

Expérience N° A5 : Mesures de forces pendant un choc

Groupe N° 68 : Lopes Nassia, Bolvin Ambre

19 septembre 2025 Adrien Gond

1 Question 1 : Estimation de la force pendant un choc

Approche ressort Lorsqu'une balle rebondit sur une surface rigide, elle se déforme brièvement. Il est possible d'approximer cette interaction en modélisant la balle comme un ressort soumis à une compression. La force exercée pendant le contact suit alors la loi de Hooke :

$$F(x) = -kx \quad (1)$$

où k est la constante de raideur effective de la balle et x la compression maximale subie pendant le choc. Lorsque la balle atteint la compression maximale x , toute son énergie cinétique a été convertie en énergie potentielle élastique :

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Il est possible d'isoler kx , ce qui correspond à la force maximale F_{\max} exercée par la table :

$$F_{\max} = kx = \frac{mv^2}{x} \quad (3)$$

La vitesse v juste avant l'impact peut s'obtenir par conservation de l'énergie mécanique. L'énergie potentielle de la balle à la hauteur h se transforme en énergie cinétique juste avant le contact avec le sol :

$$E_p = E_c \Rightarrow mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

En simplifiant par m , v vaut alors :

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Et en remplaçant pour une hauteur de chute de $h = 0.3$ m :

$$v = \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot 0.3} \approx 2.43 \text{ m/s} \quad (6)$$

En prenant la masse de la balle $m = 0.002 \text{ kg}$ et une compression estimée de $x = 1 \text{ mm}$, F_{\max} vaut alors :

$$F_{\max} = \frac{0.002 \cdot (2.43)^2}{0.001} \approx 11.8 \text{ N} \quad (7)$$

Cette valeur est bien supérieure au poids de la balle ($mg = 0.02 \text{ N}$), ce qui montre que la force pendant le rebond est due à la dynamique de l'impact et non à la simple pesanteur.

Approche impulsionale Une autre manière d'estimer la force maximale exercée lors d'un rebond consiste à utiliser le principe fondamental de la dynamique sous forme impulsionale. On considère que le changement de quantité de mouvement de la balle pendant le rebond est lié à une force moyenne exercée pendant une durée très courte de contact Δt . L'impulsion reçue par la balle s'exprime comme :

$$F_{\text{moy}} \cdot \Delta t = \Delta p = 2mv \quad (8)$$

En isolant F_{moy} :

$$F_{\text{moy}} = \frac{2mv}{\Delta t} \quad (9)$$

En prenant la masse de la balle $m=0.002$ kg, une vitesse $v \approx 2.43$ m/s (Eq. 6) et une durée estimée de contact Δt de 0.005 s, la force moyenne vaut alors :

$$F_{\text{moy}} = \frac{2 \cdot 0.002 \cdot 2.43}{0.005} \approx 1.94 \text{ N} \quad (10)$$

Cette valeur est bien supérieure au simple poids de la balle ($mg = 0.02$ N), mais inférieure à celle obtenue avec le modèle basé sur une compression de ressort. Cela s'explique par les hypothèses différentes sur la nature du contact : ici, une force moyenne sur une durée finie, tandis que l'approche ressort suppose une compression maximale instantanée.

2 Question 2 : Fonctionnement du matériel

Les capteurs piézoélectriques fournis (modèle Kistler 9132C) permettent de mesurer les forces appliquées entre deux plaques d'acier. Ces capteurs exploitent l'effet piézoélectrique, selon lequel certains cristaux génèrent une charge électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. La force appliquée sur le capteur induit ainsi une tension électrique proportionnelle, qui peut être amplifiée et numérisée.

Les trois capteurs sont montés entre deux plaques serrées par des vis avec un couple de 2 N·m, afin de les précontraindre. Cette précontrainte garantit un bon contact mécanique et un signal plus linéaire lors des petites variations de force.

Les signaux issus des capteurs sont transmis à un amplificateur de charge (type courant-tension) adapté aux capteurs Kistler. Cet amplificateur convertit la charge en une tension proportionnelle, plus facile à exploiter numériquement. Le capteur peut mesurer des accélérations jusqu'à ± 500 g, ce qui correspond à $\pm 500 \times 9.81 = \pm 4905$ m/s². Cela permet, selon la masse de l'objet mesuré, d'enregistrer des forces bien supérieures aux estimations de la question 1.

Les données sont ensuite numérisées par un ordinateur via un système d'acquisition haute fréquence. La fréquence d'échantillonnage est de l'ordre de plusieurs kHz, ce qui est nécessaire pour capter des rebonds très brefs. La précision de numérisation est de 24 bits, permettant une résolution fine des forces mesurées.

Le dispositif comprend également une balance de précision Mettle PE 6000 pour mesurer les masses exactes des balles et des poids.

3 Question 3 : Ordre de grandeur de la force maximale

D'après l'équation (3) il est possible d'obtenir la force maximale de référence F_{ref} à partir d'une compression estimée de $x = 1$ mm, d'une vitesse $v \approx 2.43$ m/s et des valeurs des masses de chacune des balles présentées en Table 1.

Balle	Masse [g]
Ping-pong	2.10 ± 0.05
Rebond noir	30.0 ± 0.5
Sagex	9.10 ± 0.05
Rebond brune	9.70 ± 0.05

TABLE 1 – Masse mesurée des différentes balles utilisées.

La valeur maximale des forces expérimentales F_{exp} à été prise pour chacune des balles au deuxième rebond. Celles-ci sont comparées aux valeurs de références estimées avec l'approche ressort dans la Table 2.

Balle	F_{ref} [N]	F_{exp} [N_e]
Ping-pong	12.4	16.0 ± 0.7
Rebond noir	177.1	59 ± 2
Sagex	53.7	20.6 ± 0.8
Rebond brune	57.2	23.9 ± 0.9

TABLE 2 – Comparaison entre les forces maximales de références et expérimentales pour quatre types de balles.

Les résultats présentés dans la Table 2 montrent que les forces maximales de références et expérimentales sont du même ordre de grandeur. Cependant les différences observées peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, l'estimation de référence repose sur une modélisation simplifiée du choc, supposant une compression uniforme de $x = 1$ mm et une durée de contact constante. En réalité, la compression réelle dépend fortement de la rigidité et de la géométrie de la balle, ce qui peut entraîner une force maximale bien plus élevée si la balle est très rigide (cas de la balle noire par exemple). De plus, les hypothèses simplificatrices telles qu'un choc parfaitement vertical, une vitesse d'impact uniforme et une absence d'amortissement ne sont pas strictement respectées dans l'expérience réelle, ce qui contribue aux écarts observés.

4 Question 4 : Étalonnage du système

L'étalonnage du système a été effectué en enregistrant la réponse des capteurs piézoélectriques pour différentes masses allant de 100 g à 3 kg, mesurées à l'aide d'une balance de précision. Pour chaque masse, le poids a été placé sur la plaque, puis le logiciel d'acquisition LabAmp a été utilisée. La sortie correspondant à la somme des trois capteurs a été enregistrée. Les mesures ont été analysées à l'aide du Jupyter notebook fourni. Une tranche stable des données (de l'index 300 000 à 500 000) a été sélectionnée pour calculer la moyenne et l'incertitude sur cette moyenne. Les poids ont été convertis en Newtons ($F = mg$), avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. La Figure 1 présente les données mesurées par le capteur (les "faux" Newtons) pour chaque masse et son poids en Newton correspondant.

La courbe d'étalonnage montre une relation linéaire donnée par $y = (0.94 \pm 0.02)x + (0.0 \pm 0.3)$ entre la force réelle et la valeur mesurée. Il est donc pertinent d'utiliser ce fit linéaire pour convertir les valeurs lues lors des mesures de rebond en forces réelles.

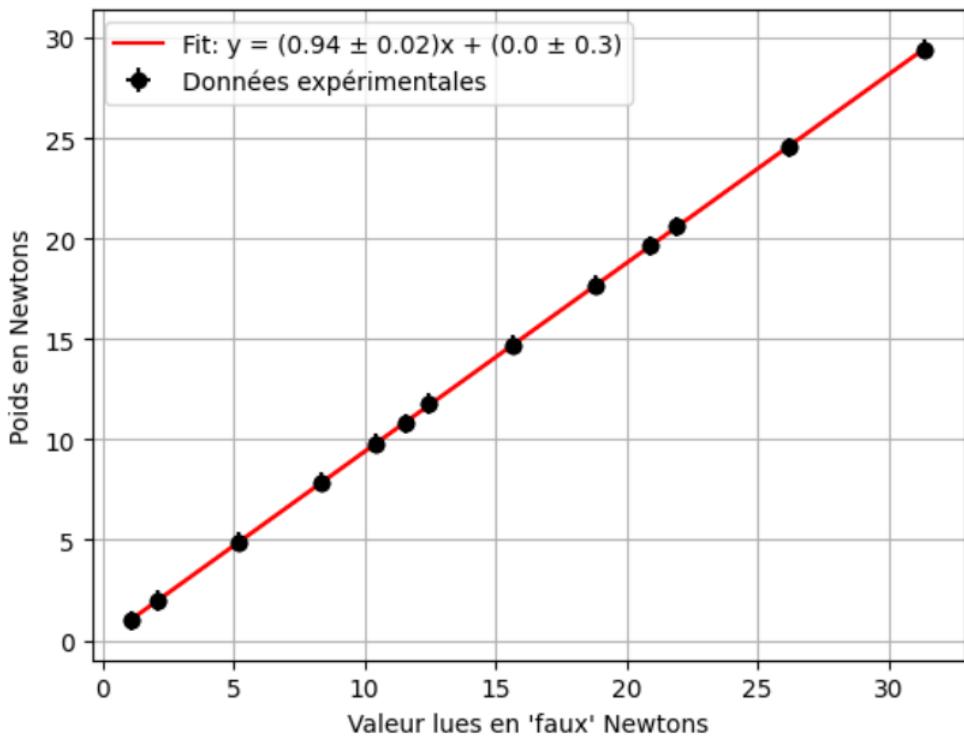


FIGURE 1 – Courbe d'étalonnage du système de mesure.

5 Question 5 : Caractéristique d'un choc

Des mesures sont effectuées pour trois rebonds successifs de différentes balles sur la plaque équipée d'un capteur piézoélectrique. Le cas de la balle de ping-pong est présenté en Figure 2, où la force étalonnée est représentée en fonction du temps. Un comportement similaire est observé pour les autres types de balles. La première figure illustre les trois rebonds successifs, caractérisés par l'apparition de pics étroits et abrupts. Les Figures 2b et 2c offrent un agrandissement sur la zone entourant le second rebond. Avant l'impact, les mesures sont proches de zéro et montrent de faibles oscillations négligeables (non visibles sur la figure). Une montée rapide du signal est ensuite observée, correspondant très probablement au moment où la balle entre en contact avec la plaque du capteur. Le début du choc est défini comme le moment où l'amplitude de la force dépasse significativement celle des fluctuations initiales. La force augmente brusquement, atteint un maximum, puis diminue progressivement jusqu'à s'annuler, avant de présenter de faibles oscillations autour de zéro.

L'apparition des oscillations en fin de choc peut s'expliquer par la configuration mécanique du capteur, monté entre deux plaques en acier. Ces plaques peuvent se comporter comme un système élastique équivalent à un ressort. Lors d'un choc, ce système subit une phase transitoire dynamique, se traduisant par des oscillations amorties autour de zéro dans le signal mesuré. En conséquence, la détermination précise de la fin du contact entre la balle et la plateforme n'est pas immédiate. Dans le cas de la balle de ping-pong, on observe que la force mesurée devient momentanément négative après avoir atteint zéro. En supposant que la balle est toujours en contact avec la plaque à cet instant, cela impliquerait soit qu'elle exerce une force dirigée vers le haut sur la plateforme (ce qui est physiquement incohérent), soit que la force de rappel exercée par le système capteur-structure dépasse la force exercée par la balle. Cette seconde hypothèse, bien que envisageable, rend complexe l'identification du temps exact de fin du contact sans connaître précisément la force de rappel impliquée. Ainsi, dans le cadre de cette étude, l'hypothèse que la balle perd le contact avec la plateforme à l'instant où la force mesurée devient

nulle est utilisée (voir Figure 2c).

Les incertitudes ne sont pas représentées sur les graphiques afin de ne pas nuire à leur lisibilité. L'incertitude sur la mesure du temps, liée à la résolution temporelle du capteur, est estimée à $\Delta t = 10^{-5}$ s. L'incertitude sur la force (mesurée en N_e , les newtons étalonnés) est déterminée par propagation des incertitudes à partir des résultats de la régression linéaire (voir Annexe 9.1).

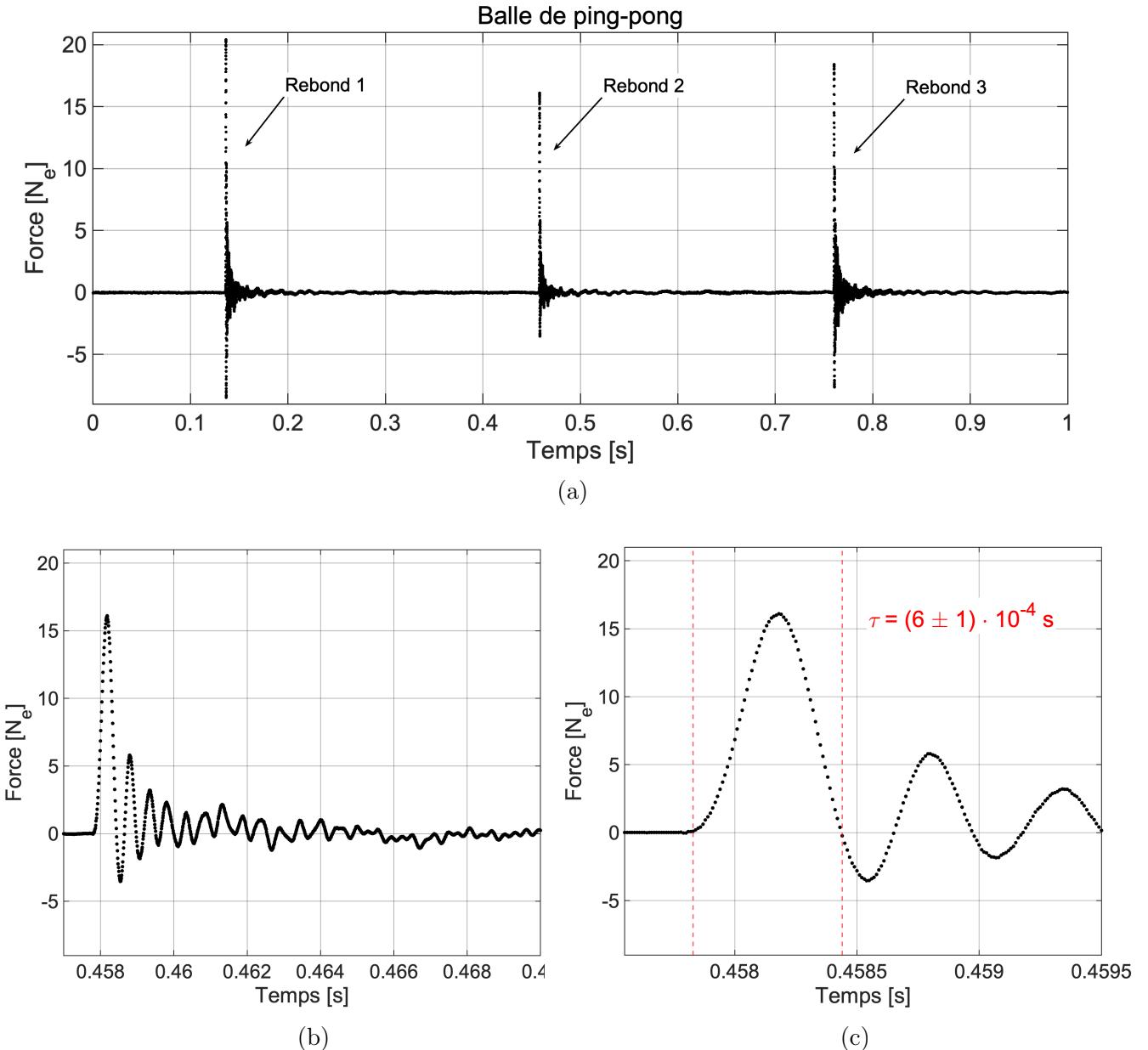


FIGURE 2 – Force en newtons étalonnés en fonction du temps d'échantillonnage : (a) enregistrement complet de trois rebonds successifs de la balle de ping-pong ; (b) et (c) détails autour du second rebond. Le panneau (c) inclut une estimation des bornes temporelles délimitant la phase de contact lors du choc et une évaluation de sa durée.

Comme mentionné précédemment, la même expérience a été réalisée pour trois autres types de balles. Étant donné que le comportement général des trois rebonds est similaire pour chaque balle, seule une vue rapprochée du second rebond est présentée en Figure 3. Une fois encore, les incertitudes ne sont pas représentées sur les graphiques afin de préserver la lisibilité des

courbes. Plusieurs différences peuvent être observées entre la forme du choc pour ces balles et celle de la balle de ping-pong. Le profil de la bosse est moins parabolique, plus aigu et présente des asymétries plus marquées. De plus, la force mesurée ne décroît pas directement jusqu'à zéro : des oscillations apparaissent avant même que la force atteigne cette valeur, et celles-ci ne sont amorties que progressivement par la suite.

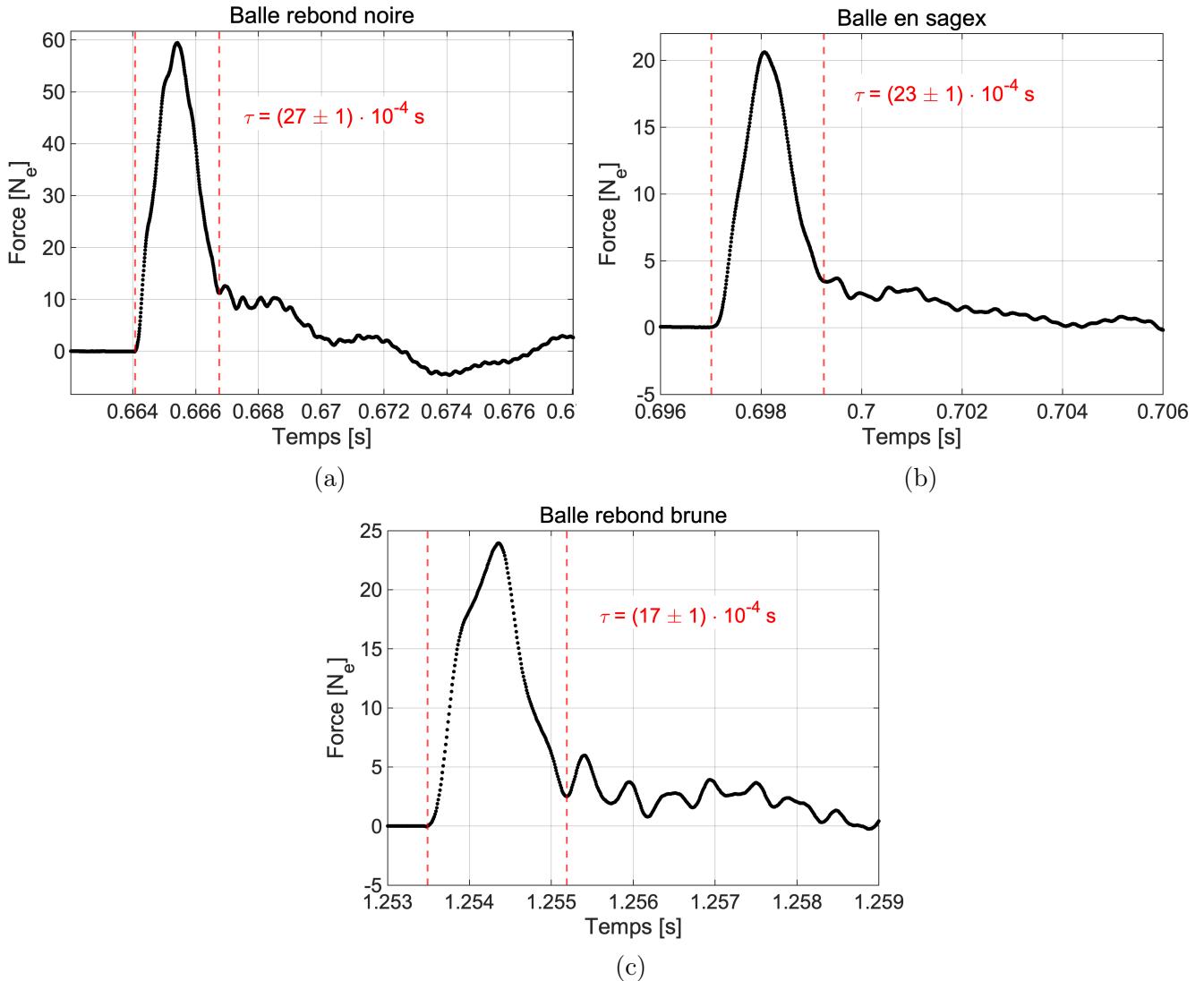


FIGURE 3 – Force en newtons étalonnés en fonction du temps d'échantillonnage, centrée sur le second rebond de la balle : (a) balle rebondissante noire, (b) balle en sagex, (c) balle rebondissante brune. Les bornes temporelles estimées délimitant la phase de contact et une évaluation de la durée du choc sont indiquées.

Pour l'estimation du début du choc, le même critère que précédemment est utilisé, à savoir le dépassement significatif des fluctuations initiales. En revanche, le critère basé sur une force nulle pour définir la fin du choc ne semble plus pertinent dans ce cas. En effet, les oscillations observées ne résultent pas directement de l'interaction entre la balle et la plateforme, mais sont dues à la perturbation de l'équilibre mécanique du capteur et de sa structure suite à l'impact. Le temps de fin du choc est donc défini ici comme l'instant correspondant au dernier point de la décroissance du signal, juste avant l'apparition de la première oscillation. Cette hypothèse devra toutefois être discutée et vérifiée à l'aide d'autres résultats. En effet, il est possible que la durée du choc soit sous-estimée si les oscillations propres au capteur perturbent la mesure,

masquant ainsi le moment réel où la balle quitte la plateforme.

D'autres remarques peuvent être formulées. Pour ces nouvelles balles, le temps de choc estimé est plus long que celui observé pour la balle de ping-pong. Cette différence peut s'expliquer par la nature des matériaux, généralement moins lisses et plus adhérents, ainsi que par une masse plus élevée. La masse semble également influencer la forme de la courbe de force : pour la balle rebondissante noire, la plus lourde, un palier autour de 10 N_e est observé avant que la force ne décroisse vers zéro. En revanche, pour les deux autres balles de masse similaire (plus proche de celle de la balle de ping-pong), la force oscille plus directement autour de zéro.

La Table 3 présente les estimations de la durée du choc pour chacune des balles étudiées. Dans le cadre de ces estimations, une incertitude sur le temps plus large que la résolution du capteur, 10^{-4} correspondant à 10 échantillons, a été retenue, afin de tenir compte des limitations méthodologiques et des ambiguïtés liées à la définition des instants de début et de fin du choc.

Balle	Ping-pong	Rebond noire	Sagex	Rebond brune
Estimation durée du choc [10^{-4} s]	6 ± 1	27 ± 1	23 ± 1	17 ± 1

TABLE 3 – Estimations de la durée de contact lors du second rebond pour différents types de balles.

Cette estimation de la durée du choc est utilisée pour calculer une force moyenne, obtenue comme la moyenne arithmétique des valeurs de force mesurées au sein de cet intervalle de temps :

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (11)$$

L'incertitude associée est estimée à partir de l'écart-type de l'échantillon, rapporté à la racine carrée du nombre de mesures (voir Annexe 9.1). Les résultats sont donnés en Table 4.

Balle	Ping-pong	Rebond noire	Sagex	Rebond brune
Estimation force moyenne [N_e]	8.2 ± 0.7	34 ± 1	10.7 ± 0.4	12.7 ± 0.6

TABLE 4 – Estimations de la force moyenne pendant le choc pour différents types de balles.

En supposant que la force maximale soit estimée à 2 à 3 fois la force moyenne, on peut conclure que l'ordre de grandeur prédit dans les questions 1 et 3 est cohérent. Toutefois, il convient de noter que ces approximations n'offrent qu'un ordre de grandeur, en raison de certaines incertitudes expérimentales. Par exemple, la hauteur n'a pas été mesurée de manière précise pendant l'expérience, et comme mentionné précédemment, le choix de l'intervalle représentant le choc n'a pas pu être parfaitement validé. Il est également à souligner que la première approximation, basée sur un modèle de force de rappel, est plus proche des données expérimentales que celle fondée sur l'argument de la quantité de mouvement.

6 Question 6 : Mesure des vitesses

L'objectif est d'estimer les normes des vitesses juste avant (v_1) et juste après (v_2) le choc. Pour cela, on suppose que, dans les intervalles séparant le premier et le second rebond, ainsi que le second et le troisième, la balle n'est soumise qu'à l'accélération gravitationnelle. Son mouvement peut donc être modélisé à l'aide des équations horaires du mouvement rectiligne

uniformément accéléré, en assimilant la balle à un point matériel. En choisissant un repère orienté vers le haut et en notant v_1 et v_2 les normes des vitesses respectivement juste avant et juste après le second rebond, on peut établir les relations suivantes :

$$a = -g = \text{cste} \Rightarrow v(t_1) = -g \cdot t_1 + v(t_1 = 0) \quad \text{et} \quad v'(t_2) = -g \cdot t_2 + v'(t_2 = 0) \quad (12)$$

où t_1 correspond au temps écoulé entre le premier et le deuxième rebond, et à celui entre le deuxième et le troisième rebond. Dans chaque cas, l'origine des temps $t_i = 0$ est prise immédiatement après le rebond précédent, respectivement le premier pour t_1 et le deuxième pour t_2 . On note désormais T_1 et T_2 les durées séparant respectivement le premier et le deuxième rebond, puis le deuxième et le troisième rebond. En supposant un mouvement symétrique par rapport au sommet de la trajectoire (mouvement rectiligne uniformément accéléré), on a alors $v(t_1 = 0) = v_1$ et $v(t_1 = T_1) = -v_1$ de même que $v'(t_2 = 0) = v_2$ et $v'(t_2 = T_2) = -v_2$. Ces relations permettent d'exprimer les vitesses d'intérêt en fonction des durées T_1 et T_2 .

$$\begin{aligned} v(T_1) = -v_1 &= -g \cdot T_1 + v_1 \Rightarrow v_1 = g \frac{T_1}{2} \\ v'(T_2) = -v_2 &= -g \cdot T_2 + v_2 \Rightarrow v_2 = g \frac{T_2}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

Il est désormais nécessaire d'estimer les grandeurs T_1 et T_2 . D'après les résultats précédents, on sait que le choc ne se produit pas à un instant ponctuel, mais s'étend sur une certaine durée. Pour évaluer les temps séparant chaque rebond, la méthode suivante est adoptée : pour chaque balle et pour chaque paire de rebonds, on calcule la moyenne des temps mesurés entre les instants estimés de début de choc, de fin de choc, ainsi que des pics de force maximale. La moyenne obtenue est notée \hat{T}_i , et son incertitude est estimée à l'aide de l'expression de l'incertitude sur une moyenne (voir Annexe 9.1). Cette méthode repose sur l'hypothèse que chaque choc présente une dynamique similaire en termes de début, maximum et fin. Les résultats correspondants sont présentés dans la Table 5.

Balle	Ping-pong	Rebond noire	Sagex	Rebond brune
$\hat{T}_1 [10^{-5} \text{ s}]$	32185 ± 1	41424 ± 2	37739 ± 6	31510 ± 1
$v_1 [\text{m/s}^2]$	$1.57867 \pm 5 \cdot 10^{-5}$	2.0318 ± 10^{-4}	$1.8511 \pm 3 \cdot 10^{-4}$	$1.54557 \pm 5 \cdot 10^{-5}$
$\hat{T}_2 [10^{-5} \text{ s}]$	30218 ± 2	33650 ± 6	31200 ± 100	27415 ± 1
$v_2 [\text{m/s}^2]$	1.4822 ± 10^{-4}	$1.6505 \pm 3 \cdot 10^{-4}$	$1.530 \pm 5 \cdot 10^{-3}$	$1.34471 \pm 5 \cdot 10^{-5}$
$P [\%]$	6.11 ± 0.01	18.77 ± 0.02	17.3 ± 0.3	13.000 ± 0.004

TABLE 5 – Estimation des durées entre les chocs \hat{T}_1 (entre le premier et le deuxième choc) et \hat{T}_2 (entre le deuxième et le troisième choc), calcul des normes des vitesses v_1 (avant le choc) et v_2 (après le choc), ainsi que du pourcentage de perte de vitesse, défini comme l'erreur relative de v_2 par rapport à v_1 .

La grandeur P permet d'estimer le pourcentage de perte de vitesse au cours du choc, en calculant l'erreur relative entre la vitesse juste avant (v_1) et juste après (v_2) l'impact. Les résultats montrent que la balle de ping-pong est celle qui conserve le plus de vitesse après le choc, ce qui se rapproche du comportement d'un choc élastique. À l'inverse, la balle rebondissante noire présente la plus forte perte relative. Il convient toutefois de souligner que, pour l'ensemble des balles étudiées, ces pertes demeurent relativement faibles (inférieures à 20%).

7 Question 7 : Changement de la quantité de mouvement

D'après la Table 6, l'intégrale de la force sur le temps est du même ordre de grandeur que le changement de quantité de mouvement et celle ci est bien du même ordre de grandeur que les valeurs de référence (voir Table 2)

Balle	Ping-pong	Rebond noire	Sagex	Rebond brune
$\int F(t)dt \approx \Delta t \sum F_i [\text{g}\cdot\text{m/s}]$	5.1 ± 0.2	93.4 ± 0.8	24.1 ± 0.7	21.8 ± 0.5
$\Delta p [\text{g}\cdot\text{m/s}]$	6.43 ± 0.05	110.5 ± 0.2	30.8 ± 0.2	27.7 ± 0.1

TABLE 6 – Estimation de l'intégrale de la force par rapport au temps ainsi que de la variation de la quantité de mouvement au cours du choc pour chacune des balles.

Cependant, il est tout de même possible d'observer que l'intégrale de la force est toujours inférieure au changement de quantité de mouvement. L'intégrale de la force a été obtenue avec matlab par la méthode des trapèzes en prenant un pas de temps uniforme de 10^{-5} . Les bornes d'intégrations ont été prises sur l'intervalle de temps déterminé en question 5, avant que les oscillations mesurées par le capteur n'interfère avec la mesure. Cela pourrait expliquer pourquoi l'intégrale sur la force est plus faible que la quantité de mouvement si l'intégrale n'a pas été calculée sur toute le durée du choc mais sur un intervalle de temps plus court ce qui entraînerait une sous estimation de sa valeur réelle.

8 Question 8 : Courbe $F(x)$

Estimation numérique de la position en fonction du temps. L'objectif est à présent d'évaluer la compression de la balle au cours du choc, en fonction du temps. Pour cela, on introduit un nouveau repère, illustré en Figure 4, dans lequel la variable x désigne la compression, définie comme le déplacement du centre de masse de la balle par rapport à sa position juste avant le contact. La démarche repose sur la connaissance de la force exercée pendant le choc, mesurée expérimentalement. En appliquant la deuxième loi de Newton, il est possible de déterminer l'accélération de la balle à chaque instant. Dans le repère adopté, la force exercée sur la balle est opposée à celle mesurée par le capteur. Par ailleurs, la vitesse initiale de la balle juste avant le choc, v_1 , a été estimée à partir des résultats précédents. Les relations suivantes peuvent être établies :

$$a_i = -\frac{F_i}{m} ; \quad v_0 = v_1 ; \quad x_0 = 0 \quad (14)$$

Étant donné que $a = \dot{v}$ et $v = \dot{x}$, ces dérivées peuvent être approximées localement à l'aide de différences finies. Cela permet de construire une relation de récurrence correspondant à un schéma explicite, permettant de déterminer successivement la vitesse, puis la position, à partir des valeurs obtenues à l'instant précédent.

$$\begin{aligned} v_{i+1} &= v_i + a_i \cdot \Delta t & 0 \leq i \leq n-1 \\ x_{i+1} &= x_i + v_i \cdot \Delta t & 0 \leq i \leq n-1 \end{aligned} \quad (15)$$

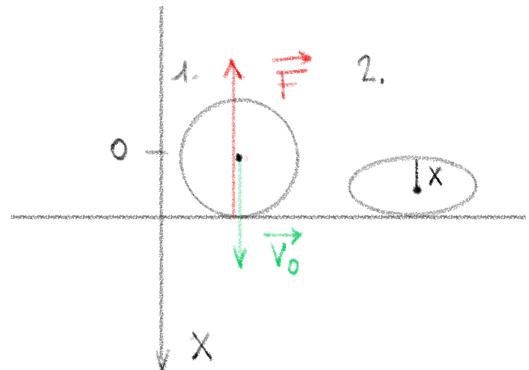


FIGURE 4 – Nouveau repère pour l'évaluation de la compression x de la balle par rapport à la position de son centre de masse juste avant l'impact.

Ce traitement est appliqué à chacune des balles étudiées sur l'intervalle de temps représentant le deuxième choc précédemment estimé. Un exemple des résultats obtenus pour la balle de ping-pong est présenté en Figure 5. Comme précédemment, les incertitudes ne sont pas représentées afin de préserver la lisibilité des graphes, celles-ci étant de faible amplitude.

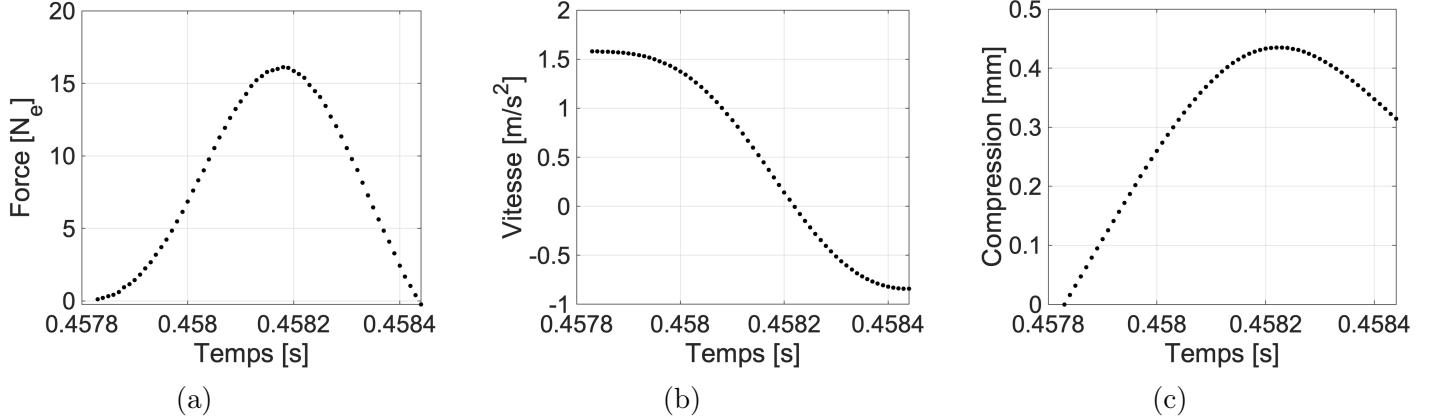


FIGURE 5 – Représentation de l'évolution temporelle de la force, la vitesse et la compression de la balle de ping-pong en utilisant le schéma numérique explicite.

Il peut déjà être observé que, dans le cas de la balle de ping-pong, la durée estimée du choc conduit à une compression qui ne revient pas à zéro à la fin de l'intervalle considéré. Cette observation fera l'objet d'une discussion ultérieure.

Compatibilité expérimentale avec un modèle de ressort linéaire. Les courbes représentant l'évolution de la force en fonction de la compression, pour chacune des balles étudiées, sont présentées en Figure 6. Les incertitudes, bien que présentes, ne sont pas affichées afin de ne pas nuire à la lisibilité des graphes, leur amplitude étant relativement faible.

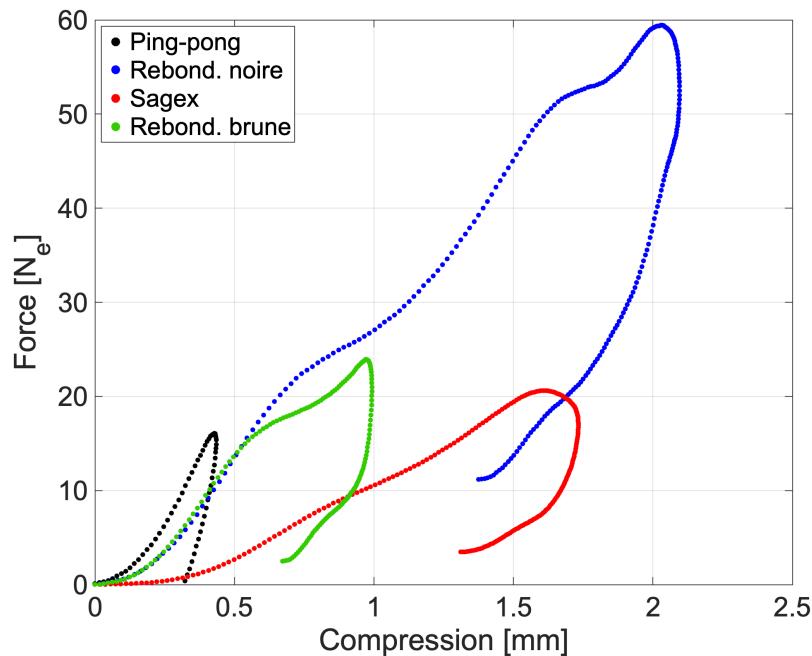


FIGURE 6 – Force en fonction de la compression.

Une première observation est qu'aucune des courbes obtenues ne revient à la position finale initiale, et que les trajectoires de compression et de décompression ne se croisent pas. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce comportement, qui seront discutées par la suite. Tout d'abord, la validité du modèle de ressort idéal utilisé pour estimer la force maximale en question 1 peut être évaluée. Le constat direct est qu'aucune des courbes expérimentales ne suit une loi linéaire de type $F = -kx$, caractéristique d'un ressort idéal.

La balle de ping-pong présente un comportement qui s'apparente à une évolution quadratique de la force durant la phase de compression. Toutefois, la position ne revient pas à sa valeur initiale lorsque la force mesurée devient nulle, ce qui suggère une déformation résiduelle. Pour les autres balles, la phase de compression peut, dans une certaine mesure, s'approcher d'un comportement linéaire, mais la phase de décompression suit une courbe différente, ce qui ne peut être totalement cohérent avec un ressort linéaire. La balle en Sagex semble avoir un comportement similaire à celui de la balle de ping-pong, dans le sens où elle semble se déformer irréversiblement sous l'effet de l'impact, sans retrouver sa forme initiale. En revanche, les courbes obtenues pour les deux balles rebondissantes présentent des caractéristiques plus proches de celles d'un ressort idéal. Une évolution de la force plus linéaire au cours de la phase de compression, un pic de force plus net marquant le point de rebroussement, ainsi qu'une phase de décompression plus rapide peuvent être observés.

Les résultats permettent également de déduire des conclusions énergétiques. En effet, le travail peut être mesuré par l'intégrale de la force sur la position de la compression, ainsi l'aire sous la courbe désignerait la quantité d'énergie dissipée lors du choc. En imaginant que les courbes soient prolongées jusqu'à $F = 0$, l'aire délimitée par la courbe force-compression reste non nulle pour l'ensemble des balles, ce qui suggère l'intervention de forces non conservatives lors du choc. Par ailleurs, la balle rebondissante noire, semble être celle pour laquelle la perte d'énergie mécanique est la plus importante, tandis que la balle de ping-pong apparaît comme celle qui conserve le plus d'énergie au cours de l'impact. Ces déductions sont cohérentes avec les estimations de perte P , présentées en Table 5.

Ces observations sont cohérentes avec la nature des matériaux constituant chaque balle. La balle de ping-pong, rigide et peu élastique, présente une faible déformation, mais celle-ci semble irréversible, comme en témoigne le fait que la position ne retourne pas à son état initial lorsque la force devient nulle. Le sagex, matériau plus fragile, subit une déformation plus importante et le rebroussement moins important laisse également supposer un comportement irréversible sous l'effet de l'impact. En revanche, les deux balles rebondissantes, vraisemblablement composées de caoutchouc, présentent des compressions plus marquées, à noter que la balle noire admettait un plus grand diamètre que la brune. Le caractère élastique du caoutchouc rend plausible une déformation réversible, ce qui est en accord avec la forme des courbes observées. Les valeurs précises des compressions maximales sont reportées en Table 7.

Balle	Ping-pong	Rebond noire	Sagex	Rebond brune
Compression maximale [mm]	$(435 \pm 2) \cdot 10^{-3}$	$(2100 \pm 9) \cdot 10^{-4}$	$(1700 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(992 \pm 1) \cdot 10^{-3}$

TABLE 7 – Compressions maximales obtenues pour les quatres balles.

Des tests complémentaires ont été réalisés pour la balle rebondissante noire en prenant un intervalle de temps de choc estimé plus important afin de voir l'impact de cette hypothèse sur les résultats obtenus. La Figure 7 regroupe les graphiques correspondants. D'après la Figure 7b il est possible de remarquer qu'il reste une force résiduelle d'un peu moins de $10 N_e$ après le choc alors qu'il serait plutôt attendu de revenir à une force et compression nulle. En effet, même en prenant un intervalle de temps plus long, la force ne revient quand même pas exactement à

zéro (Figure 7a). Ce problème provient probablement d'une imprécision au niveau du capteur qui ne se rétablit pas exactement après le choc ou du moins après un certain temps de latence. Cet effet est certainement lié à la masse de la balle.

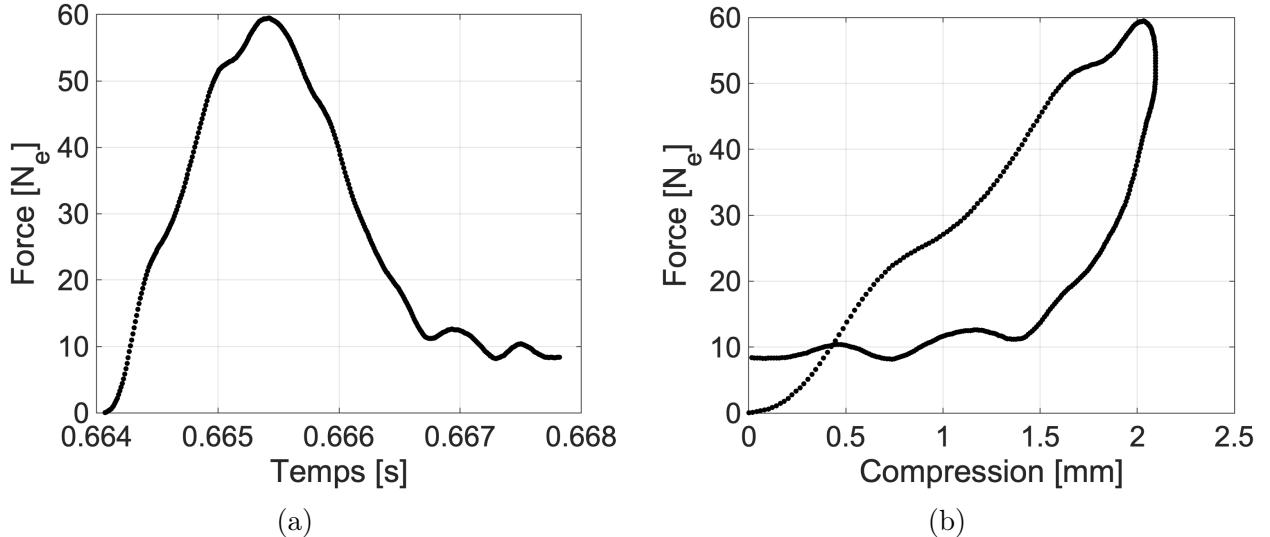


FIGURE 7 – Réitération du schéma explicite pour l'estimation de la force en fonction de la compression, en considérant un temps de fin de choc prolongé dans le cas de la balle rebondissante noire. (a) Évolution de la force en fonction du temps sur un intervalle de choc plus étendu. (b) Relation entre la force et la compression.

Ces considérations suggèrent que les estimations précédentes de la durée du choc pourraient conduire à une sous-estimation de celle-ci. En effet, dans le cas des balles rebondissantes, on s'attend à ce que la compression revienne à zéro à la fin du choc, ce qui n'est pas le cas avec la première hypothèse. Toutefois, le comportement observé au-delà du temps final précédemment estimé semble peu réaliste sur le plan physique. En particulier, une diminution de la compression alors que la force mesurée reste constante (voir Figure 7b) indique que les valeurs de force enregistrées après ce point sont probablement altérées par les oscillations propres au système de mesure, rendant les données non exploitables au-delà de ce seuil.

Piste de vérification expérimentale supplémentaire. Une autre expérience pour confirmer la forme fonctionnelle de $F(x)$ pourrait consister à comprimer statiquement les balles à l'aide d'un banc de compression muni d'un capteur de force (comme une presse avec dynamomètre), et mesurer la force appliquée pour différentes compressions imposées. Cela permettrait d'obtenir une courbe $F(x)$ indépendante des effets dynamiques.

Concernant les comparaisons avec la littérature, des essais quasi-statiques menés sur le matériau constitutif des balles de ping-pong ont permis d'estimer un module de Young de l'ordre de 2.4 GPa et une contrainte d'écoulement de 47 MPa [1]. Cela est cohérent avec une réponse mécanique quasi-linéaire dans la gamme de déformations observées expérimentalement. À l'inverse, les balles en caoutchouc ou en mousse présentent des modules beaucoup plus faibles, typiquement dans la gamme 0.01 – 0.1 MPa, ce qui explique une courbe $F(x)$ plus étalée et non linéaire.

En conclusion, la forme des courbes $F(x)$ obtenues expérimentalement est cohérente avec les attentes théoriques. Bien que certaines hypothèses (compression pure, absence de frottement, durée de contact estimée) puissent introduire une incertitude, les ordres de grandeur observés sont compatibles avec les résultats de la littérature.

9 Annexes

9.1 Calculs d'incertitudes

Incertitudes sur les mesures La Table 8 présente les incertitudes des grandeurs mesurées de l'expérience.

Grandeur mesurée	Incertitude
Temps [s]	10^{-5}
Masse (<10g) [g]	0.05
Masse (>10g) [g]	0.5
Mesures du capteur piezoélectrique [N_m]	0.5% de la valeur mesurée

TABLE 8 – Incertitudes sur les grandeurs mesurées.

Propagation des incertitudes Les incertitudes suivantes sont établies en utilisant la formule de propagations des incertitudes.

1. Incertitude sur la force F en Newton étalonné, où F_m représente la mesure obtenue avec le capteur piézoélectrique et la régression est donnée par $F = a \cdot F_m + b$:

$$\Delta F = |N_m| \Delta a + \Delta b + |a| \Delta F_m \quad (16)$$

2. Incertitude sur la vitesse v_i et la position x_i discrétilisées déterminée par le schéma explicite :

$$\Delta a_i = \frac{\Delta F_i}{m} + \frac{|F_i|}{m^2} \cdot \Delta m \quad (17)$$

$$v_i = v_0 + \Delta t \sum_{j=0}^{i-1} a_j \quad x_i = x_0 + \Delta t \sum_{j=0}^{i-1} v_j \quad (18)$$

$$\Delta v_i = \Delta t \cdot \sum_{j=0}^{i-1} |\Delta a_j| \quad (19)$$

$$\Delta x_i = \Delta t \cdot \sum_{j=0}^{i-1} |\Delta v_j|$$

Incertitude sur la moyenne arithmétique d'une grandeur G

$$\Delta \bar{G} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \text{avec } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \quad (20)$$

Références

- [1] Ruan, H., et al. (2006). Quasi-static mechanical characterization of table tennis balls.
<https://www.scielo.br/j/lajss/a/X9tQFTZDcJhR59bDHGh4kpd/?lang=en>
- [2] A5 : Mesures de forces pendant un choc, EPFL.