

LICENCE SCIENCE DE LA MATIÈRE
École Normale Supérieure de Lyon
Université Claude Bernard Lyon I



Stage 2019
FARES Nicolas
L3 Physique

Tennis de table : physique du rebond

Résumé : Il est question de comparer expérimentalement les rebonds d'une balle sur différentes raquettes de tennis de table. Ceci en faisant varier la vitesse et la rotation initiale de la balle. La balle arrive sur la surface de la raquette avec une incidence (quasi) normale. La rotation est telle que le vecteur rotation associé est dans la direction du mouvement. Les vitesses de balle sont comprises entre 2 et 10 m/s pour la translation et entre 0 et 35 tours/s pour la rotation. Expérimentalement, le but principal est d'obtenir les variations de coefficient de restitution (en vitesse et en rotation) en fonction de la vitesse incidente. On observe de manière générale la décroissance des coefficients de restitution lorsque la vitesse incidente augmente.

Mots clefs : Tennis de table - Rebond - Coefficient de restitution - Élasticité

Stage encadré par :

Vincent DOLIQUE

Jean-Christophe GÉMINARD

vincent.dolique@ens-lyon.fr / tél. (+33)4 26 23 39 57

jean-christophe.geminard@ens-lyon.fr / tél. (+33)4 72 72 88 65

Laboratoire de physique ENS de Lyon (UMR 5672)

46 allée d'Italie

69007, Lyon

<http://www.ens-lyon.fr/PHYSIQUE>



Fédération Française
de Tennis de Table



Table des matières

1	Introduction et description théorique	1
1.1	État de l'art	1
1.2	Objectifs initiaux propres à ce stage	3
2	Approche expérimentale	5
2.1	Dispositif expérimental	5
2.2	Objectifs initiaux : limites immédiates de ce dispositif	6
2.3	Méthode de mesure	7
2.4	Traitements des séquences d'image	8
2.5	Incertitude des mesures	8
3	Résultats	10
3.1	Restitution en vitesse de translation, sans rotation	10
3.2	Restitution en vitesse de translation, avec rotation	11
3.3	Restitution en vitesse de rotation	12
3.4	Discussion sur les cas avec rotation	13
4	Conclusion	13
5	Annexes	14
5.1	Vitesses avant et après rebond	14

1 Introduction et description théorique

Présentation générale

Les Jeux Olympiques de Paris (2024) génèrent une certaine émulation autour du sport, notamment pour les scientifiques. Cela prend forme grâce au projet *Sciences²⁰²⁴* consistant à mettre en relation des équipes olympiques avec de grandes institutions scientifiques pour, d'un côté, optimiser les performances sportives et, de l'autre, motiver quelques projets de recherches (le sport pouvant être une source d'idée).

Dans ce cadre, l'ENS de Lyon est associée, entre autres, avec la Fédération Française de Tennis de Table (FFTT) et la Fédération Française Handisport. Suite à des réunions avec Stéphane LELONG (Directeur sportif du tennis de table de la Fédération Handisport), des interrogations sont ressorties, notamment à propos des rebonds de balle de tennis de table. Le but général du projet est de cerner au mieux le comportement de différentes raquettes et de différentes balles afin d'optimiser les performances sportives, notamment pour les athlètes handisports pour lesquels le contrôle des effets est encore plus primordial. Il s'agit donc d'un sujet de recherche qui débute au laboratoire et ce stage constitue les tous premiers (petits) pas du projet.

Ce stage s'éloigne cependant des objectifs propres au tennis de table car il est question d'étudier des rebonds de balle où celle-ci a une rotation telle que son **vecteur rotation $\vec{\Omega}$ est parallèle à la vitesse \vec{v}** , effet non utilisé au tennis de table. Cela est schématisé sur la figure 1. L'étude de cette configuration pourrait peut-être se révéler intéressante dans l'appréhension du comportement de gaz granulaires en contact avec une pale (comme dans le cas du projet *Physique statistique hors-équilibre dans des systèmes dissipatifs macroscopiques* encadré par Antoine NAERT au laboratoire de physique de l'ENS de Lyon).

1.1 État de l'art

Beaucoup d'études sur les modes de déformations d'une balle de tennis de table ont été réalisées dans le cas d'une compression quasistatique. Prenons l'exemple d'une balle compressée entre 2 plaques rigides. On ne considère qu'un côté de la balle qui est en contact. Au début de la compression, la déformation de la balle épouse la forme de la plaque (contact conforme). Lorsque la compression devient plus importante, la balle commence à "cloquer", à flamber : la courbure de la balle s'inverse au niveau de la zone de contact. À ce moment, le cloquage est encore circulaire, symétrique. Lorsque la compression augmente encore, le cloquage s'accentue et la symétrie de révolution se brise : des polygones à 3, puis 4, puis 5 côtés apparaissent. Ceci est illustré sur la figure 2 :

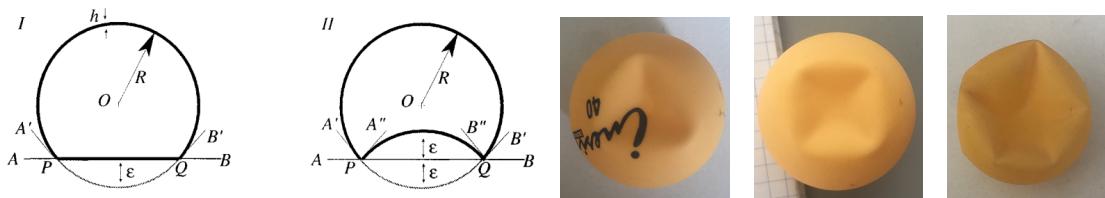


FIGURE 2 – À gauche, les schémas sont tirés de [6]. Les photographies ont été prises pendant le stage en comprimant une balle avec les mains. De gauche à droite, les différents régimes : contact conforme puis cloquage à symétrie axiale puis cloquage en forme de polygone.

Ces configurations de cloquage sont en effet favorables énergétiquement. L. Pauchard et S. Rica, entre

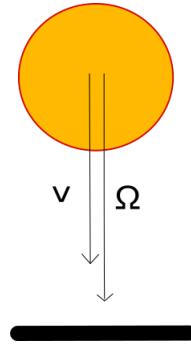


FIGURE 1 – Schéma du type de rebond étudié : incidence normale et vecteur rotation $\vec{\Omega}$ parallèle à la vitesse \vec{v} .

autres, le décrivent à la fois théoriquement et expérimentalement.[6] Ils traitent d'une demi-sphère creuse (une balle de tennis dans leurs expériences) compressée entre 2 plaques rigides. Les charges imposées dans les expériences conduisent aux deux premiers régimes évoqués précédemment : contact conforme (configuration I) et cloquage à symétrie axiale (configuration II). Les résultats expérimentaux montrent que la transition du contact conforme au cloquage se fait brusquement pour une déformation linéaire ϵ (cf. figure 2) de l'ordre de 2 fois l'épaisseur de la balle considérée, notée h . Sous réserve de quelques approximations (théorie des perturbations $R \gg h$ autour d'un contact parfaitement conforme pour $h = 0$), ils donnent les énergies U_i des deux configurations. Avec $i=I,II$ selon la configuration.

$$U_I = \frac{C_0}{4} \frac{Eh^{5/2}}{R} \epsilon^{3/2} + C_1 \frac{Eh}{R} \epsilon^3 \quad (1)$$

$$U_{II} = C_0 \frac{Eh^{5/2}}{R} \epsilon^{3/2} + C_1 \frac{Eh^3}{R} \epsilon \quad (2)$$

Ces expressions avaient été déterminées dans [7]. C_0 et C_1 sont des constantes. L'épaisseur et le rayon de la balle sont notés respectivement h et R . La déformation linéaire est notée ϵ . La taille de la déformation due au cloquage est notée $l \sim \sqrt{\epsilon R}$. Le module d'Young de la balle est noté E .

Le premier terme de chaque expression traduit la formation d'un disque (ou d'une sphère pour la configuration 2) donnant lieu à des effets de "tension de surface". Pour la configuration I, le second terme traduit la compression d'une partie sphérique en un disque plat. Pour la configuration II, le second terme traduit l'inversion de courbure (i.e. le cloquage). Pour de faibles déformations ($\epsilon < h$), $U_{II} > U_I$ ($U_{II} \propto \epsilon$ et $U_I \propto \epsilon^{3/2}$) d'où le contact conforme. Mais quand la déformation augmente ($\epsilon > h$), $U_{II} < U_I$ ($U_{II} \propto \epsilon^{3/2}$ et $U_I \propto \epsilon^3$). D'où le cloquage. Enfin, U_{II} comporte un terme en $\epsilon^{3/2}$ qui domine et augmente vite pour une grande déformation ($\epsilon > h$). D'où, pour des compressions encore plus importantes, la formation de "polygones de cloquage" pour limiter cette croissance d'énergie élastique (qui sera en partie perdue au cours du rebond).

Mais le cas quasistatique n'est pas à prendre pour argent comptant dans notre cas de rebond dynamique. Le comportement dynamique d'une balle de tennis de table (couche sphérique mince visco-élastique) se différencie quelque peu du cas quasistatique, notamment car les vitesses courantes d'impact (au plus 45m/s) ne fournissent pas l'énergie suffisante pour atteindre tous les régimes de cloquage.

Zhang et Yu [8] étudient la restitution en vitesse d'une balle de tennis de table, reliée au temps de contact et à l'énergie dissipée. La balle rebondit en incidence normale sur un plateau rigide. Les vitesses initiales sont comprises entre 4 et 45 m/s, qui correspondent bien aux vitesses de jeu. Ils montrent que dans cette gamme de vitesse, la déformation de la balle s'arrête au cloquage avec symétrie axiale. Ils montrent, dans la même direction, que l'énergie de déformation dynamique nécessaire au cloquage peut être nettement supérieure à l'énergie élastique du cas quasistatique. Aussi, ils mettent en avant que le temps de contact est croissant avec la vitesse initiale jusqu'à 30 m/s mais que le temps de contact est ensuite décroissant avec la vitesse initiale. Ceci serait sûrement dû au fait que la déformation ne disparaît plus "instantanément" à partir de $\simeq 30$ m/s. Ce qui témoigne de la présence de moins en moins négligeable d'effets de propagation voir d'effets plastiques.

Hubbard et Stronge [5] étudient des situations similaires, mais pour des vitesses initiales comprises entre 4 et 20 m/s. D'un point de vue expérimental, comme Zhang et Yu, ils observent une **tendance décroissante de la restitution en vitesse en fonction de la vitesse initiale**. D'un point de vue théorique, ils considèrent la balle purement élastique. Mais les valeurs sont surestimées par le modèle. Les valeurs d'énergies dissipées sont, elles, sous-estimées.

La décroissance du coefficient de restitution $e = \frac{v_2}{v_1}$ est aussi observée et étudiée par Pauchard et Rica [6]. Ils modélisent cette décroissance qualitativement (théoriquement) et expérimentalement par une loi de puissance (de la vitesse initiale). É. Falcon[4], en étudiant les rebonds consécutifs d'une balle, approche (expérimentalement et quantitativement avec un calcul plus approfondi) la physique du rebond à basse vitesse par une loi de puissance de la forme $e = 1 - (\frac{v_1}{v_0})^a$. Le coefficient de restitution en vitesse est noté $e = \frac{v_2}{v_1}$, où v_1 (respectivement v_2) est la vitesse avant rebond (respectivement après rebond). La constante (de la balle) v_0 est déterminée quantitativement en généralisant la théorie du contact de Hertz.

Cependant, les propriétés des surfaces de rebonds ne sont que peu ou pas abordées dans ces articles.

Or, une raquette de tennis de table se compose d'un bois et d'un compact (une couche d'elastomère et un caoutchouc structuré¹). Les très nombreuses combinaisons possibles font autant de différences de propriétés pour les surfaces où rebondissent les balles : rugosité de la face, souplesse de la raquette, etc. L. Manin *et al.* ont étudié ces différences et l'impact sur la restitution en vitesse de la balle.^[1] Ils montrent par exemple que la restitution en vitesse décroît d'une plaque rigide à une plaque rigide surmontée d'une mousse fine à une plaque rigide surmontée d'un revêtement complet d'une raquette de tennis de table.

Des études ont donc été menées pour la restitution en vitesse de balles de tennis de table. Mais très peu d'études ont été menées avec une balle en rotation.

Rod Cross^[3] trouve pour sa part des relations théoriques sur différents coefficients de restitution pour une balle de tennis rebondissant avec une incidence quasi normale. Il vérifie ensuite expérimentalement ces dépendances. Bien qu'il travaille sur des effets différents (sur un lift), il établit que la restitution en rotation $e_\omega = \frac{\omega_2}{\omega_1} \propto \frac{v_{x1}}{R\omega_1}$. Les grandeurs avant rebond sont indiquées par 1, celles après rebond par 2. L'axe x est horizontal. Ces dépendances peuvent être indicatives mais non exhaustives dans notre cas.

1.2 Objectifs initiaux propres à ce stage

L'objectif général de ce stage est d'étudier expérimentalement la restitution en vitesses de translation et de rotation en fonction des vitesses (de translation et de rotation) initiales de la balle. Ceci pour différentes raquettes et balles de tennis de table. Pour rappel, ci-contre (figure 3) est schématisé une nouvelle fois le type de rebond étudié (vecteur rotation parallèle à la vitesse).

Ce sujet de recherche débutant au laboratoire, il a fallu dans un premier temps monter un dispositif permettant de propulser des balles avec les vitesses de translation et de rotation voulues (tant en sens qu'en norme). Initialement, l'objectif était d'obtenir des vitesses de translation allant jusqu'à 40-50 m/s et de rotation allant jusqu'à 120-130 tours/s afin de se rapprocher des conditions de jeu réelles. Cette partie de mise en place du dispositif expérimental compte pour plus d'un mois de stage.

Une fois le dispositif prêt, l'étude des rebonds a pu commencer. Il apparaît, comme évoqué dans l'état de l'art, que la restitution en vitesses de translation et de rotation dépend notamment des vitesses initiales de translation et de rotation de la balle. Le comportement à basse vitesse étant notamment à étudier. De plus, sans surprise vu le nombre de possibilités de fabriquer des raquettes différentes comme évoqué dans l'état de l'art, de simples tests "à la main" avec les raquettes étudiées montrent que la restitution en rotation au cours du rebond dépend très fortement de la raquette et de la face étudiées (de la "rugosité" de la face par exemple).

On choisit et définit pour la suite deux coefficients de restitution, l'un en vitesse de translation (équation 3) et l'autre en vitesse de rotation (équation 4) :

$$e_y = \frac{v_{y2}}{v_{y1}} \quad (3)$$

$$e_\Omega = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} \quad (4)$$

Les grandeurs avant rebond sont indiquées par 1, celles après rebonds par 2. L'axe y est l'axe vertical croissant, l'axe x l'axe horizontal orienté de gauche à droite. La vitesse de translation verticale et la vitesse de rotation sont désignées respectivement par v_y et Ω .

Ainsi, il paraît pertinent d'étudier expérimentalement la dépendance de la restitution en vitesses de translation et de rotation de la balle en fonction de la vitesse de translation initiale, à différentes

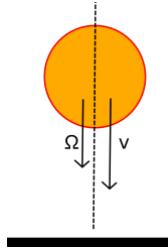


FIGURE 3 – Schéma du type de rebond étudié : incidence normale et vecteur rotation $\vec{\Omega}$ parallèle à la vitesse \vec{v} .

1. Les picots que l'on peut voir sur certaines faces.

vitesses de rotation fixées et pour différentes raquettes. Autrement dit, il est question **d'étudier les dépendances** $e_y = f(v_{y1}, \Omega_1)$ et $e_\Omega = f(v_{y1}, \Omega_1)$, pour différentes raquettes et balles.

Comportement général attendu pour la translation Nous prévoyons de trouver des courbes proches de la figure 4. Pour de très faibles vitesses initiales, on s'attend à avoir un coefficient de restitution en vitesse de translation e_y très proche de 1. En effet, le contact serait alors "ponctuel" d'où des forces uniquement verticales et des moments nuls d'où une restitution parfaite (un rebond parfaitement élastique). Toujours pour de très faibles vitesses, il est probable d'obtenir une décroissance en loi de puissance.^[4] On s'attend ensuite à avoir une décroissance (en fonction de la vitesse initiale de la balle) du fait que le contact devient de moins en moins ponctuel (plus de déformation) d'où plus de pertes d'énergie (élastique). La raquette absorbe plus d'énergie également car elle vibre de plus en plus. On s'attend enfin à une rupture de pente et à une décroissance plus marquée à partir des vitesses pour lesquelles la balle cloque. En effet, le cloquage augmente l'énergie élastique stockée au cours du rebond (par rapport à l'énergie d'un contact conforme pour les plus faibles vitesses) et toute l'énergie ne peut être restituée.

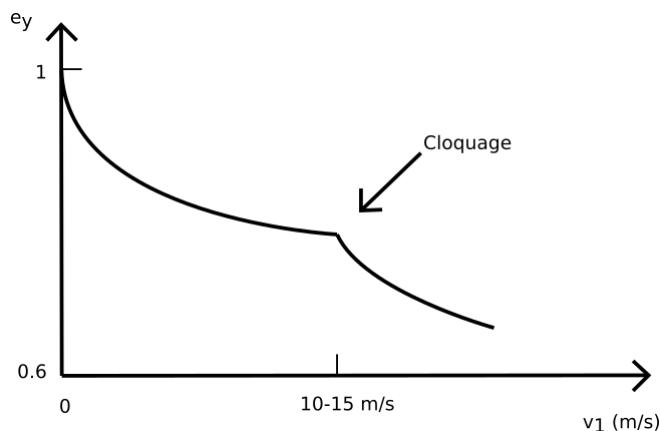


FIGURE 4 – Tracé **qualitatif** du coefficient de restitution e_y en fonction de la vitesse initiale de la balle.

2 Approche expérimentale

2.1 Dispositif expérimental

La première partie du stage a été consacrée à la réalisation du meilleur dispositif expérimental possible. C'est-à-dire un dispositif sur mesure simple en théorie et donnant à la balle les conditions initiales voulues. Pour ce faire, quelques passages à l'atelier du laboratoire ont été nécessaires. Au début du stage, seulement le tout début du dispositif était prêt et il a été question de concevoir les différentes idées théoriques pour arriver à un dispositif convenable. Passant les différents essais, le dispositif final utilisé est schématisé ci-dessous sur la figure 5 :

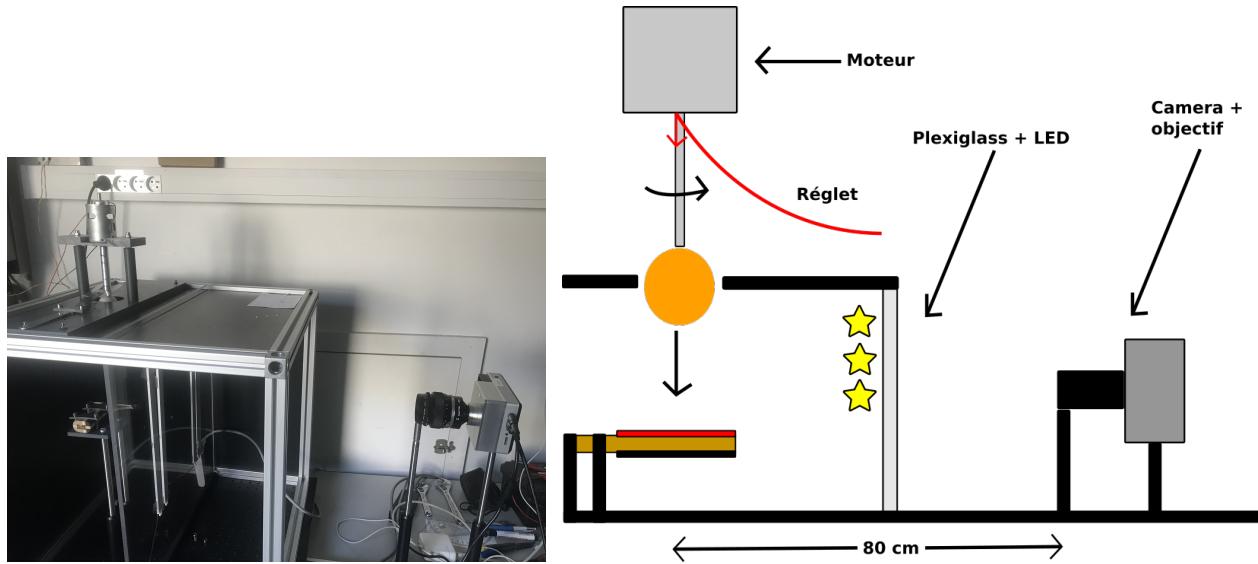


FIGURE 5 – À gauche : photographie générale du dispositif expérimental. À droite : vue de face en coupe du dispositif expérimental monté et utilisé pour la réalisation des lancers de balle. La balle est mise en rotation (via la tige reliée au moteur) puis frappée par un réglet. Elle rebondit finalement verticalement sur la raquette. La balle est propulsée à des vitesses allant jusqu'à 10 m/s en translation et 35 tours/s en rotation.

La balle est schématisée en orange. Elle est mise en rotation et propulsée par un lanceur (partie "lanceur" du dispositif, en haut à gauche du schéma et détaillée juste après). Ceci lui transmet **une vitesse (quasi) verticale avec un vecteur rotation (quasi) colinéaire à la vitesse de translation**. La balle rebondit sur une raquette de tennis de table fixée par son manche. La raquette est horizontale. La région de rebond est éclairée par 4 panneaux LED fixés sur une paroi en Plexiglass® et disposés de part et d'autres de la balle afin d'optimiser l'éclairage de la balle (il s'agit principalement de limiter les zones d'ombre au cours du rebond). La paroi de Plexiglass® permet aussi et surtout d'éviter d'endommager l'objectif de la caméra avec une éventuelle collision avec la balle. La caméra² a par ailleurs été éloignée de la zone d'impact (par rapport à ce que l'on peut voir sur la photo) afin d'avoir une profondeur de champs convenable (de l'ordre de la largeur d'une face de la raquette).

Un point qui n'est pas anodin est la fixation de la raquette. Par exemple, Rod Cross mentionne la grande différence dans l'étude des rebonds sur raquette (de tennis dans son cas) d'une raquette tenue à la main et d'une raquette dont le cadre est fixé rigidement.^[3] En effet, d'un côté le mouvement de la raquette est non négligeable alors que de l'autre côté la raquette est fixe. Howard Brody traite la différence entre le rebond d'une balle (de tennis) sur une raquette tenue à la main et sur une raquette dont le manche est fixé rigidement, ainsi que les grandes difficultés à fournir un modèle de "manche tenu à la main".^[2] Il mentionne des différences notables entre les deux situations (la raquette tenue rigidement par le manche présente des modes d'oscillations non présents dans le cas d'une raquette

2. FPS 4000 The Slow Motion Camera Company.

tenue à la main). Il conclut qu'une raquette laissée libre traduit mieux le cas d'une raquette tenue à la main qu'une raquette fixée rigidement par le manche. Mais il n'a pas traité les situations intermédiaires (entre raquette libre et raquette fixée rigidement par son manche). Nous avons alors quand même fait le choix de tenir la raquette par son manche assez rigidement, "juste milieu" entre position fixe de la raquette et vibrations permises lors d'un rebond.

Le lanceur de balle, qui constitue la partie principale du montage, est mis en lumière dans la figure 6 :

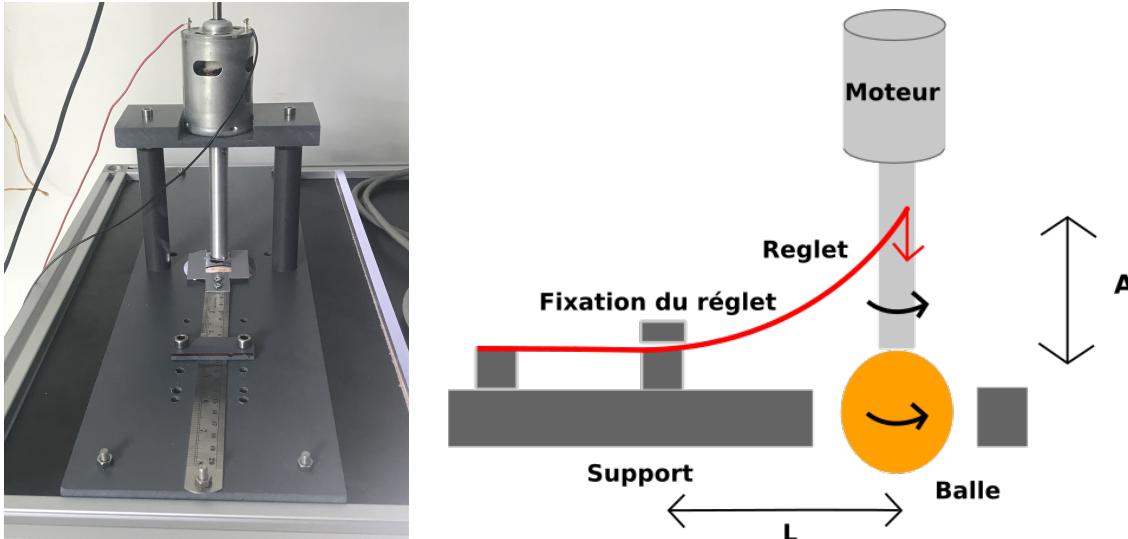


FIGURE 6 – À gauche, une photographie de la partie "lanceur" du dispositif. À droite, un schéma de cette même partie mais vue à 90 degrés par rapport à la photographie. La balle est scotchée au bout de la tige. Le réglet est en forme de fourche pour passer autour de la tige et frapper la balle. A est le chargement initial du réglet et L la distance à laquelle est encastrée le réglet par rapport à la balle.

Le chargement initial du réglet et la distance à laquelle est encastré le réglet par rapport à la balle sont notés respectivement A et L. La balle est scotchée au bout de la tige. La balle est mise en rotation par un moteur à courant continu (piloté par un générateur) via la tige. Puis l'on tire le réglet et le relâche pour qu'il aille frapper la balle, la décoller et lui imprimer une vitesse initiale.

Le lanceur constitue la partie principale du dispositif car c'est cette partie qui a nécessité le plus d'essais pour arriver à un lanceur convenable (fournissant notamment la rotation voulue comme schématisé sur la figure 6). Un lanceur convenable étant un lanceur où l'on contrôle rotation et translation indépendamment et relativement précisément.

Le but est de produire une balle en translation verticale avec un vecteur rotation vertical également. Pour cela, Le réglet est surrélevé par rapport au support afin de frapper la balle à l'horizontal et dans l'axe du réglet. La balle doit être bien centrée sur la tige (partie la plus "technique" du dispositif) et elle doit être suffisamment collée à la tige pour qu'elle reste bien centrée au cours de la rotation. En effet, la balle a tendance à se décentrer pour les vitesses de rotation étudiées. Ceci est à éviter car la balle serait alors frappée non à l'horizontale et non dans l'axe du réglet, induisant des angles d'incidence trop importants.

2.2 Objectifs initiaux : limites immédiates de ce dispositif

Le problème de rotation réglé, il fallait s'assurer de pouvoir propulser la balle à des vitesses convenables i.e. proches des conditions réelles de jeu ($\simeq 100 - 120 \text{ km/h} = 40 \text{ m/s}$ pour les balles les plus rapides). Cet objectif s'est rapidement révélé trop ambitieux pour ce stage et ce dispositif.

On peut estimer la vitesse initiale de la balle en utilisant la théorie d'oscillation des poutres pour estimer la vitesse du réglet quand il arrive au niveau de la balle et la frappe. La balle partira alors avec le double de cette vitesse. On se sert ici des notations de la figure 6. On considère le réglet encastré

au niveau de la "fixation du réglet" et libre à l'extrême frappant la balle. Passant tous les calculs, l'expression de la pulsation du premier mode d'oscillation du réglet est donnée par l'équation 5. D'où, la vitesse initiale théorique de la balle donnée par l'équation 6.

$$\omega = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \frac{1}{L^2} \quad (5)$$

$$v_{th} = 2A\omega = \frac{\pi^2}{2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \frac{A}{L^2} = \alpha \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

$E \simeq 200$ MPa est le module d'Young du réglet (axier inoxydable). $\rho \simeq 8$ mg/mm³ sa masse volumique. S sa surface transverse (19.25 mm × 0.66 mm). I est le moment quadratique de la section transverse par rapport à son centre. L'application numérique conduit à $\alpha \simeq 5$ d'où pour A = 5 cm et L = 10 cm (valeurs "maximales" pour le dispositif) : $v_{th} \simeq 24$ m/s.

Mais cette estimation ne tient pas compte du fait que le réglet dépense de l'énergie pour décoller la balle. N'ayant pas réussi à trouver mieux, nous en sommes restés à l'utilisation de Scotch®. Ce qui réduisait les vitesses initiales par rapport à l'estimation. Notamment dans le cas d'une rotation non nulle où il fallait recouvrir une plus grande partie de la balle avec du Scotch® pour qu'elle reste bien centrée sur la tige.

Les vitesses de translation n'ont finalement pas dépassé les 10 m/s. Aussi, plus pour des raisons de temps, nous avons choisi de se limiter à étudier des rebonds sans rotation et pour $\Omega = (35 \pm 5)$ tr/s.

D'autre part, la reproductibilité des rebonds est limitée, notamment à cause des faits que le réglet se déformait rapidement et que la charge initiale du réglet est donnée à la main. Nous étions partis sur des mesures statistiques (3 points pour des vitesses le plus proche possible). Mais vu la difficulté énoncée ci-dessus, nous avons pris la décision de réaliser un certain nombres de rebonds et de rejeter ceux ne respectant pas les conditions initiales voulues.

On va maintenant détailler ces méthodes de mesures et les conditions de "bonne mesure".

2.3 Méthode de mesure

Caméra Les rebonds sont filmés par une caméra de fréquence d'acquisition de $f = 3600$ images par seconde. Ceci permet d'obtenir les vitesses (de translation et de rotation) juste avant et juste après le rebond avec une bonne précision. Cette fréquence d'acquisition est notamment adaptée à la vitesse de rotation obtenue dans ce stage (une trentaine de tours par seconde). En effet, une balle tournant à 36 tr/s fait 1 tour en $\frac{1}{36} = \frac{100}{3600} = \frac{\text{nb d'images}}{\text{fréquence d'acquisition}}$ s. Autrement dit, 1 tour correspond à 100 images, i.e. un demi tour à 50 images, ce qui donne une bonne précision de mesure. (1 tour pour 2 ou 3 images n'aurait pas été satisfaisant par exemple).



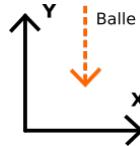
Réalisation des rebonds On propulse une balle et enregistre la série d'images. On effectue une première vérification de l'acquisition à l'œil nu afin d'éliminer les rebonds parasites. Ces rebonds parasites sont ceux où la balle frappe près des bords de la raquette (image floue et la raquette vibre beaucoup plus), où l'on observe une rotation non voulue importante, où l'angle d'incidence est trop important. Ce qui conduit à une première sélection avant le traitement des séquences. Un rebond avec un angle d'incidence supérieur à 10 degrés est écarté. À l'œil nu, il est difficile de repérer les rotations parasites car cela

FIGURE 7 – Balle marquée, permettant de suivre un point fixe sur la balle et ainsi repérer la rotation.

dépend pour l'œil des tracés sur la balle. Le vecteur rotation $\vec{\Omega}$ peut être vertical mais les traits dessinés sur la balle (figure 7) peuvent être obliques et donc fausser notre jugement.

2.4 Traitement des séquences d'image

Les séquences d'images sont alors récupérées et traitées avec ImageJ© et Matlab©. Le repère choisi est le suivant :



Translation de la balle On repère la position du centre de masse de la balle au cours du temps et du rebond grâce à Matlab©. Ci-dessous sur la figure 8, est représentée une séquence traitée :

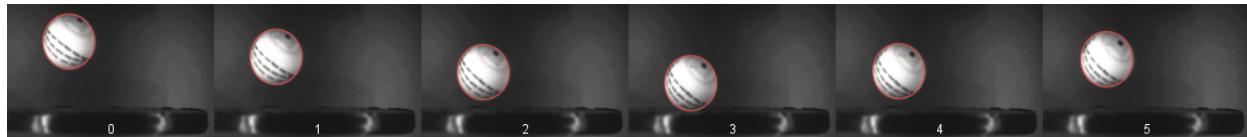


FIGURE 8 – Séquence d'image traitée. Sur chaque photographie de la balle est ajouté le cercle correspondant au repérage de la balle. L'intervalle de temps entre chaque image est de 2.8 ms.

Les images sont binarisées puis l'on repère le cercle correspondant à la balle. D'où le centre de masse. On obtient ainsi, avec le pas de temps $\tau = \frac{1}{f} = 0.278\text{ms}$, les vitesses horizontales v_x et verticales v_y de la balle, avant et après le rebond. Ces vitesses correspondent aux pentes des courbes $x(t)$ et $y(t)$ puisque les rebonds se font sur des durées de l'ordre de la dizaine de ms. On en retire le coefficient de restitution en vitesse de translation $e_y = \frac{v_{y2}}{v_{y1}}$. On obtient aussi l'angle d'incidence de la balle : on utilise le produit scalaire entre le vecteur correspondant à la trajectoire de la balle $y(x)$ et le vecteur correspondant à l'inclinaison de la raquette.

Rotation de la balle On repère la position d'un point fixe sur la balle au cours du temps grâce à ImageJ©. On note ce point M. On obtient la position donc la vitesse d'un point fixe de la balle (M) i.e. la vitesse totale dans le référentiel du laboratoire. D'où la vitesse de rotation de la balle par composition des vitesses : $R\Omega = v_{\text{tot}} - v_G$ en projection sur l'axe x. G pour le centre de masse. R est le rayon de la balle. On obtient également l'angle que fait le vecteur rotation par rapport au vecteur vitesse, en faisant la différence de la dérivée de la position verticale de M et de la dérivée de la position verticale du centre de masse. Les angles indiqués sont tous pris dans le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par le milieu de la raquette (où la balle rebondit). Le tout est effectué avant et après le rebond.

2.5 Incertitude des mesures

Acquisition valide ou non ? Comment un rebond est-il jugé valide ? Le rebond doit être quasi normal. Ne sont gardés que les rebonds avec un angle d'incidence inférieur à 10 degrés. On vérifie aussi pour cela que la vitesse horizontale est bien inférieure à la vitesse verticale (incidence normale). De plus, on vérifie que la vitesse horizontale reste sensiblement constante au cours du rebond (pas de rotation parasite ou d'angle d'incidence trop important).

Le rebond doit aussi être tel que le vecteur rotation de la balle soit parallèle à la vitesse. Avec le faible angle d'incidence, on peut considérer que cela revient à un vecteur rotation proche de la verticale. Ne sont gardés que les rebonds avec un angle entre le vecteur vitesse et le vecteur rotation au plus de l'ordre de la dizaine de degrés. Les configurations voulues sont résumées sur la figure 9.

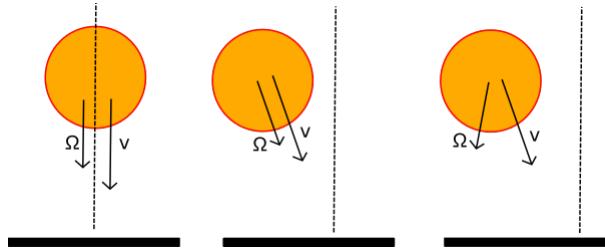


FIGURE 9 – Figure représentant différentes configurations de rebonds. À gauche, le rebond idéal voulu. Au milieu, la balle arrive avec un angle d’incidence non nul mais avec un vecteur rotation parallèle à la vitesse. L’effet physique recherché est donc en partie respecté. À droite, la balle arrive avec un angle d’incidence non nul et avec avec un vecteur rotation dans un sens arbitraire. Pour des angles trop importants (supérieurs à 10 degrés), cette configuration est à éliminer.

Ces conditions de faibles angles réunies, il est possible de négliger les projections potentiellement nécessaires. En effet, l’erreur due à la présence ou non d’un facteur en cosinus est de l’ordre de 1% pour un angle de 10 degrés.

Incertitudes des mesures Les incertitudes ont été évaluées soit logarithmiquement soit sur un petit nombre de lancers similaires. Les barres d’erreurs n’apparaîtront pas directement sur les graphiques car la taille des symboles a été choisie de façon à englober ces incertitudes.

Tous les angles dans le plan perpendiculaire à l’axe optique et "comprenant" la trajectoire de la balle sont mesurés et pris en compte ou négligés (la plupart du temps). Néanmoins, ce dispositif ne permet pas de savoir si la trajectoire se fait bel et bien dans ce plan et pas un plan oblique. On a pu le surveiller en regardant si la balle s’éloignait du plan d’incidence prévu de trop au cours du rebond (l’image devient de plus en plus floue au cours du rebond). On a donc exclu les points les plus aberrants. Le fait de ne pas avoir accès à cet angle a d’ailleurs contribué à la décision de considérer des petits angles dans toutes les directions. Néanmoins, pour avoir des mesures avec une précision maximale, prendre en compte tous les angles est nécessaire. Ce qui constitue un point d’amélioration des mesures.

Finalement : **sur 20 rebonds effectués, une dizaine sont conservés.**

3 Résultats

Il était initialement question de tester 6 raquettes différentes et 4 types de balles différents. Nous nous sommes finalement concentré sur 1 raquette (2 faces) et 1 balle.

La raquette étudiée est une raquette faite sur mesure. La face rouge est faite de picots longs (1.2mm), de 1.2 mm de mousse. Cette face est utilisée par le champion paralympique français. La face noire est faite d'un revêtement adhérent (backside) et de 1.2 mm de mousse. En comparant ces deux faces, on compare donc uniquement les deux types de revêtement.

La balle étudiée est une balle 729 Tianjin© (marque chinoise) 3 étoiles. Les 3 étoiles assurent une meilleure sphéricité. De plus, les balles 3 étoiles 729 Tianjin© ne comportent pas de soudure.

3.1 Restitution en vitesse de translation, sans rotation

Le paramètre le plus simple à étudier est la restitution en vitesse de translation verticale, quand la balle n'a pas de rotation au départ. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 10 :

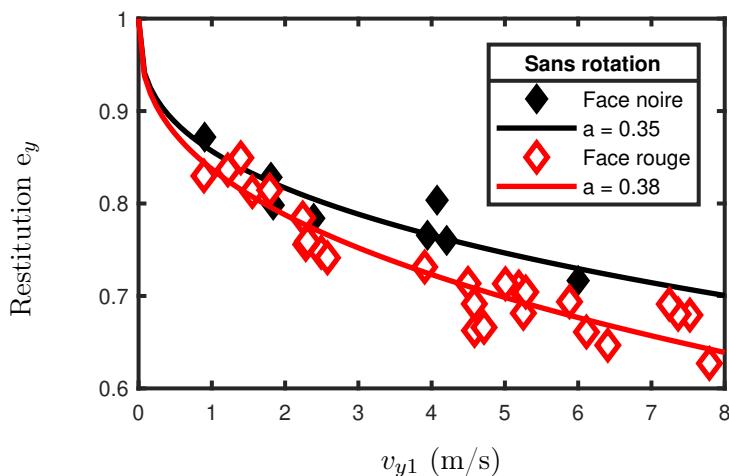


FIGURE 10 – Tracés du coefficient de restitution en vitesse de translation e_y en fonction de la vitesse initiale v_{y1} de la balle, pour les deux faces de la raquette. La balle n'a pas de rotation initiale. Les données relatives à la face rouge sont représentées en rouge, celles relatives à la face noire en noir. Les modélisations en loi de puissance correspondantes suivent les mêmes règles de couleur. Modélisation : $e_y = 1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^a$. Le paramètre v_0 est déterminé numériquement.

26 points ont été retenus pour la face rouge, 8 pour la face noire.

On retrouve bien l'allure décroissante attendue. De plus, comme suggéré dans l'article de Falcon[4], les points expérimentaux pour chacune des 2 faces sont approchés par une modélisation en loi de puissance de la forme $e_y = 1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^a$. On force ici les modélisations à passer par 1 pour une vitesse initiale nulle pour respecter les attentes évoquées dans la partie 1.2 page 4 *Comportement général attendu pour la translation*. Enfin, on constate que la face noire restitue plus en vitesse que la face rouge et que la courbe "face noire" a une tendance moins décroissante. La face rouge est faite de picots longs alors que la face noire est plate. En quelques sortes, la face noire est la face rouge mais retournée. La zone de contact avec la balle est donc plus importante dans le cas de la face noire. Les forces s'exerçant sur les picots sont alors mieux réparties dans le cas de la face noire d'où une perte moins importante que pour la face rouge.

Il est néanmoins dommage de n'avoir pu dépasser les 8 m/s. L'énergie initiale n'était alors pas suffisante pour dépasser la limite de cloquage (rappel : cloquage à partir d'une déformation linéaire $\simeq 2$ fois l'épaisseur de la balle dans le cas statique). Pour les lancers les plus rapides (8 m/s), il semble qu'on se trouve à la limite de cloquage statique : déformation linéaire de l'ordre de 1.8 mm contre une épaisseur de balle de l'ordre de 0.8 mm. Se rappelant de la remarque de Zhang et Yu[8] comme quoi l'énergie

dynamique de cloquage est supérieure à celle statique, il semble que les vitesses permises par notre dispositif n'aient pas suffit à atteindre le cloquage. Aussi, les études (même celles effectuées en statique) pour déterminer la limite de cloquage sont telles que la balle est en contact avec des surfaces dures. Or, nous considérons des raquettes de tennis de table dont les faces comprennent entre autres une épaisseur de mousse. Les tracés obtenus semblent aussi confirmer cela puisque qu'aucune rupture de pente n'est observée, comme on peut s'y attendre en cas de cloquage.

3.2 Restitution en vitesse de translation, avec rotation

La deuxième idée qui vient à l'esprit est de tester l'impact de la rotation sur la restitution en vitesse de translation. La figure 11 compare les précédents résultats obtenus sans rotations aux résultats avec rotation :

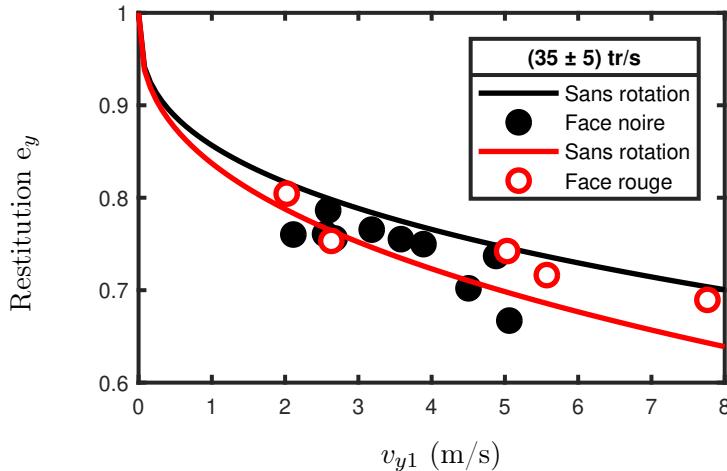


FIGURE 11 – Tracés du coefficient de restitution en vitesse de translation e_y en fonction de la vitesse initiale v_{y1} de la balle, pour les deux faces de la raquette, avec rotation initiale $\Omega_1 = (35 \pm 5)$ tr/s. Les deux courbes en trait plein sont les modélisations précédentes (sans rotation). En noir, la face noire. En rouge, la face rouge.

Apparaît ici une nouvelle différence entre les faces rouge et noire. Rappelons que la face rouge est faite de picots longs (donc plus élastique que la face noire) et que la face noire est plane et plus rugueuse. On cherche encore à cerner ce comportement et à être capable d'en fournir une explication. Dans le cas de la face noire, tous les points avec rotation sont inférieurs à la modélisation sans rotation. La différence est faible mais systématique. La rugosité de la face noire est synonyme de frottement important sur la face (la balle "accroche"). D'une part, ce frottement entraîne une perte supplémentaire d'énergie totale donc *a fortiori* de vitesse selon l'axe y . D'autre part, les points en contact avec la face au cours du rebond vont à une vitesse $\approx R\Omega$ quasiment horizontale (la vitesse verticale s'annulant au rebond). Cette vitesse est alors transmise en vitesse linéaire horizontale. Dans le cas d'une incidence parfaite ($\vec{\Omega}$ parallèle à \vec{v} et incidence normale), la symétrie de révolution assure un rebond normal à la face. Mais dès qu'un angle apparaît (incidence pas tout à fait normale et/ou $\vec{\Omega}$ et \vec{v} non parallèles), la symétrie est brisée : une partie de la face est soumise à une plus grande pression, conduisant à une conversion de rotation en vitesse linéaire selon une direction horizontale. Le rebond n'est plus normal à la face. D'où une plus grande diminution de v_y . Dans le cas de la face rouge, la différence entre rotation et sans rotation est peu marquée. Pour $v_{y1} > 5$ m/s, la restitution en vitesse verticale a augmenté avec la rotation initiale. Ceci s'accorde avec le sens commun des sportifs : une balle liftée décélère moins au rebond qu'une balle à plat dans le cas du tennis ou un ballon décélère moins sur gazon mouillé que sur gazon sec dans le cas du football.

Une difficulté se rajoutait dans le cas avec rotation : obtenir des basses vitesses (il n'était plus possible de juste lâcher la balle).

3.3 Restitution en vitesse de rotation

Le but majeur de ce stage était d'étudier la restitution en rotation de la balle. Notamment de comparer l'impact des faces rouge et noire. La face rouge retranscrit les effets "quasiment parfaitement" lorsque l'on fait des tests à la main. La face noire est elle beaucoup plus rugueuse et il est beaucoup plus difficile à la main de prévoir la rotation de la balle après rebond. La figure 12 illustre une partie de ces différences :

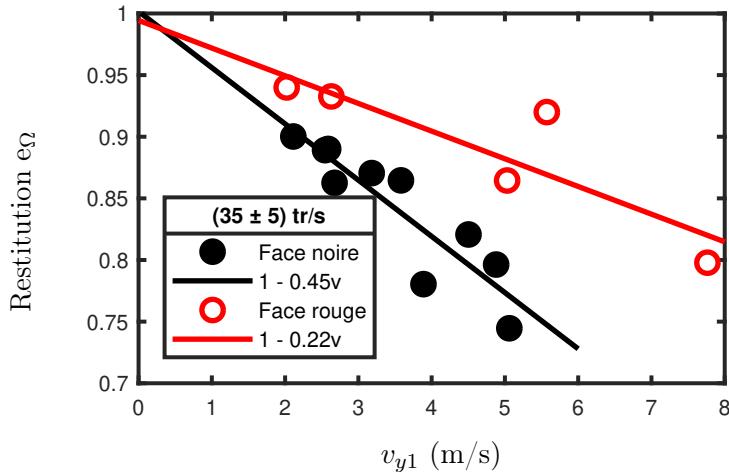


FIGURE 12 – Tracés du coefficient de restitution en rotation e_Ω en fonction de la vitesse initiale v_{y1} de la balle. Encore une fois : en rouge, les tracés correspondants à la face rouge et en noir ceux correspondants à la face noire.

La restitution en rotation $e_\Omega = \frac{\Omega_2}{\Omega_1}$ tracée ici concerne les vecteurs rotations avant et après rebond. La différence entre la face noire et la face rouge est ici bien marquée. La face rouge retransmet bien mieux la rotation que la face noire : décroissance 2 fois moins importante. La rugosité de la face noire est la principale cause de cette forte différence de perte en énergie de rotation.

Un autre résultat différenciant la restitution en rotation des deux faces est la variation caractéristique d'angle entre \vec{v} et $\vec{\Omega}$ entre l'avant et l'après rebond. Dans le cas de la face noire, cet angle est de l'ordre de 12 degrés alors que dans le cas de la face rouge cet angle est de l'ordre de 4 degrés. Il s'agit bien plus, dans le cas de la face noire principalement, d'un changement de direction de la trajectoire que de $\vec{\Omega}$.

La face noire est rugueuse. On reprend le qualitatif de la fin de la sous partie 3.2 page 11 et notamment le cas où l'incidence de la balle n'est pas totalement normale et/ou \vec{v} et $\vec{\Omega}$ ne sont pas colinéaires. La conversion de rotation en vitesse linéaire horizontale explique non seulement la plus grande perte en rotation (par rapport à la face rouge) mais également de la plus grande variation d'angle entre \vec{v} et $\vec{\Omega}$ au cours du rebond. Ces considérations s'accordent aussi avec le fait qu'il s'agit beaucoup plus d'un changement de direction de trajectoire que de direction de $\vec{\Omega}$.

La face rouge est beaucoup moins rugueuse (picots donc beaucoup moins de contact avec la balle) donc beaucoup moins concernée par le qualitatif précédent. Ce qui est en accord avec une meilleure restitution en rotation et des variations d'angle entre \vec{v} et $\vec{\Omega}$ moindres par rapport à la face noire.

Dans la pratique, avec la face rouge, un joueur peut alors renvoyer à son adversaire quasiment le même effet que ce-dernier lui avait envoyé. Le contrôle des effets apparaît beaucoup moins aisés dans le cas de la face noire du fait de la plus grande perte en rotation et surtout du fait des plus forts changements de direction de la balle après rebond pour de faibles variations des conditions d'incidence de la balle. La recherche d'un meilleur contrôle des effets est encore plus primordial dans le cas des joueurs de tennis de table handisport dont les mouvements (pouvant compenser certaines difficultés dues à une raquette) sont limités.

3.4 Discussion sur les cas avec rotation

Aux vues des considérations qualitatives des sous-parties 3.2 et 3.3, avoir un dispositif précis devient un point encore plus important. Cela permet en effet de s'assurer d'avoir des effets parasites incompris et dans le pire des cas mal interprétés. Comme discuté précédemment, un angle d'incidence de la balle et/ou un angle entre \vec{v} et $\vec{\Omega}$ trop important (en ordre de grandeur à partir de la dizaine de degrés) implique une vitesse linéaire horizontale après rebond plus ou moins importante en fonction de la face considérée. Une partie des rebonds avec de tels angles sont gardés car suivent la tendance générale. Mais ces rebonds sont en nombre suffisant et peuvent donc conduire à une erreur quasi systématique. D'ailleurs, les variations d'angles n'ont pas été données précisément dans la sous-partie 3.3. Il serait question d'affiner ces mesures pour caractériser plus systématiquement l'impact de la rotation.

4 Conclusion

Bilan Le point positif de ces expériences est que l'on a pu retrouver expérimentalement des points ressentis par les joueurs de tennis de table, notamment les joueurs handisport. Par exemple, le fait que la face rouge apporte un meilleur contrôle des effets adverses puisqu'elle restitue mieux la rotation que la face noire et surtout que les changements de direction dûs à la rotation sont moindres dans le cas de la face rouge (par rapport au cas de la face noire). Il reste néanmoins à expliquer quantitativement et précisément les comportements observés, notamment la différence de restitution en vitesse linéaire en fonction de la rotation initiale de la balle entre les deux faces.

Perspectives pour la suite La première suite à ce stage serait de tester toutes les raquettes et balles disponibles selon le même procédé et pour plusieurs vitesses de rotation. Le même procédé mais en modifiant toutefois le lanceur de balle afin d'obtenir de plus grandes vitesses de translation initiales et ainsi pouvoir étudier en détails l'impact du cloquage sur les restitutions en vitesses translation et de rotation. Notamment, de caractériser la limite à partir de laquelle la balle cloque. Une possibilité qui sera testée est un moteur cylindrique creux dans lequel viendrait se loger la balle. Il sera aussi tester de maintenir initialement la balle par une soufflette.

Aussi, le montage optique sera nettement amélioré. d'une part, en fixant plus précisément les parallélismes. D'autre part, en "divisant l'écran de la caméra en deux". Une des deux partie continuera de filmer la trajectoire de la balle de face. L'autre partie de l'écran filamera un miroir à 45 degrés, ce qui donnera accès au plan (yOz) en reprenant les notations de l'étude. Tous les angles seront désormais accessibles.

Enfin, il serait intéressant d'étudier les vibrations de la raquette au cours du rebond et de discuter plus précisément de l'impact de la fixation de la raquette sur la restitution afin de trouver une méthode de fixation approchant au mieux la situation réelle étudiée (ici une raquette tenue à la main).

Références

- [1] L. Manin R. Rinaldi. Impact normal d'une sphère creuse en plastique sur une couche mince en polymère : application au tennis de table. 2016.
- [2] Howard M. Brody. Models of Tennis Racket Impacts. 1987.
- [3] Rod Cross. Bounce of a spinning ball near normal incidence. 2005.
- [4] E. Falcon, C. Laroche, S. Fauve, and C. Coste. Behavior of one inelastic ball bouncing repeatedly off the ground. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, 3(1) :45–57, May 1998.
- [5] Mont Hubbard and W.J. Stronge. Bounce of hollow balls on flat surfaces. *Sports Engineering*, 4 :49–61, May 2001.

- [6] L. Pauchard and S. Rica. Contact and compression of elastic spherical shells : The physics of a ‘ping-pong’ ball. *Philosophical Magazine B*, 78(2) :225–233, August 1998.
- [7] Ludovic Pauchard, Yves Pomeau, and Sergio Rica. Déformation des coques élastiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIB - Mechanics-Physics-Chemistry-Astronomy*, 324(7) :411–418, April 1997.
- [8] Xian-Wan Zhang and T Yu. Experimental and Numerical Study on the Dynamic Buckling of Ping-pong Balls under Impact Loading. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 13, February 2012.

5 Annexes

5.1 Vitesses avant et après rebond

Sur les échelles de temps considérées, la vitesse de la balle est constante. On obtient donc la vitesse verticale d’incidence v_{y1} grâce à la pente de la courbe $y(t)$ avant rebond. Cela est représenté sur la figure 13.

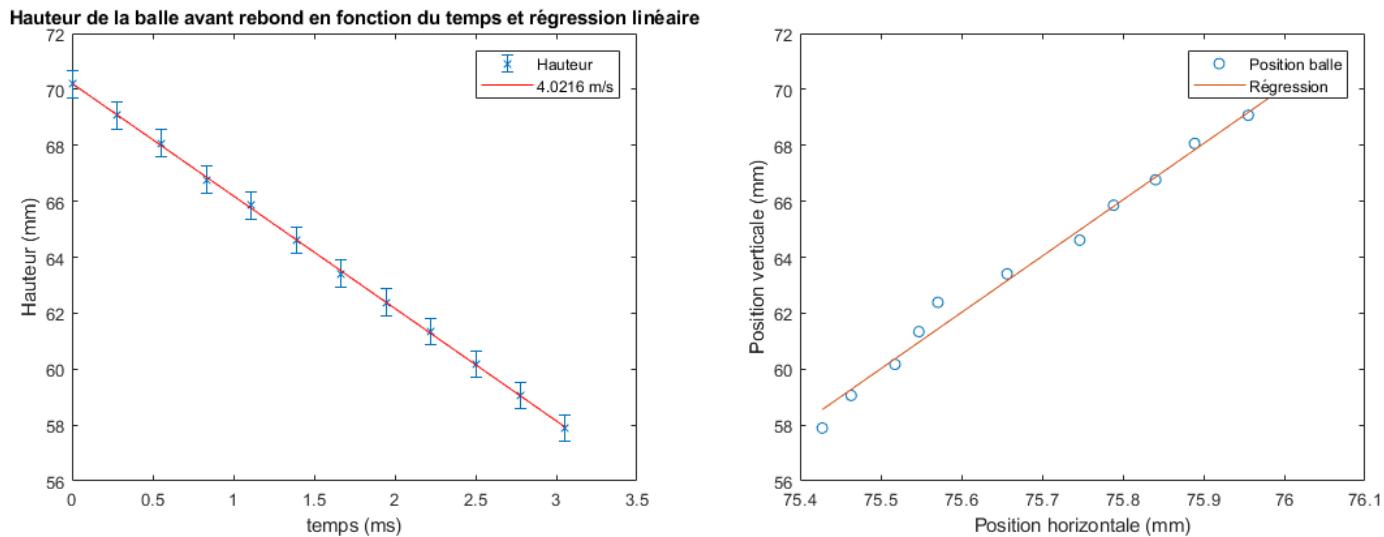


FIGURE 13 – À gauche : tracé de la hauteur de la balle en fonction du temps, avec la régression linéaire donnant la vitesse d’incidence. À droite : la trajectoire de la balle, conduisant à l’angle d’incidence.