



OLYMPIADES
DE PHYSIQUE FRANCE

Histoire à rebondissements



LPI

Lycee Pilote Innovant International



Lucas BLAQUIERE
Lou—Ann GUIGNARD
Corentin COUASNON
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 rebond ?

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 – 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 commen   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 red  colle 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 entre 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 ω_1 du galet sur lui-même, autour de l'axe de rotation par rapport auquel on le fait tourner,
- L'angle α_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 : θ_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 β (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

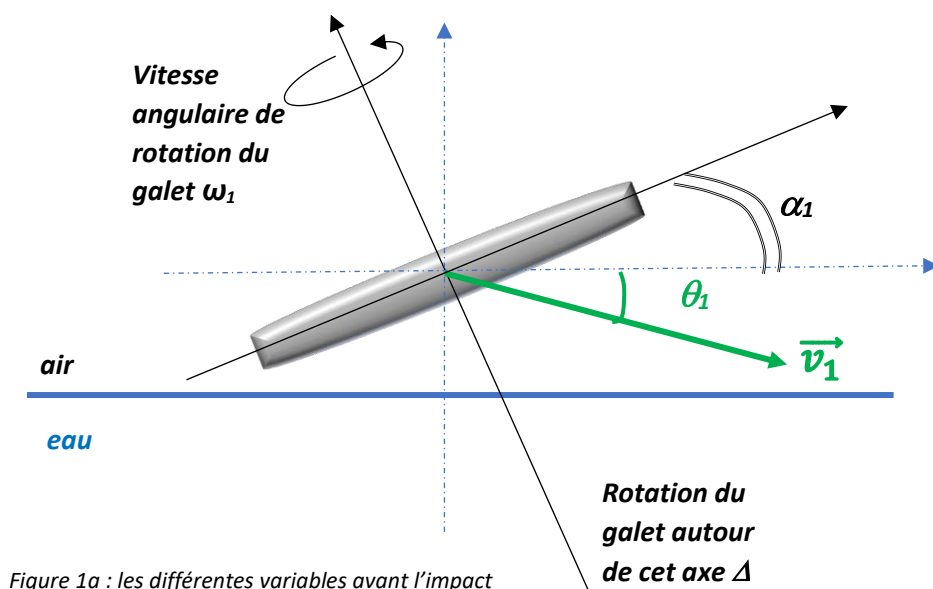


Figure 1a : les différentes variables avant l'impact

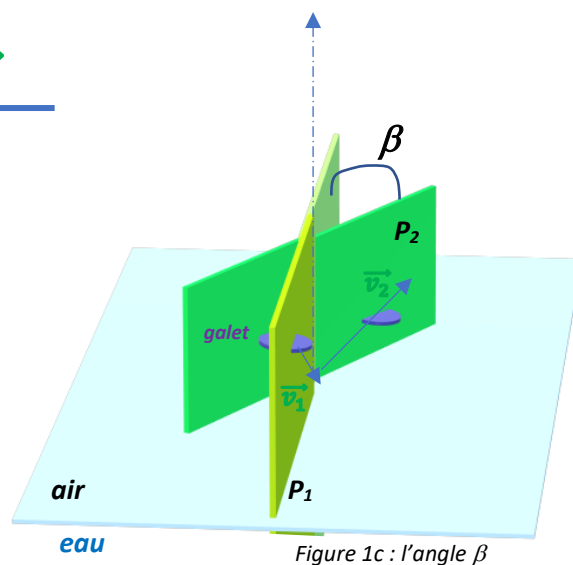


Figure 1c : l'angle β

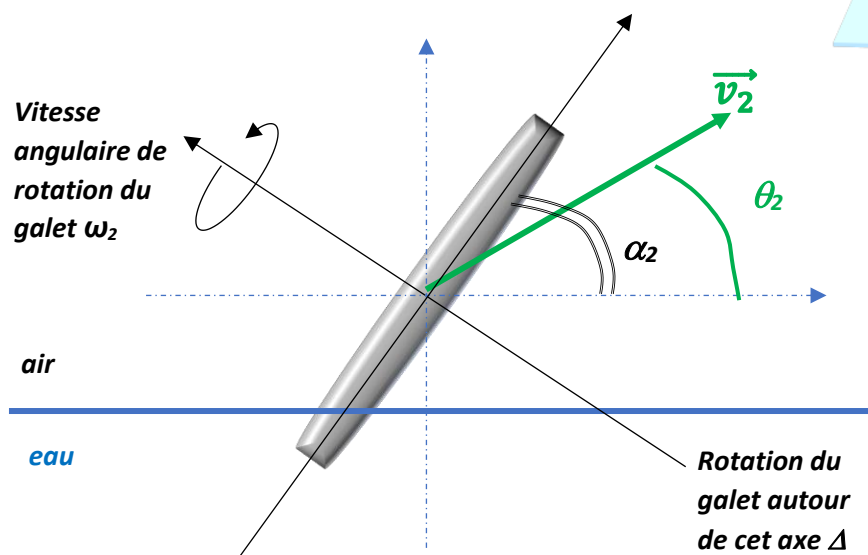


Figure 1b : les différentes variables après l'impact

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 pourrons également faire des bilans d'énergie. Par contre, il sera plus délicat à l'aide de simple vidéo 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 trainée
- Une force qui tend à soulever le galet, d'où son nom « portance »

Ces forces sont représentées sur le schéma suivant : figure 2

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

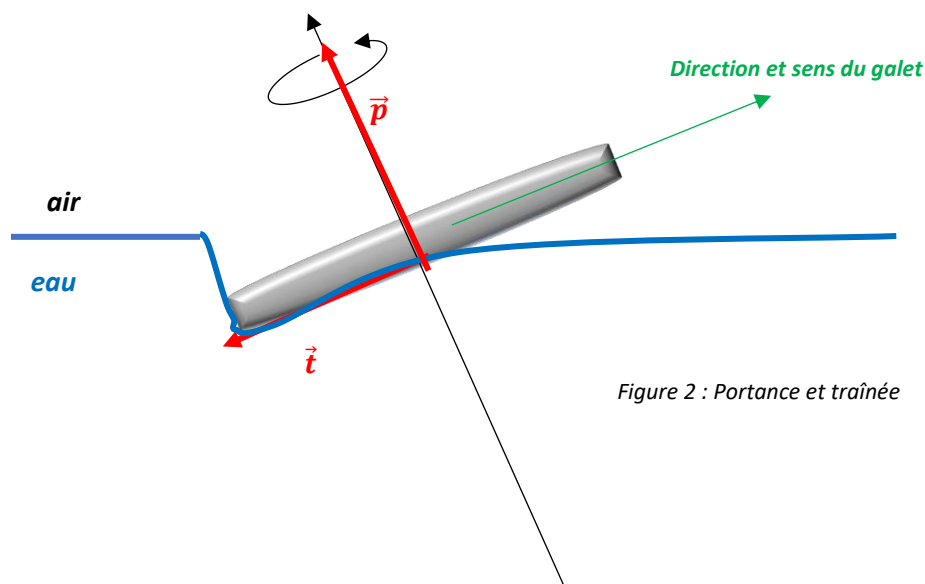


Figure 2 : Portance et trainée

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

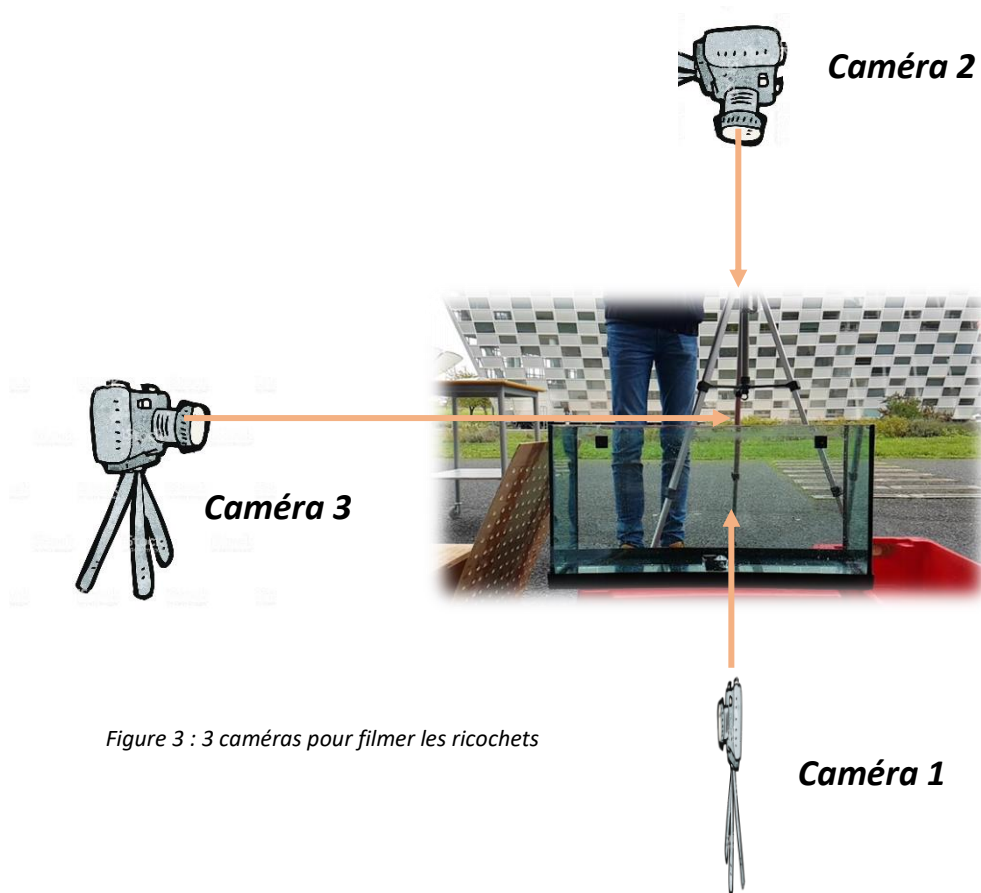


Figure 3 : 3 caméras pour filmer les ricochets

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 α_1 et θ_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.

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, 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 :

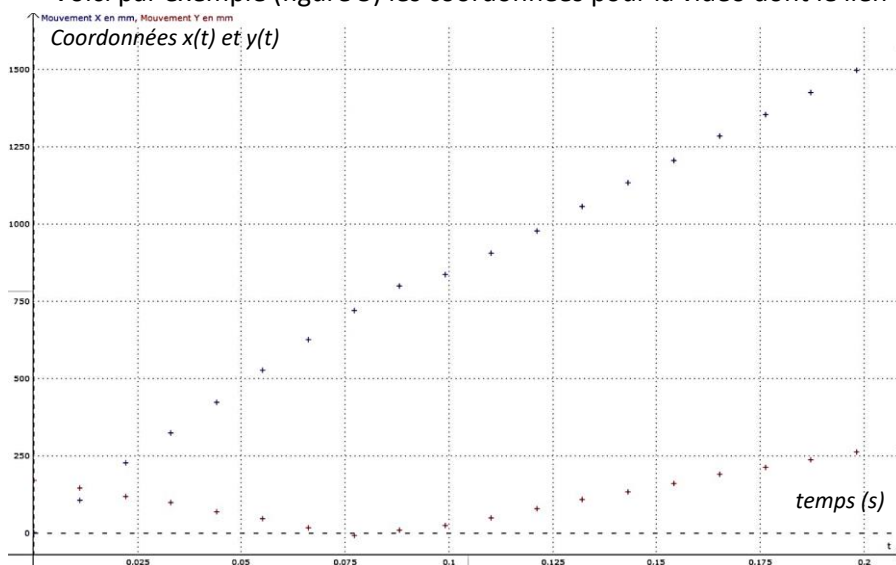


Figure 5 : coordonnées x et y du galet avant et après ricochet

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.

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.

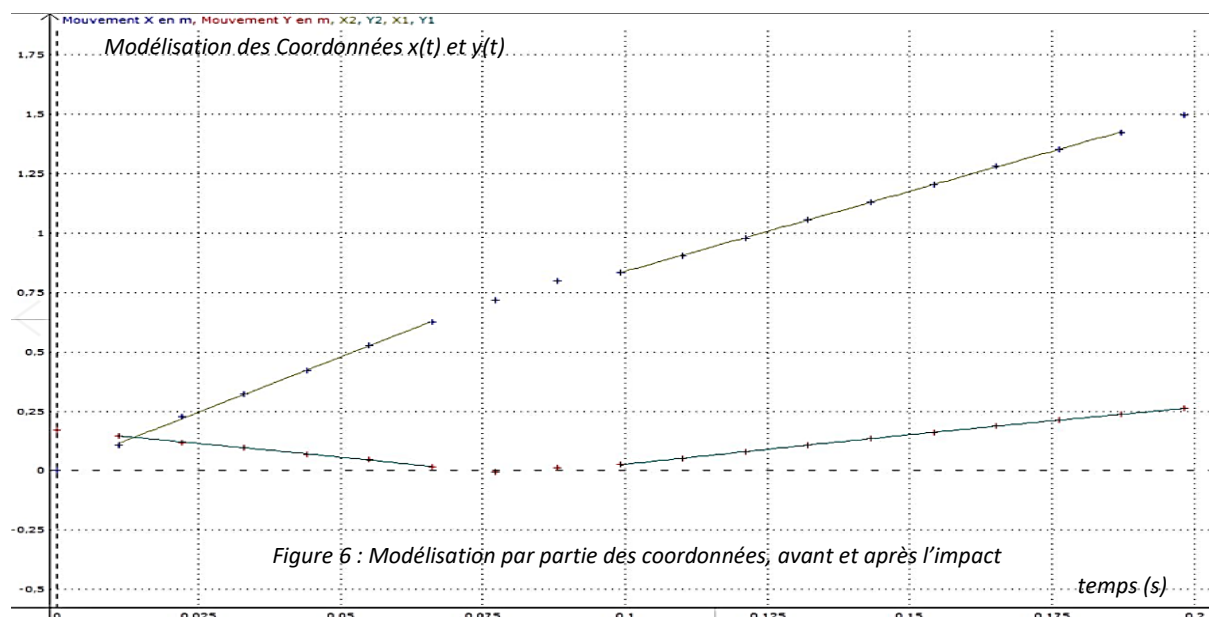
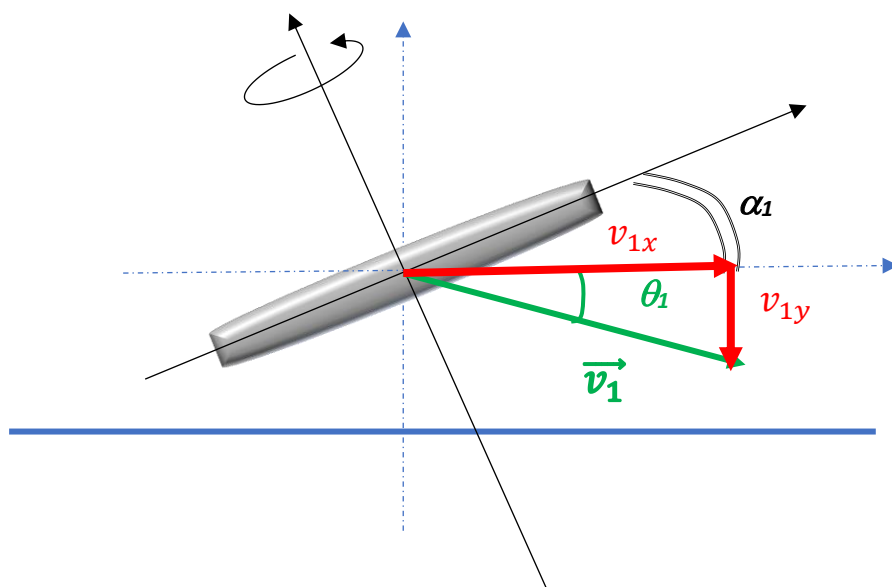


Figure 6 : Modélisation par partie des coordonnées, avant et après l'impact

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 β de 30° . 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° d'un plan perpendiculaire à l'axe optique de la caméra 1. Pour minimiser les erreurs dues à un éventuel angle β , nous avons, quand cela s'avérait nécessaire, privilégié les points expérimentaux proches de l'impact pour calculer les modèles.



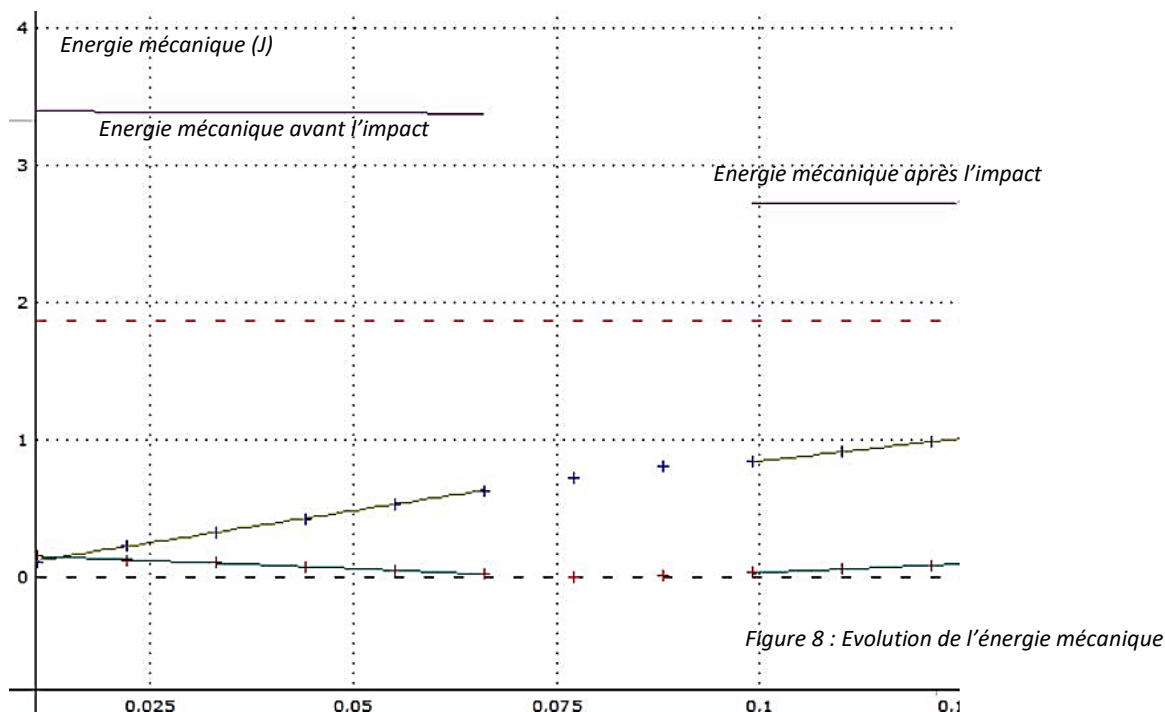
Connaissant alors $X(t)$ et $Y(t)$, nous avons pu calculer les vitesses avant et après impact. Dans l'exemple traité ici, $v_1 = 9,7 \text{ m/s}$ et $v_2 = 7,2 \text{ m/s}$. Les composantes des vitesses avant et après impact, selon les axes horizontal et vertical nous ont permis de déterminer l'angle 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 2,34 J juste avant l'impact du galet sur l'eau, à 1,32 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. 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 : $J_\Delta = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ J}$

Ainsi, l'énergie cinétique de rotation du galet avant ricochet vaut :

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

L'énergie mécanique totale du galet est alors égale à 2,37 J, et 1.34 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 0,03 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 :

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1,0}{0,03} = 3 \cdot 10^1 \text{ W}$$

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	θ_1 (°)	29,3	19,1	35	38,4	28,3	13,8
Angle de départ après ricochet	θ_2 (°)	29,7	26,5	9,1	27	29,3	21,4
Inclinaison galet avant ricochet	α_1 (°)	0	35	-10*	-25*	0	15
Inclinaison galet après ricochet	α_2 (°)	50	45	90	90	40	25
Rotation galet avant ricochet	ω_1 (°)	70	63	55	?	63	63
Rotation galet après ricochet	ω_2 (°)	57	42	?	?	63	45
Durée de l'impact	ΔE (J)	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	ΔE (J)	-0,99	-1,00	?	?	-2,00	-1,16
$\Delta E/ E_{m1}$	$\Delta E/ E_{m1}$	-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 ω

On peut dire que de façon générale, si le but est de faire un grand nombre de ricochet, ce n'est pas la vitesse de rotation ω 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 α 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 ricochet que l'on pourra faire avec un seul galet, car l'énergie de rotation diminue très faiblement par rapport à l'énergie cinétique du galet au moment de l'impact. (Concernant les deux dernières lignes du tableau, nous avons alors calculé les valeurs correspondantes sans alors prendre en compte les énergies de rotation, faute d'avoir pu mesurer les vitesses de rotation dans les vidéos 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, puisque l'on voit que pour les lancers C et D,

- Commentaire sur l'inclinaison du galet α

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 α_2 dépend exactement de la vitesse du galet lorsqu'il est en contact avec l'eau, comparé à la vitesse de l'extension du cratère creusé dans l'eau. 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*

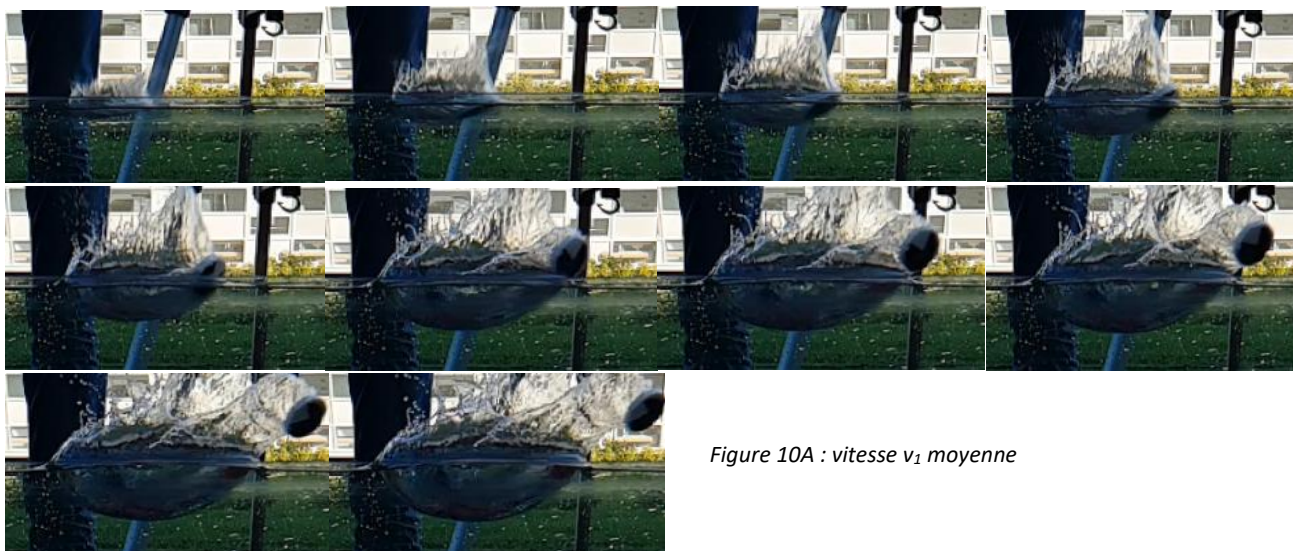


Figure 10A : vitesse v_1 moyenne

D :

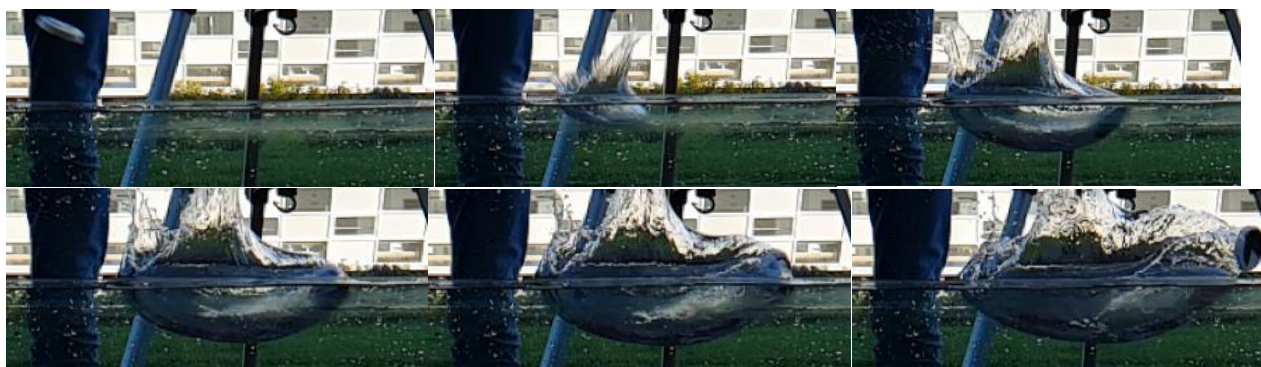


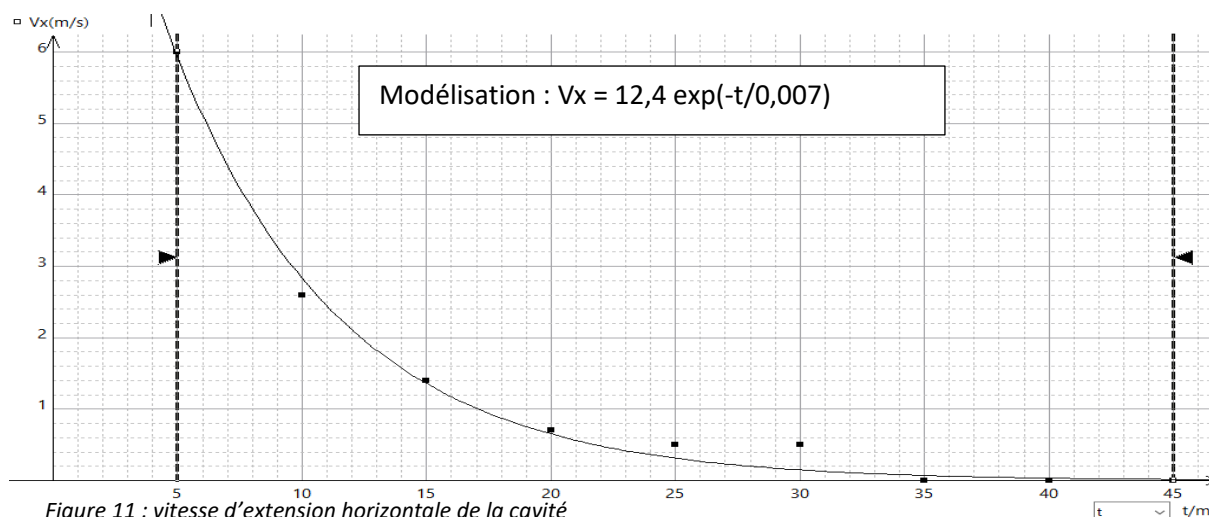
Figure 10D: vitesse v_1 faible

On peut voir dans ces trois exemples, choisis du fait que la vitesse initiale du galet est différente pour chacune d'entre-elles, que dans tous les cas, l'inclinaison du galet est liée 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 α_2 après ricochet n'est pas égale à l'angle θ_2 . Le cratère ne va donc pas jusqu'à jouer un rôle 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.



- 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 θ_1 est inférieur à 0, on arrive tout de même à faire des ricochets. Mécaniquement, au point de contact, le galet devrait basculer, on s'enfoncer dans l'eau (figure 12)

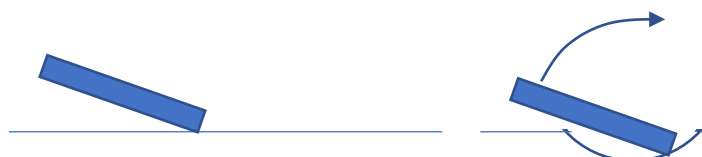


Figure 12 : Culbute d'un galet sans rotation

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 s'est dit que l'axe de rotation du galet avant ricocher et après ricocher change de direction dans des grandes proportions : une variation qui peut aller de 40 à 100° selon nos lancers présentés dans le tableau. De ce fait, lors de cette variation de direction, 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 β , 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 θ_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°. 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 cela, 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 ces deux forces qui appellent à un grand nombre de questions de notre part. Il est peu probable que nous disposions de suffisamment de temps pour tout faire avant le 4 décembre.

Commençons par représenter les forces de trainée et de portance sur un schéma. Cette représentation sera valable à un instant donné puisque le contact avec l'eau n'est pas instantané.

Imaginons alors la situation suivante : figure 13

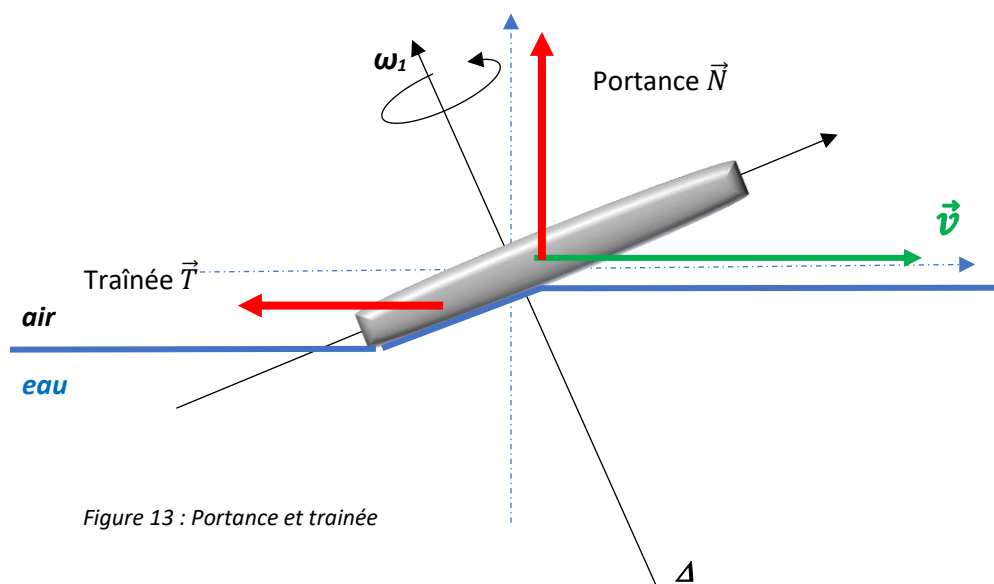


Figure 13 : Portance et traînée

La première chose que l'on peut dire, c'est que comme la force de traînée dépend de la vitesse, et que le contact du galet sur l'eau n'est pas instantané aux vitesses v_1 avec lesquelles nous avons travaillé jusqu'à présent, on ne peut pas déduire de nos expériences précédentes une force de traînée et une force de portance unique. Ces forces varient durant tout le moment où le galet est en contact avec l'eau. On pourrait peut-être au moins déduire une force moyenne de traînée et de la portance, en faisant un bilan de quantité de mouvement avant et après l'impact.

Mais puisque nous savons que le galet glisse sur l'eau le temps de son contact lors de nos expériences, nous aimerions aussi savoir comment la force de traînée dépend de la vitesse.

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 $v_1=10,2$ et $v_2=7,8$ 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).

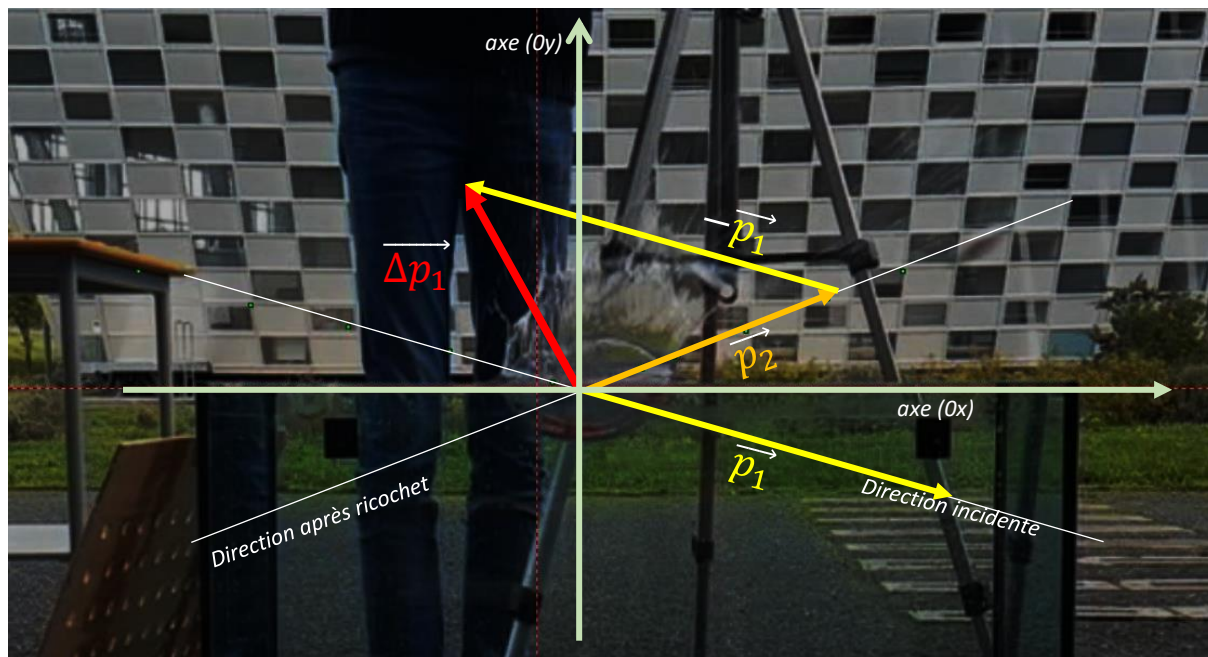


Figure 14 : calcul de la trainée et de la portance par un bilan de quantité de mouvement

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 force de trainée \vec{T} et la force de portance \vec{N} . Donc,

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

Soit dans notre cas,

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

Avant de poursuivre, nous allons faire l'hypothèse que, pour une vitesse initiale v_1 rapide du galet comme cela est le cas pour le lancer F, le galet a un mouvement horizontal sur l'eau. Avec cette hypothèse, la portance aura alors une direction verticale, et la trainée une direction horizontale.

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 :

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

La portance sera égale à :

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

3) Vérification de la valeur de la force de trainée.

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

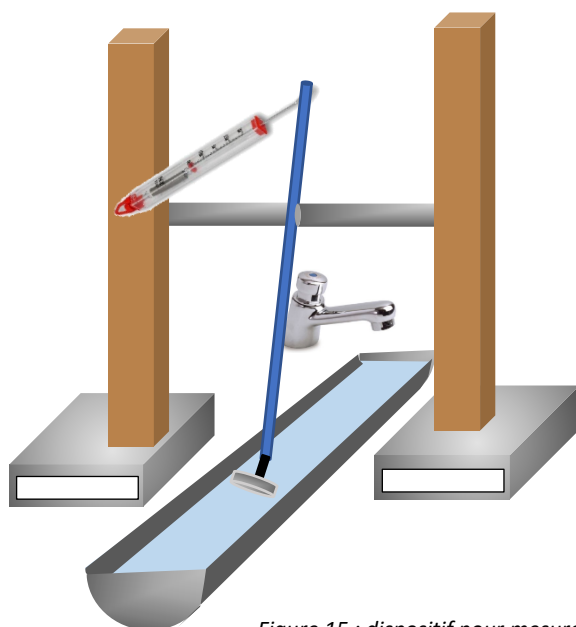


Figure 15 : dispositif pour mesurer la trainée et la portance

Le principe est le suivant :

A l'extrémité de la tige bleue est fixé le galet, dans lequel on a mis une tige (en noir) afin de pouvoir modifier l'axe du galet par rapport à 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 dans la gouttière dont l'extrémité opposée est légèrement plus basse que celle du côté du robinet. Cela a pour conséquence de faire pivoter la tige bleue à cause de la trainée 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 trainée ainsi que la force de portance.

Mais cette expérience n'a rien donné. Le débit de l'eau n'était visiblement pas assez fort pour que la force de trainée soit mesurable avec nos appareils de mesure.

Nous avons alors procédé autrement pour mesurer uniquement la force de trainée : figure 16

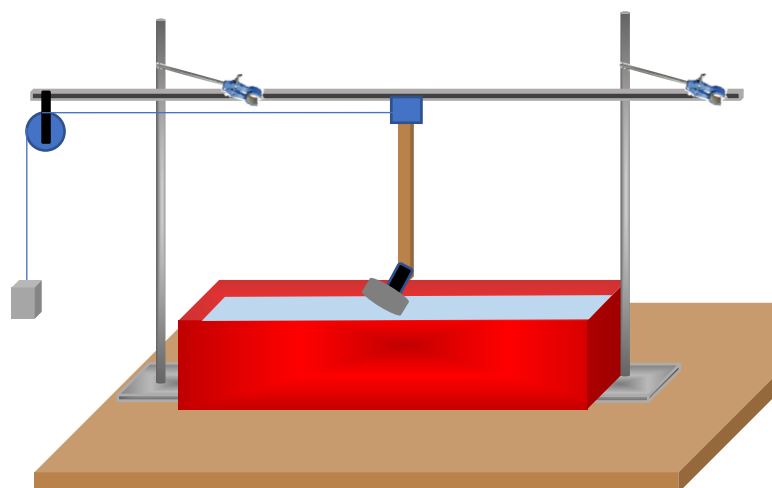


Figure 16 : Dispositif permettant la mesure de la portance

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 les forces de traction exercée par le fil sur le bras seront compensées par la force de trainée. 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.

Nous avons procédé aux mesures pour une inclinaison nulle du galet, 10° , 20° , 30° , et 40° . Pour chacune de ces inclinaisons, nous avons accroché une masse de 10g, 20g, 30g et 40g au bout du fil.

Nous avons exploité les vidéos avec Latispro. Pour le moment, nous n'avons pu analyser que les vidéos obtenues pour une inclinaison de 40° . En effet, pour les autres angles, la traînée n'était pas suffisamment forte en fin de course du galet dans l'eau pour atteindre le régime permanent de la vitesse du galet. Nous referons les mesures pour les autres angles dans une gouttière de plusieurs mètres, et on changera le rail coulissant pour l'adapter à cette longueur. Voyons ce que donnent les mesures obtenues pour l'inclinaison de 40° : nous n'avons que 4 valeurs, car pour des masses supérieures, on n'atteignait plus le régime permanent. On présente donc ici un résultat intermédiaire que l'on prendra le temps de compléter avec d'autres mesures.

F	v	v^2
0,01	0,49	0,24
0,02	0,70	0,49
0,03	0,84	0,70
0,04	0,97	0,94

Dans certains documents, nous avons pu lire que les modèles les plus courant 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)

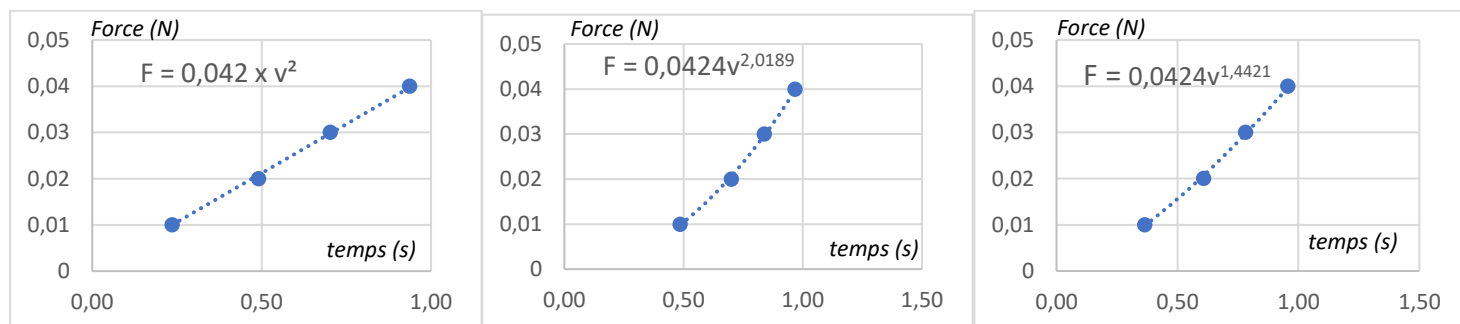


Figure 17 : Choix d'un modèle pour la force de traînée

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 .

Cela dit, cela nous a surpris, car en lisant des informations à propos de la force de frottement fluide, nous avons vu que le nombre de Reynolds permettait de prévoir à quel moment l'écoulement est laminaire ou turbulent, et ainsi de prévoir si la force de frottement sera plutôt proportionnelle à la vitesse ou à la vitesse au carré.

Ici, dans cette expérience, le galet a une vitesse d'environ 1 m/s. La longueur caractéristique du disque est 5 cm.

Avec ces valeurs, le nombre de Reynolds vaut :

$$Re = \frac{\rho V S}{\mu} = \frac{1000 \times 1 \times 0,05}{0,07} = 714$$

Or il est dit dans les ouvrages, qu'avec une telle valeur, l'écoulement est plutôt laminaire, et la force de frottement fluide est alors plus probablement proportionnelle à la vitesse. Nous devons réfléchir et porter un regard critique sur nos résultats.

Cela dit, si la force de traînée est bien proportionnelle à la vitesse au carré, ce qui doit être le cas pour les ricochets puisque les vitesses sont au moins 5 fois plus grandes, en suivant la relation $F = 0,042 \times v^2$, nous pouvons essayer d'utiliser ce résultat pour voir si la valeur que nous avons obtenue de la traînée dans le paragraphe précédent est dans un bon ordre de grandeur. Le galet étant le même, car fabriqué avec le même moule, les résultats ont pourtant peu de chance d'être identiques car l'inclinaison du galet dans la vidéo F n'est non seulement pas égale à 40° , mais en plus elle n'est probablement même pas constante. Mais nous voulons juste faire une vérification d'ordre de grandeur.

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

$$F = 0,042 \times v^2 = 3,4 \text{ N}$$

On est donc bien dans des mêmes ordres de grandeur par rapport à la force de traînée calculée en utilisant la quantité de mouvement.

4) La portance

Nous n'allons pas présenter d'expérience dans ce paragraphe, mais juste une réflexion que nous essayerons de poursuivre de façon quantitative en rentrant de Bordeaux.

Lorsque le galet frappe l'eau, la force de portance est responsable de son rebond, un peu comme une balle rebondissante, de par son côté élastique, rebondit en frappant le sol. A ceci près que dans le cas du ricochet, l'élément élastique n'est pas le galet, mais plutôt l'eau. En fait, on pourrait, si on ne considère que la force de portance, représenter l'eau par un ressort vertical, dont l'extrémité libre serait située vers le haut, et sur laquelle la masse viendrait rebondir (figure 18).

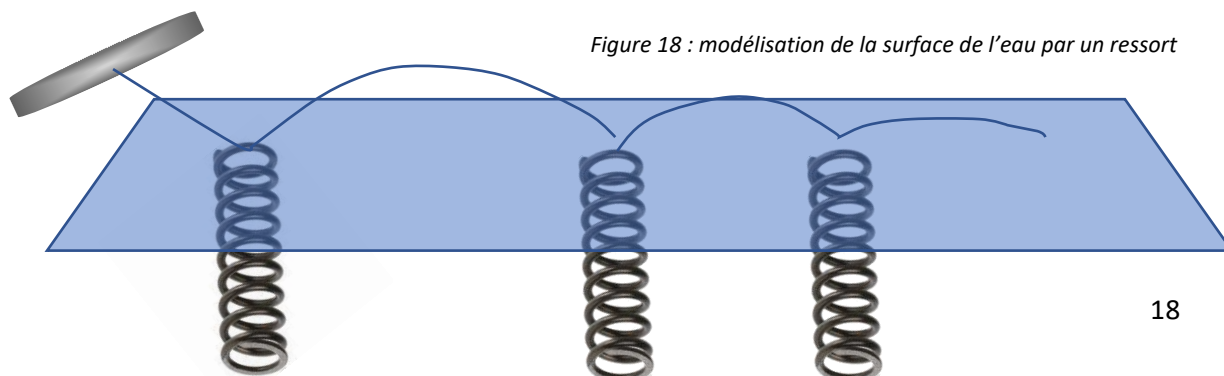


Figure 18 : modélisation de la surface de l'eau par un ressort

On sait que le ricochet amène le galet à une hauteur qui sera plus faible après chaque rebond successif. Or, selon la direction verticale, seules la force de pesanteur et la force de portance agissent. Il doit aussi y avoir la poussée d'Archimède sur la partie immergée du galet. Puisque le galet perd de la hauteur après chaque rebond, on peut en conclure que la force de portance n'est pas conservative, et il pourrait alors être intéressant d'évaluer le caractère non conservatif de la force de portance, et de trouver un modèle qui la décrive de façon satisfaisante.

Une autre remarque concernant cette force de portance : Si on modélise alors l'eau par un ressort, on peut vite comprendre qu'un lancer avec un faible angle θ_1 ne va pas conduire à un nombre important de rebonds. L'idéal pour un ressort, ce serait que le galet tombe à la verticale. Sauf qu'on sait très bien que dans ce cas-là, il ne rebondira pas. Il doit y avoir un angle limite pour lequel le côté élastique de l'eau n'arrive plus à assurer le rebond du galet. Nous essayerons là aussi de trouver cet angle limite.

Et justement, si on veut faire ce genre de recherche expérimentalement, cela nécessite de contrôler les paramètres de lancer, que ce soit vitesse ou angles. Et 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...

IV – 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 :

Et le voici en photo : figure 19

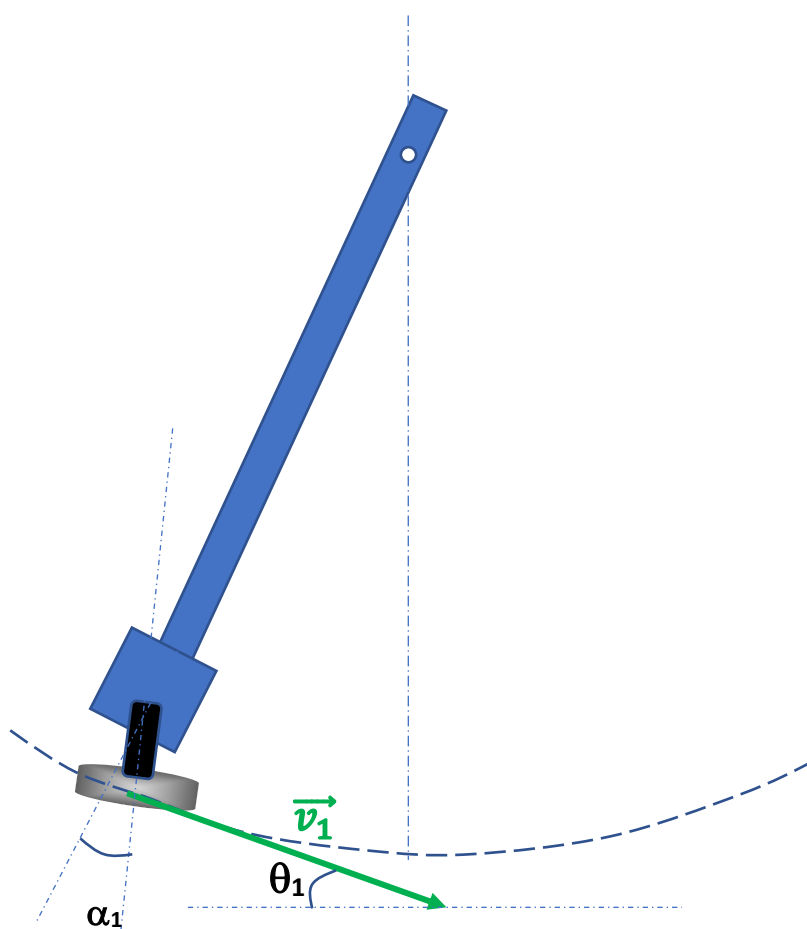


Figure 19 : bras de la machine à ricochet



Figure 20 : machine à ricochet – module permettant de choisir l’inclinaison du galet – Circuit électrique contrôlant le déclenchement – galet avec roulement et aimant

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 relai 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 ricocher, 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>

V – 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. 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.