Activités de la séquence n°9
Lien entre forces exercées et mouvement

Fiches de synthèse mobilisées :

Fiche n°7 : mouvements : position, vitesse et accélération
Fiche n°8 : forces et interactions
Fiche n°9 : les lois de Newton

Sommaire des activités

ACTIVITÉ 1 : le projectile est-il en chute libre ?

DOCUMENT : le modèle de la chute libre

La chute libre est un modèle qui suppose que la seule force exercée par le système étudié est son poids. Les lois de Newton permettent alors d'établir que, dans ce cas, le vecteur -accélération est :
- de direction verticale ;
- orienté vers le bas ;
- de valeur égale au champ de pesanteur terrestre $g = 9{,}81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Expérience : on a réalisé trois films :
- film 1 : la chute sans vitesse initiale d'une balle de tennis ;
- film 2 : la chute sans vitesse initiale d'une balle issue d'une « piscine à balles » ;
- film 3 : la chute d'une balle de ping-pong lancée vers le haut de manière oblique.

1. Intuitivement : à votre avis, chacun des trois mouvements filmés peut-il être modélisé par la chute libre ?

1ère partie : étude d'une chute verticale

2. Choisir une des vidéos parmi les films 1 et 2. Avec un logiciel dédié, réaliser le pointage des positions du centre de la balle dans le repère qui semble être le plus simple pour l'étude.

3. Créer une grandeur de symbole « v_y », représentant la coordonnée verticale de la vitesse de la balle. Afficher la représentation de v_y en fonction du temps.

4. Sans faire de calcul, répondre qualitativement à la question posée en préambule : a priori, la chute libre est-elle satisfaite par le mouvement étudié dans sa totalité, en partie seulement ou pas du tout ? Justifier à l'aide du graphique obtenu.

5. Pour évaluer la validité du modèle de la chute libre, modéliser la courbe (ou une partie de la courbe) représentant v_y en fonction du temps par une fonction judicieusement choisie (et préciser laquelle). Évaluer la pertinence du modèle testé en exploitant les indications données par le logiciel.

6. Exploiter l'une des indications données par le logiciel pour déterminer la coordonnée verticale a_y du vecteur-accélération de la balle.

7. Exploiter les résultats obtenus pour discuter la validité, dans le cas étudié, du modèle de la chute libre.

2nde partie : étude d'une balle lancée

8. Reprendre les questions 3 à 7 de la partie précédente, avec le film n°3.
9. Sur le même repère, représenter l'évolution en fonction du temps de la coordonnée *horizontale* v_x du vecteur-vitesse de cette balle. Quelle évolution obtient-on ? Que signifie physiquement ce résultat ?
10. Déduire de ce qui précède le sens et la direction du vecteur-accélération de la balle étudiée.
11. À quelle position particulière correspond la date à laquelle la courbe représentant $v_y(t)$ coupe l'axe des abscisses ? La réponse sera justifiée à l'aide de schémas représentant le vecteur-vitesse de la balle à plusieurs dates judicieusement choisies.
12. Exploiter le logiciel afin de mesurer :
    – la valeur de vitesse initiale de la balle ;
    – l'angle de tir par rapport à l'horizontale.

ACTIVITÉ 2 : comment lancer le marteau le plus loin possible ? – version tableur

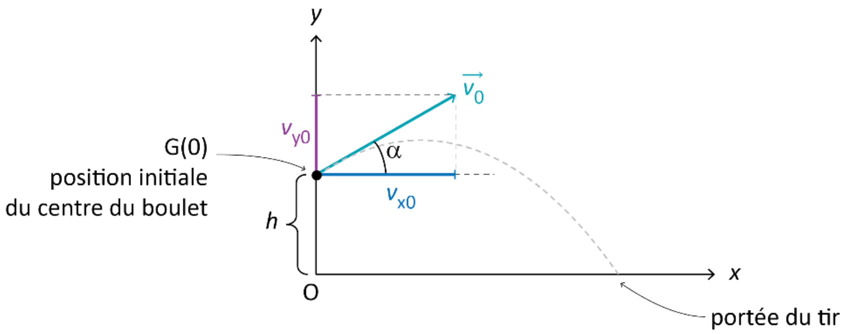
Le lancer du marteau est une discipline de l'athlétisme qui consiste à lancer un boulet en acier le plus loin possible. Le boulet est fixé à un câble en acier relié à une poignée. Dans la version féminie de cette discipline, le boulet a une masse de 4 kg et est relié à un câble de longueur 1195 mm.

Le but de cette activité est de répondre à la question suivante :
Si l'on admet que l'action de l'air sur le marteau est négligeable, avec quelle inclinaison la lanceuse a-t-elle intérêt à le lancer pour qu'il retombe le plus loin possible ?

Dans ce but nous allons :
– établir les lois horaires exprimant la position du marteau pendant sa chute ;
– programmer un tableur pour étudier les variations de la portée du tir en fonction de l'inclinaison de la vitesse initiale.

1ère partie : établissement des lois horaires

La situation est modélisée ainsi :
– le système étudié est le boulet, après que le câble a quitté la main de la lanceuse (instant pris comme origine des dates), dans le référentiel terrestre supposé galiléen ;
– après que le câble a quitté la main de la lanceuse, le boulet a un mouvement de chute libre ;
– à la date $t = 0$, le centre d'inertie du boulet a une altitude h au-dessus du sol ;
– ses positions sont étudiée dans un repère (O, x, y) défini sur la figure ci-dessous ;
– la vitesse initiale du boulet est notée v_0 et est inclinée d'un angle noté α avec l'axe (Ox).



Détermination des conditions initiales

1. Exprimer en fonction des données les coordonnées initiales $x(0)$ et $y(0)$ du vecteur-position du centre du boulet.
2. Exprimer, en fonction de v_0 et α, les coordonnées initiales $v_x(0)$ et $v_y(0)$ du vecteur-vitesse du centre du boulet.

Exploitation de la 2ème loi de Newton

3. En appliquant la 2ème loi de Newton au boulet, exprimer les deux coordonnées a_x et a_y du vecteur-accélération de son centre d'inertie dans le repère décrit précédemment.

4. Rappeler les relations entre les coordonnées du vecteur-accélération et celles du vecteur-vitesse et en déduire, à toute date t, les expressions des coordonnées du vecteur-vitesse $v_x(t)$ et $v_y(t)$.
5. Rappeler les relations entre les coordonnées du vecteur-vitesse et celles du vecteur-position et en déduire, à toute date t, les expressions des coordonnées de position $x(t)$ et $y(t)$.
6. Comment peut-on qualifier le mouvement selon l'axe horizontal (Ox) ? selon l'axe vertical (Oy) ?

2ème partie : étude de l'influence de l'angle de tir par simulation

Lors de l'établissement du record de son record du monde de lancer du marteau, le fil a quitté la main de quitte la main de la lanceuse Anita Włodarczyk lorsque le centre du boulet avait une altitude de valeur $h = 3{,}0$ m et une vitesse de valeur $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Notre objectif est de reconstituer la trajectoire alors suivie par le boulet à l'aide des relations établies dans la partie précédente.

Travail à réaliser avec un tableur :

– Ouvrir la feuille calcul « Act2_marteau_ELEVE ».
– Compléter les cellules A4 et A7 avec les valeurs correspondant au record du monde d'Anita Włodarczyk.
– Le but étant de tracer la trajectoire du boulet pour plusieurs valeurs de l'angle afin de déterminer sa valeur optimale, fixer celui-ci à la valeur $\alpha = 10°$ (cellule A10). La conversion en radian s'effectue automatiquement dans la cellule A13 (attention c'est l'unité utilisée par défaut par les tableurs lors du calcul des fonctions cosinus, sinus et tangente).
– Dans les colonnes D et E, saisir les formules de calcul permettant d'itérer les relations établies aux questions 4 et 5 pour le calcul de $x(t)$ et $y(t)$. La trajectoire du boulet (représentation de y en fonction de x) s'affiche automatiquement dans un repère qui exclut les valeurs négatives de y.

Exploitation de la trajectoire simulée

7. Utiliser cette feuille de calcul pour déterminer l'angle de tir permettant d'obtenir la portée la plus importante possible pour avec une vitesse initiale de $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Que vaut cette portée ?
8. Le record du monde de Anita Włodarczyk est de 82,98 m : ce n'est pas exactement celui obtenu à la question précédente. Proposer au moins deux hypothèses expliquant cet écart.

ACTIVITÉ 3 : comment lancer le marteau le plus loin possible ? – version Python

Le lancer du marteau est une discipline de l'athlétisme qui consiste à lancer un boulet en acier le plus loin possible. Le boulet est fixé à un câble en acier relié à une poignée. Dans la version féminie de cette discipline, le boulet a une masse de 4 kg et est relié à un câble de longueur 1195 mm.

Le but de cette activité est de répondre à la question suivante :
Si l'on admet que l'action de l'air sur le marteau est négligeable, avec quelle inclinaison la lanceuse a-t-elle intérêt à le lancer pour qu'il retombe le plus loin possible ?

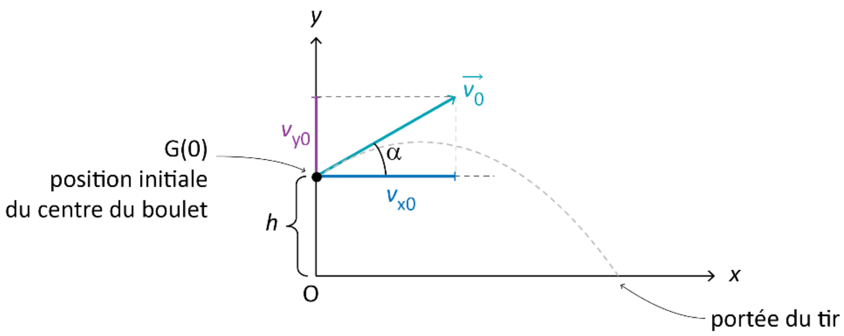
Dans ce but nous allons :

– établir les lois horaires exprimant la position du marteau pendant sa chute ;
– programmer un tableur pour étudier les variations de la portée du tir en fonction de l'inclinaison de la vitesse initiale.

1ère partie : établissement des lois horaires

La situation est modélisée ainsi :

– le système étudié est le boulet, après que le câble a quitté la main de la lanceuse (instant pris comme origine des dates), dans le référentiel terrestre supposé galiléen ;
– après que le câble a quitté la main de la lanceuse, le boulet a un mouvement de chute libre ;
– à la date $t = 0$, le centre d'inertie du boulet a une altitude h au-dessus du sol ;
– ses positions sont étudiée dans un repère (O, x, y) défini sur la figure ci-dessous ;
– la vitesse initiale du boulet est notée v_0 et est inclinée d'un angle noté α avec l'axe (Ox).



Détermination des conditions initiales

1. Exprimer en fonction des données les coordonnées initiales $x(0)$ et $y(0)$ du vecteur-position du centre du boulet.
2. Exprimer, en fonction de v_0 et α, les coordonnées initiales $v_x(0)$ et $v_y(0)$ du vecteur-vitesse du centre du boulet.

Exploitation de la 2ème loi de Newton

3. En appliquant la 2$^{\text{ème}}$ loi de Newton au boulet, exprimer les deux coordonnées a_x et a_y du vecteur-accélération de son centre d'inertie dans le repère décrit précédemment.
4. Rappeler les relations entre les coordonnées du vecteur-accélération et celles du vecteur-vitesse et en déduire, à toute date t, les expressions des coordonnées du vecteur-vitesse $v_x(t)$ et $v_y(t)$.
5. Rappeler les relations entre les coordonnées du vecteur-vitesse et celles du vecteur-position et en déduire, à toute date t, les expressions des coordonnées de position $x(t)$ et $y(t)$.
6. Comment peut-on qualifier le mouvement selon l'axe horizontal (Ox) ? selon l'axe vertical (Oy) ?

2$^{\text{ème}}$ partie : étude de l'influence de l'angle de tir par simulation

Lors de l'établissement du record de son record du monde de lancer du marteau, le fil a quitté la main de quitte la main de la lanceuse Anita Włodarczyk lorsque le centre du boulet avait une altitude de valeur $h = 3{,}0$ m et une vitesse de valeur $29\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Notre objectif est de reconstituer la trajectoire alors suivie par le boulet à l'aide des relations établies dans la partie précédente.

Travail à réaliser avec un programme Python :

– Ouvrir le programme « Act2_marteau_ELEVE.py ». Ce programme est écrit pour tracer la trajectoire d'un projectile mais il reste à fixer les conditions initiales et à saisir les formules permettant le calcul des coordonnées de position. L'angle de tir α sera modifiable à l'aide d'un curseur (cette partie est déjà programmée).
– Les variables « h » et « v0 » contiennent les valeurs de la hauteur (en m) et de la vitesse initiale (en m/s) du projectile. Compléter les lignes 29 et 30 avec les valeurs de h et v_0 correspondant au record du monde d'Anita Włodarczyk.
– Lignes 37 et 42, saisir les formules de calcul permettant le calcul des valeurs de x et y à l'aide des relations établies à la question 5 en tenant compte des indications ci-dessous.

Quelques précision sur le code Python à saisir :

– « t » est une liste contenant les valeurs des dates, exprimées en s.
– La saisie d'une relation du type « x = f(t) » ou f(t) est une expression en fonction de t génère alors une liste « x » contenant autant de valeurs que la liste « t ».
– La variable correspondant à l'angle de tir est appelée « alpha ».
– Les fonctions sinus et cosinus sont appelées par les instructions « np.cos » et « np.sin ».

Exploitation de la trajectoire simulée

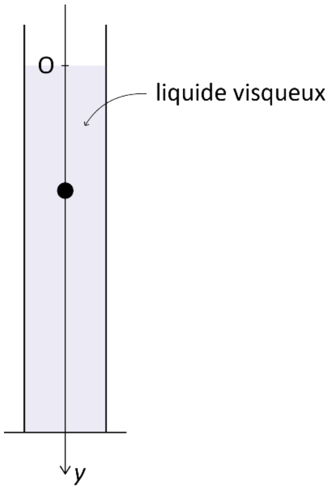
7. Exécuter ce programme et modifier l'angle de tire avec le curseur afin d'obtenir la portée la plus importante possible pour avec une vitesse initiale de $29\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Que vaut cette portée ? Que vaut alors l'angle de tir ?
8. Le record du monde de Anita Włodarczyk est de 82,98 m : ce n'est pas exactement celui obtenu à la question précédente. Proposer au moins deux hypothèses expliquant cet écart.

ACTIVITÉ 4 : étude d'une chute non libre

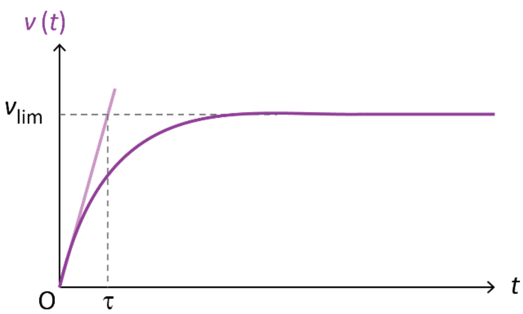
Un saut en parachute est toujours précédé d'une phase que les adeptes appellent « chute libre » : il ne s'agit pourtant pas d'une chute libre au sens de la physique, puisque la force de frottement exercée par l'air sur le sauteur est non négligeable, si bien que sa vitesse atteint rapidement une valeur seuil appelée « vitesse limite ».
Pour apprendre à identifier et évaluer les grandeurs caractéristiques d'une telle chute non libre, nous allons étudier le mouvement d'une bille métallique en chute dans un liquide visqueux.

Expérience :

– Une bille métallique est lâchée sans vitesse initiale dans une éprouvette remplie d'un liquide visqueux (mélange eau + glycérol). Son mouvement est filmé.
– Avec un logiciel dédié, réaliser le pointage des positions successives du centre de la bille, dans un repère d'axe (Oy), orienté vers le bas et dont l'origine coïncide avec la position initiale du point étudié.



1. Rappeler la relation permettant le calcul des valeurs de la vitesse du centre de la bille, à partir des valeurs de sa coordonnée de position $y(t)$.
2. Exploiter les fonctionnalités du logiciel utilisé pour créer une grandeur « v » correspondant à la vitesse de la bille (si le logiciel de pointage utilisé ne le permet pas, exporter les valeurs de t et y dans un tableur).
3. Représenter graphiquement l'évolution de la vitesse en fonction du temps.
4. Quelle serait l'allure de ce graphique si la bille était en chute libre (au sens de la physique) ?
5. On peut décomposer ce mouvement en deux phases : qualifier le mouvement de la bille pour chacune d'elles.
6. Faire un schéma des forces exercées sur la bille pour chacune de ces phases.
7. Exploiter le graphique obtenu pour mesurer la vitesse limite atteinte par la bille : on appelle ainsi la vitesse constante qu'elle finit par atteindre.
8. Lors d'une chute « non libre » on définit la constante de temps, notée τ, comme indiqué sur le graphique ci-dessous :



9. Exploiter le logiciel utilisé pour obtenir le graphique représentant $v(t)$ pour mesurer la constante de temps pour le mouvement étudié.

ACTIVITÉ 5 : l'expérience de Millikan : étude théorique et simulation

Robert Andrews Millikan a reçu n 1923 le prix Nobel de Physique pour avoir mis en évidence et mesuré la charge électrique élémentaire : il a en effet prouvé que des gouttes d'huile électrisées portaient une charge dont la valeur était toujours un multiple entier d'une même valeur : la charge élémentaire.
L'expérience qui l'a conduit à ce résultat est restée célèbre sous le nom « d'expérience de Millikan ». Il a pulvérisé des gouttes d'huile, les a électrisées avant de les introduire dans un condensateur plan où régnait un champ électrostatique uniforme. C'est l'étude de leur mouvement de chute dans ce condensateur qui lui a permis de déterminer leur charge électrique.

Le but de cette activité est d'étudier théoriquement le mouvement d'une goutte d'huile dans le condensateur de Millikan, puis de programmer en langage Python un simulateur illustrant son expérience.

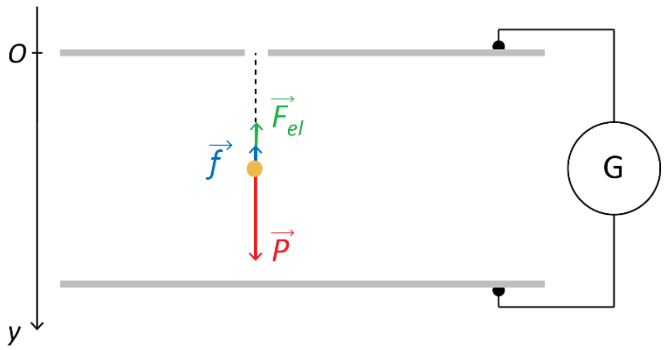
DONNÉES UTILES :

- masse volumique de l'huile : $\rho = 850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- viscosité de l'air : $\eta = 1{,}81 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- champ de pesanteur terrestre : $g = 9{,}81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

1ère partie : étude théorique de l'expérience de Millikan

On modélise ainsi le mouvement d'une goutte d'huile dans le condensateur de Millikan :

- Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre, supposé galiléen.
- Le système étudié est la goutte d'huile, portant une charge électrique **négative** notée q et supposée avoir une forme sphérique de rayon r.
- À la date $t = 0$ elle pénètre dans le condensateur sans vitesse initiale.
- On néglige la poussée d'Archimède exercée par l'air sur la bille. Celle-ci est donc soumise à trois forces : son poids, la force électrostatique et la force de frottement visqueux exercée par l'air d'expression :
$$\vec{f} = -6\pi\eta r\vec{v}$$
η étant la viscosité de l'air.



1. La figure ci-dessus illustre une situation dans laquelle la force électrostatique exercée sur la goutte est vers le haut. Compléter cette figure en représentant le vecteur champ électrostatique $\vec{E}$ et la polarité du générateur. On rappelle que la goutte d'huile est chargée négativement.
2. À l'aide de la 2ème loi de Newton, établir l'équation différentielle satisfaite par la coordonnée verticale v_y du vecteur-vitesse :
$$\frac{dv_y}{dt} + \frac{6\pi\eta r}{m} v_y = g + \frac{qE}{m}$$
3. L'équation différentielle précédente est de la forme :
$$\frac{dv_y}{dt} + \frac{v_y}{\tau} = \frac{v_{lim1}}{\tau}$$
Exprimer le temps caractéristique τ en fonction des données.

4. On note v_{lim1} la vitesse limite atteinte par la goutte d'huile. Exploiter l'équation différentielle de la question 2 pour exprimer v_{lim1} en fonction des données.
5. Millikan a procédé à l'inversion du sens du champ électrostatique : comment s'exprime v_{lim2}, vitesse limite atteinte par la même goutte, sous un champ électrostatique de même valeur mais dans le sens opposé au précédent ?
6. Combiner les expressions des questions 3 et 4 pour établir les deux relations :

$$v_{lim1} + v_{lim2} = \frac{4}{9}\frac{\rho g r^2}{\eta} \quad \text{(relation 1)}$$

$$v_{lim1} - v_{lim2} = \frac{qE}{3\pi\eta r} \quad \text{(relation 2)}$$

Rappels :
– la masse de la goutte d'huile s'exprime par : $m = \rho V$
(ρ étant la masse volumique de l'huile et V son volume) ;
– le volume d'une sphère de rayon r vaut : $V = \frac{4}{3}\pi r^3$

7. Millikan a utilisé les mesures des deux vitesses limites v_{lim1} et v_{lim2} pour calculer la charge électrique des gouttes d'huile, ce qui nécessitait d'avoir au préalable calculé leur rayon. Laquelle de ces deux relations lui a donné accès à la valeur du rayon de chaque goutte ? à la valeur de sa charge électrique ?

2ème partie : réalisation d'un simulateur

Ouvrir le programme « Act5_Millikan_ELEVE.py » : c'est un programme inachevé censé choisir au hasard les valeurs de la charge d'une goutte d'huile et de son rayon, puis afficher l'évolution temporelle de sa vitesse dans deux cas : avec un champ électrostatique orienté vers le bas, puis avec un champ électrique de même valeur mais orienté vers le haut. Un bouton cliquable permet enfin de connaître les valeurs de q et r tirées au sort.

Compréhension du programme

8. La valeur de la charge électrique de la goutte d'huile simulée est choisie aléatoirement par le code des lignes 11, 12 et 13. Quelles sont les valeurs minimale et maximale de q ?
9. Pourquoi ne pas avoir simplement programmé un tirage aléatoire d'un nombre réel entre ces deux valeurs ?
10. Que vaut le champ électrostatique simulé ? Justifier en citant la ligne de code utile.
11. Quelle est l'expression littérale, en fonction du temps, de la vitesse de la goutte d'huile ? On pourra utiliser le code des lignes 40 et 41 pour répondre, puis vérifier que cela correspond bien à l'expression donnée dans la fiche de synthèse.

Programmation :

– Ligne 27 : saisir le code permettant de calculer le temps caractéristique τ en tenant compte de la réponse 3 (la variable correspondante sera « tau » dans le code Python).
– Lignes 28 et 29 : saisir le code permettant de calculer v_{lim1} et v_{lim2} en tenant compte des réponses 4 et 5 (variables « vlim1 » et « vlim2 ».
– Exécuter le code plusieurs fois pour vérifier qu'il fonctionne.

Simulation de l'expérience de Millikan

12. Millikan ne savait pas à l'avance ce que valait la charge électrique de ses gouttes d'huile, nous allons donc utiliser notre programme pour nous mettre dans la peau de Millikan. Nous allons simuler son expérience pour trois chutes de goutte d'huile. Pour chacune d'elle :
   – Exécuter le programme (et ne pas cliquer sur le bouton bleu sous les graphiques !).
   – Mesurer les deux vitesse limites v_{lim1} (champ $\vec{E}$ vers le bas) et v_{lim2} (champ $\vec{E}$ vers le haut) avec le curseur de la souris.
   – Calculer numériquement le rayon de la goutte d'huile en exploitant la relation 1 de la question 6.
   – Calculer numériquement la charge électrique de la goutte d'huile en exploitant la relation 2 de la question 6.
   – Noter le résultat dans le tableau ci-dessous.

Simulation n°	**1**	**2**	**3**
Rayon de la goutte r (m)			
Charge électrique q (en C)			
$\frac{q}{e}$			