Bernoulli entre les points A et B d'une part, du fait que la pression en ces points est égale à la pression atmosphérique, on obtient la relation :

$$v_B^2 = v_A^2 + 2gh_1$$

Or, d'après la conservation du débit volumique Q :

$$Q = v_A S = v_B s$$

Donc

$$v_B^2 = v_A^2 \left(\frac{s}{S}\right)^2 + 2gh_1 \Leftrightarrow v_B^2 = \frac{2gh_1}{1 - \left(\frac{s}{S}\right)^2}$$

Puis, en appliquant à nouveau la loi de Bernoulli entre les points B et C d'autre part, sachant là encore que la pression en ces points est égale à la pression atmosphérique :

$$v_B^2 = v_C^2 - 2gh_2$$

D'où

$$\frac{2gh_1}{1 - \left(\frac{s}{S}\right)^2} = v_C^2 - 2gh_2 \Leftrightarrow v_C = \sqrt{2g \left( \frac{h_1}{1 - \left(\frac{s}{S}\right)^2} + h_2 \right)}$$

En filmant alors l'expérience, nous pouvons noter la hauteur du niveau de l'eau  $h_1$  dans le bidon, ainsi que la position  $h_2$  du galet, et en déduire alors la vitesse de l'eau. Connaissant  $h_2$ , nous avons pu, après avoir étalonné le dispositif, mesurer la force de portance subie par le galet au cours de la vidange du bidon. La courbe d'étalonnage est montrée figure 22. Les vidéos de l'expérience sont visibles en suivant ce lien : <https://youtu.be/PCxPlyCNBU8>

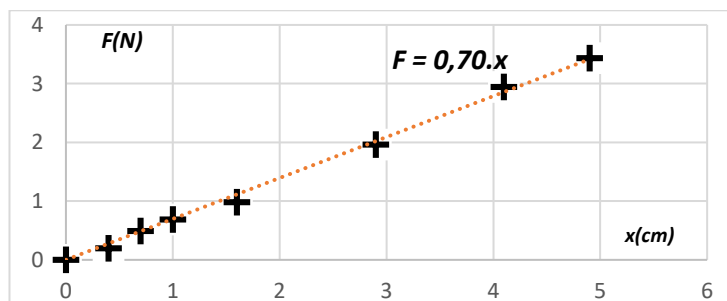


Figure 22 : courbe d'étalonnage du dispositif

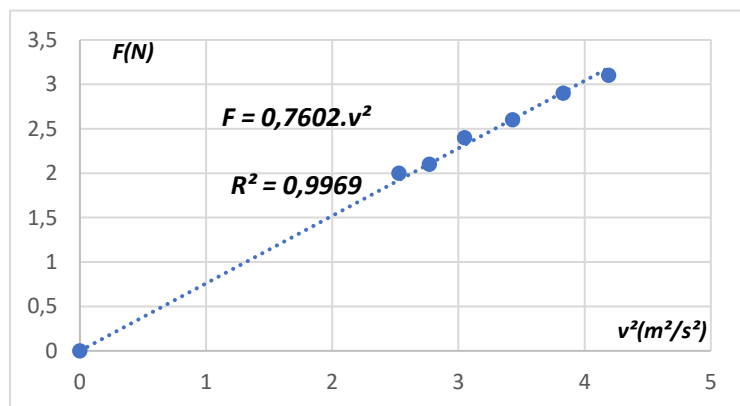


Figure 22 bis : La force de portance est bien proportionnelle à  $v^2$

Nous avons pu exploiter la vidéo entre la première et la deuxième seconde de l'écoulement. En effet, avant la première seconde, le galet se bloque à une certaine hauteur. Par ailleurs, à la fin de l'écoulement, le jet d'eau n'est plus assez cylindrique, ce qui change certaines conditions expérimentales.

Cela dit nous avons obtenus suffisamment de mesures pour pouvoir confirmer (figure 22 bis), que la force de portance est bien proportionnelle à la vitesse au carré. Par ailleurs, considérant la relations de la force de portance obtenue ( $F = 0,76 \times v^2$ ), et en reprenant la vitesse  $v = 5\text{m/s}$  du lancer F, on trouve une force de portance égale à 19 N, ce qui est complètement en adéquation avec la valeur trouvée en utilisant la variation de la quantité de mouvement.

Nous venons de refaire les mesures de la force de portance avec des ressorts plus petits et avec une constante de raideur plus grande pour éviter que le galet ne se coince et nous trouvons à nouveau une dépendance de la force de portance proportionnelle à  $v^2$ .

**Le fait de savoir que la force de traînée et de portance sont proportionnelles à la vitesse au carré va nous permettre maintenant de déterminer la vitesse minimale que doit avoir le galet pour faire un ricochet :**

## IV - A quelle condition sur la vitesse initiale le galet peut-il rebondir ?

Reprenons le schéma dans lequel on voit le galet subir les forces de portance et de traînée

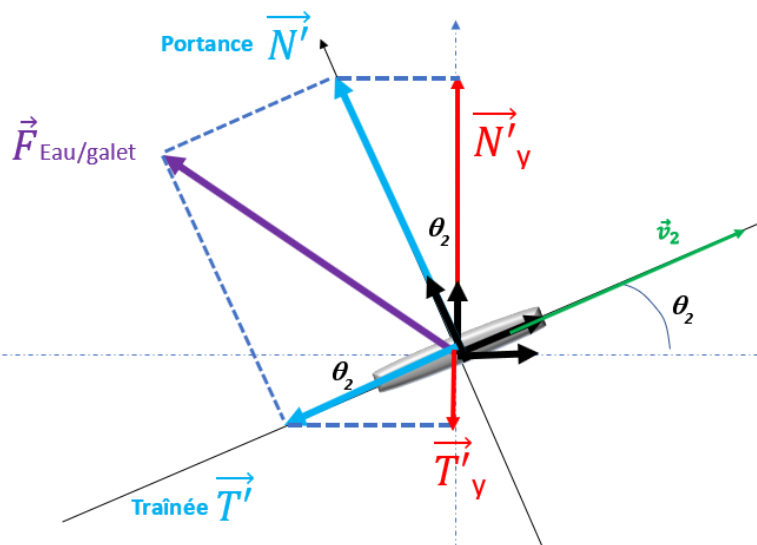


Figure 23 : Bilan des forces selon la direction verticale pour trouver la condition de rebond

Selon la direction verticale, on peut voir sur le schéma (figure 23) que la force qui va permettre au galet d'être soulevé résultera de la composante de la force de portance selon l'axe vertical, alors que la composante de la force de traînée selon l'axe vertical sera responsable de l'énergie que le galet perdra lors du rebond.

Ainsi, il ne pourra y avoir rebond du galet que si,  $P$  étant la force de pesanteur (et la poussée d'Archimède étant négligeable) :

$$N' \cos \theta_2 > T' \sin \theta_2 + P$$

En se fiant alors aux résultats que nous avons trouvés précédemment, à savoir que la force de traînée et de portance sont deux forces proportionnelles à la vitesse au carré,

$$kv_{y1}^2 \cos \theta_2 > k'v^2 \sin \theta_2 + P$$

Soit, compte tenu de l'expression de  $v_{y1}$ ,

$$kv^2 (\sin(\theta_1 + \alpha_2))^2 \cos \theta_2 > k'v^2 \sin \theta_2 + P$$

$$v > \sqrt{\frac{mg}{-k' \sin \theta_2 + k(\sin(\theta_1 + \alpha_2))^2 \cos \theta_2}}$$

Pour le lancer F, les calculs montrent alors qu'avec les angles avec lesquels on a travaillé, la vitesse minimale qu'il fallait pour que le ricochet ait lieu était :

$$v > 0,9 \text{ m/s}$$

Il s'agit donc d'une condition parmi d'autres, pour des angles donnés. Nous voulons retrouver cette valeur expérimentalement, à l'aide d'un dispositif qui nous permettrait de contrôler les paramètres de lancer, que ce soit vitesse ou les angles. Or jusqu'à présent, on tentait de lancer des galets avec des conditions différentes, et c'était seulement lors de l'analyse qu'on pouvait effectivement voir si on avait bien changé les conditions initiales. Si on veut aller plus loin dans ce projet, il faut être capable de tout contrôler lors du lancer. Alors nous l'avons fait...

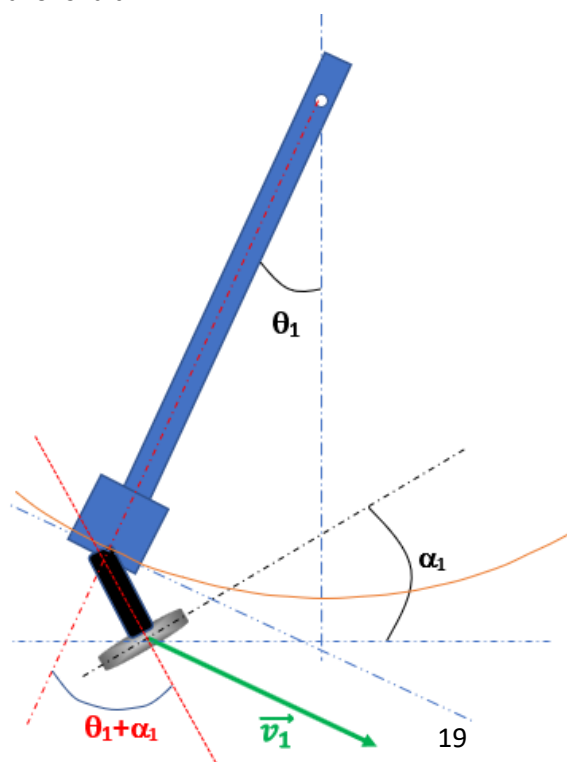
## V – Notre machine à ricochet

### Le principe :

L'idée est d'accrocher le galet au bout d'un pendule, d'écarter le pendule de sa position d'équilibre, de le lâcher, et de faire alors en sorte que le pendule libère le galet au cours de la descente, pour un angle du pendule déterminé. Cela fixe alors la direction du centre d'inertie du galet. A l'extrémité du pendule, on doit mettre un pivot, qui permet de faire varier l'inclinaison du galet. La hauteur à laquelle on lâche le pendule permet de contrôler la vitesse.

Voilà alors à quoi schématiquement ressemble notre machine : figure 24

Figure 24 Schéma du bras articulé permettant de lancer le galet avec une inclinaison  $\alpha_1$  et une orientation  $\theta_1$ .





Et le voici en photo : figure 19

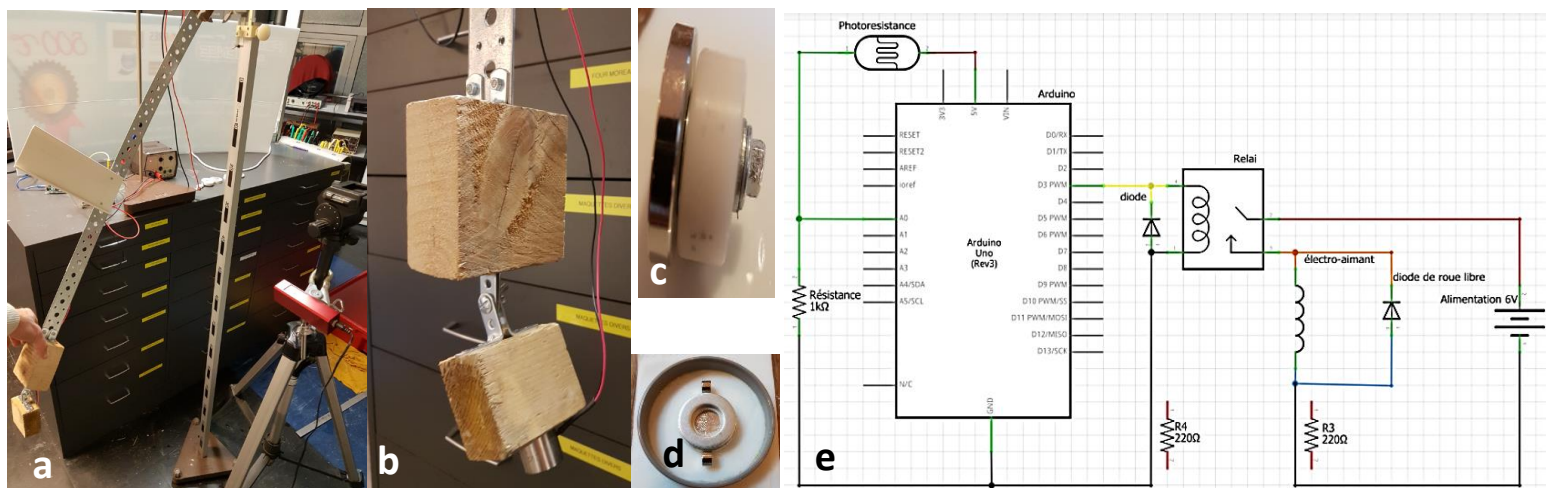


Figure 25 : a - machine à ricochet – b - module permettant de choisir l’inclinaison du galet – c - Roulement à bille surmonté de la rondelle métallique qui sera celée dans le galet - d – 2 aimants néodyme pour assurer la rotation du galet avec un champ magnétique tournant – e - Circuit électrique contrôlant le déclenchement

Pour déclencher le lâcher, on a fixé un électroaimant sur la partie pivotante au bout du pendule. Il est alimenté par un générateur, piloté par un relais, lui-même contrôlé par un circuit monté avec une carte Arduino. Le circuit comporte une photorésistance éclairée par un faisceau laser. Dès que celui-ci est obturé par le passage du pendule, cela ouvre le relais et libère le galet.

Comme le galet doit tourner et doit s’accrocher à l’électroaimant, nous avons fait un galet en résine, dans lequel au centre, nous avons mis un roulement à bille que nous avons surmonté d’une rondelle métallique afin que le galet puisse tenir sur l’électroaimant.

Enfin, pour faire tourner le galet, nous avons voulu pouvoir lui donner une grande vitesse, plus grande que celle donnée à la main. Pour cela, nous avons incorporé 2 aimants néodyme dans la résine, et nous avons utilisé un agitateur magnétique de chimie, qui produit un champ magnétique tournant, pour faire tourner le galet plus ou moins rapidement.

Ainsi, grâce à ce dispositif, on peut contrôler les paramètres de lancers indépendamment les uns des autres, ce qui était impossible à faire à la main. Nous venons à peine de finir la réalisation de cette machine à ricochet, et il est clair que nous allons pouvoir refaire un ensemble de mesures très intéressantes à exploiter pour poursuivre notre projet. **Tous les détails (circuit Arduino – programme) sont dans le fichier Annexe**

Voici en avant-première le premier lancer réalisé : <https://youtu.be/aM5kTS39PRI>

## Conclusion :

Au cours de ce projet, nous ne pensions pas pouvoir mener une étude aussi détaillée à partir de simples lancers réalisés à la main. Nous avons beaucoup appris sur la physique des ricochets, en particulier sur les forces de traînée et de portance qui interviennent, et que nous avons tenté d’analyser au moyen de plusieurs expériences. Le fait de pouvoir ainsi entrer dans les détails pour étudier l’influences des différents paramètres est vraiment passionnant. Nous avons apporté des réponses à nos questionnements, et nous savons laissé, au fil de ce mémoire, un ensemble de questions auxquelles nous souhaitons encore répondre. Et ce sera d’autant plus possible qu’à partir de maintenant, nous disposons d’un outil qui va nous aider dans nos investigations.