

L'objectif est de caractériser différents mouvements de chute, soit à partir d'un pointage de positions, soit par une mesure directe de vitesse, afin d'en déduire les forces exercées lors de ces chutes.

Matériel à disposition

Balle de squash
Règle graduée magnétique
Support avec pince
Eprouvette remplie de glycérol
Billes en verre calibrées
Balance précise au 0,01 g
Mètre ruban
Chronomètre

Partie A. Chute libre

On étudie le mouvement d'une balle lâchée dans le champ de pesanteur. On se placera au tableau du professeur en utilisant une règle magnétique jaune comme étalon.

- ☐ Fixer le téléphone face à la scène parallèlement au plan du mouvement, à une distance suffisante pour voir l'intégralité de la scène.
- ☐ Assurer la verticalité de l'appareil grâce à une application accédant à l'accéléromètre. On peut utiliser par exemple l'outil *Inclinaison* de l'application *phyphox*, en mode *vertical* : les deux angles doivent être le plus possible de 0.
- ☐ Filmer la chute avec une fréquence suffisamment élevée (60 images par seconde). Transférer le fichier sur l'ordinateur.
- ☐ Pointer le mouvement du centre de la balle à l'aide du logiciel *Tracker*.
- ☐ Copier le tableau de valeurs dans le tableur *Regressi*. Calculer la vitesse verticale v dans le tableur en utilisant l'outil *Dérivée*.
- ☐ Tracer le graphe de $v = f(t)$. Proposer une modélisation de ce graphe.
- ☐ Peut-on considérer la chute comme libre ? En déduire la valeur de g . Proposer une interprétation à l'écart avec la valeur de référence $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Partie B. Chute dans un fluide visqueux

On étudie le mouvement d'une bille sphérique lâchée dans une éprouvette remplie de glycérol. Elle tombe sous l'effet de la pesanteur mais est freinée par les frottements du fluide.

Lorsqu'un solide sphérique de rayon R se déplace dans un fluide visqueux avec la vitesse $\vec{v}$, le fluide exerce sur lui une force de traînée donnée par la **loi de Stokes** :

$$\vec{F} = -6\pi\eta R \vec{v}$$

où η est la **viscosité dynamique** du fluide.

On note R le rayon de la bille, ρ la masse volumique de la bille, ρ_g la masse volumique du glycérol.

(*) Établir l'équation différentielle vérifiée par la vitesse de la bille. Montrer qu'elle se met sous la forme :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{\tau} \vec{v} = \frac{1}{\tau} \vec{v}_\ell \quad \text{où } \tau = \frac{2\rho R^2}{9\eta} \quad \text{et } \vec{v}_\ell = \frac{2(\rho - \rho_g)R^2}{9\eta} \vec{g}$$

Dans un fluide suffisamment visqueux comme le glycérol, τ est très faible devant la durée de la chute. On peut ainsi considérer le régime permanent atteint quasi immédiatement.

- ☐ Proposer un protocole permettant de déterminer la viscosité dynamique du glycérol. On donne sa masse volumique : $\rho_g = 1,26 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
- ☐ Après accord du professeur, réaliser la mesure avec des billes de diamètre 4 mm. On répètera la mesure 10 fois afin d'évaluer les incertitudes de mesure par une méthode de type A.
- ☐ Vérifier par le calcul que le temps τ est négligeable devant la durée de la chute.

Partie C. Chute dans l'air (à faire à la maison si le temps manque)

On étudie le mouvement d'un volant de badminton dans l'air. On le modélise par les actions mécaniques suivantes : son poids $\vec{P}$ et une force de contact avec l'air $\vec{F}$. Le but de cette partie est déterminer les propriétés de cette force, notamment son expression en fonction de la vitesse.

D'après la deuxième loi de Newton : $m\vec{a}_G = m\vec{g} + \vec{F}$, ce qui permet d'exprimer la force massique de contact de l'air :

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} = \vec{a}_G - \vec{g} = \vec{a}_G + g\vec{e}_y$$

On a filmé le mouvement dans un gymnase en mode ralenti (video « bad.mp4 » accessible sur [cahier-de-prepa](https://cahier-de-prepa.fr)). Le pointage a été effectué et la trajectoire a été lissée. L'ensemble des instants et des positions lissées est fourni dans l'activité numéro **0156-1388778** sur le site <https://capitale2.ac-paris.fr> (tableaux numpy t , x et y).

❑ Démarrer l'activité et afficher le graphe des points expérimentaux.

Pour obtenir les vecteurs vitesse et accélération au cours du mouvement, il faut réaliser une dérivation à partir de valeurs discrètes, qui est une approximation de la dérivée réelle. Pour un ensemble de dates $\{t_i\}$ et de positions $\{x_i\}$, la dérivée discrète à l'instant t_i s'écrit :

$$\frac{dx}{dt}(t_i) = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

❑ Écrire une fonction Python réalisant la dérivée discrète d'une liste x par rapport à une liste de même taille t . Elle prendra comme arguments les deux listes t et x et renverra une liste contenant les valeurs des dérivées.

On remarque que cette dérivée n'est pas définie pour tous les points. En quels points n'est-elle pas définie ?

❑ En utilisant cette fonction, obtenir les coordonnées des vecteurs vitesse (tableaux vx et vy) et accélération (tableaux ax et ay), ainsi que de la force massique $\vec{f}$ (tableaux fx et fy). On fera attention aux points non définis lors de la dérivation.

❑ Exécuter la cellule suivante de l'activité. La trajectoire est tracée ainsi que le vecteur $\vec{f}$ en quelques points. La force de l'air est-elle une force de frottement opposée au mouvement ? Si non, proposez une explication.

❑ La cellule suivante affiche le graphe du module de la force en fonction du module de la vitesse. Le graphe est en échelle log-log. Ainsi une loi de puissance $f = kv^\alpha$ apparaît dans ce graphe comme une droite de pente α : $\log(f) = \log(k) + \alpha \log(v)$. Peut-on considérer que la force est une loi de puissance ?

❑ En pratique, $\alpha = 1$ ou 2 . Pour déterminer α ainsi que k , on trace les courbes théoriques dans la cellule suivante. Quelle est la valeur de α ? Ajuster la valeur de k afin d'obtenir un bon accord entre théorie et expérience.