



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

PHYSIQUE POUR LES CHIMISTES - MÉCANIQUE

2022-2023

Bibliographie :

- Bellier, Bouloy, Guéant : *Montages de physique*, Dunod.
- Livres du secondaire et de prépa, documents d'accompagnement des programmes.

Table des matières

1	Mouvement de chute libre	3
1.1	Temps de chute	3
1.2	Dynamique de la chute	3
2	Oscillateurs	4
2.1	Rappels théoriques	4
2.2	Pendule simple	5
2.3	Dynamique d'un ressort vertical	6
3	Mise en évidence de la troisième loi de Newton	6
4	Mobiles autoportés	7
4.1	Mouvement de mobiles pseudo-isolés	8
4.2	Mouvement rectiligne uniformément accéléré	8
4.3	Mouvement à force centrale [très facultatif]	9

L'objectif de ce TP est d'étudier des systèmes mécaniques simples mettant en évidence les concepts de base que sont les lois de Newton et la conservation de l'énergie. Les manipulations proposées ci-dessous seront bien entendu particulièrement utiles pour les leçons du domaine *Mécanique*.

1 Mouvement de chute libre

Dans cette partie, l'axe Oz est orienté vers le haut et l'origine est prise au niveau du sol.

Dans le champ de pesanteur terrestre, tout système subit son poids $\vec{P} = m\vec{g}$. Cette force est composée principalement de la force d'attraction gravitationnelle de la Terre mais contient aussi une composante centripète non négligeable due au caractère non galiléen du référentiel terrestre (force d'inertie d'entraînement en l'occurrence, voir TD). Le poids ne pointe ainsi pas exactement vers le centre de la Terre. Cette contribution mineure peut être mise en évidence expérimentalement en laboratoire.

Lorsque le poids est la seule force qui s'applique au système étudié on dit qu'il est "en chute libre". Sans vitesse initiale, son altitude vérifie l'équation horaire $z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + z_0$ où z_0 est l'altitude initiale.

1.1 Temps de chute

On cherche à vérifier cette loi en mesurant le temps de chute d'une bille grâce à un "appareil à chute libre" (grande potence avec un électroaimant et un détecteur - ENSP 3187).

Protocole : Alimenter l'électroaimant entre deux bornes +15V et 0V d'une alimentation continue, brancher le boîtier de l'électroaimant et le détecteur aux bornes E1 et E2 respectivement du chronomètre. Coller la bille à l'électroaimant. Régler le calibre du chronomètre (touche A), et enfoncer la touche D. Pour arrêter le chronomètre déclenché de façon intempestive, utiliser le bouton *Reset* (touche C).

En coupant l'alimentation de l'électroaimant avec l'interrupteur sur le boîtier, le chrono se déclenche. La bille de masse m lâchée sans vitesse initiale à l'instant $t = 0$ percute à la distance h un godet qui arrête le chronomètre. On mesure ainsi la durée de la chute $t(h)$.

Expériences : Répéter l'expérience pour plusieurs valeurs de h et représenter h en fonction du carré de la durée de chute. Cette représentation permet d'avoir à ajuster une droite ce qui est toujours avantageux. Estimer les incertitudes de mesure et les afficher sur le graphe. Vérifier en ajustant votre graphe que votre expérience est compatible avec l'équation horaire de la chute libre. Pour le traitement de données, on utilisera le logiciel QtiPlot (voir photocopié *Acquisition et traitement des données*).

En répétant le même protocole avec des billes de différentes masses on montre que la durée de la chute est indépendante de la masse de la bille. On pourra tracer t en fonction de m avec les barres d'erreur associées.

1.2 Dynamique de la chute

En plus de la durée il est possible de vérifier l'équation horaire de la chute. On utilise pour cela plutôt une balle de golf et une caméra rapide Jeulin reliée en USB à un ordinateur. Celle-ci s'interface avec le logiciel *Cinéris* de *Atelier Scientifique*.

Protocole :

- Filmer la chute de la balle devant un panneau lumineux. On prendra soin d'avoir la trajectoire la plus verticale possible pour pouvoir négliger les mouvements dans les autres directions de l'espace ;
- Traiter la vidéo créée grâce au logiciel *Cinéris* pour extraire la position du centre de la balle en fonction du temps ;
- Extraire les données et les importer sur QtiPlot pour traitement.



Expériences possibles : À partir de la courbe $z(t)$, deux exploitations sont possibles.

- Ajuster séparément la trajectoire des différents rebonds par des paraboles pour remonter à la valeur de g . Le fait de faire plusieurs fois la mesure permet de réduire l'erreur. De plus, pour pouvoir négliger les frottements de l'air on a intérêt à prendre une balle assez lourde, si possible une balle de golf plutôt qu'une balle de ping-pong.
- On peut aussi proposer un traitement énergétique. L'énergie potentielle est proportionnelle à la hauteur instantanée de la balle $E_p = mgz(t)$ (la référence étant prise au niveau du sol). L'énergie cinétique s'obtient après dérivation numérique de z pour obtenir la vitesse de la balle $v(t) = \frac{z(t_{i+1}) - z(t_i)}{t_{i+1} - t_i}$. On calcule alors $E_c = mv^2/2$. Il est possible de montrer qu'au n ème rebond l'énergie mécanique est constante et vaut $E_{m,n} = E_p + E_c$. En effet, le système est conservatif (à condition de négliger les frottements de l'air). On constate aussi que l'énergie mécanique décroît d'un rebond à l'autre ($E_{m,n+1} < E_{m,n}$) car le support absorbe une partie de cette énergie. On pourra, pour raffiner (c'est intéressant mais long, y revenir à la fin éventuellement), calculer le coefficient de restitution $\alpha = E_{m,n+1}/E_{m,n}$ qui ne dépend pas de n . Ce coefficient caractérise la dissipation d'énergie lors du contact de la balle sur la table.

Remarques :

- On peut mener l'étude d'une chute libre avec vitesse initiale en faisant lancer la balle par un lanceur à ressort ;
- Si l'utilisation d'une caméra rend ce protocole un peu plus long, il donne accès à une étude énergétique, en particulier sa conservation dans le champ de pesanteur ou sa non-conservation lors d'un choc sur le sol (balle rebondissante), ce qui est rarement offert par d'autres expériences.
- Un autre exemple de mouvement dans un champ de pesanteur est celui d'une balle dans un fluide visqueux. Cette manipulation sera faite dans le TP *Fluides*, et constitue également une expérience de mécanique classique. Ce n'est cependant pas une chute libre, puisque la balle subit la force de Stokes du fluide qui, dans l'eau (et plus encore dans le glycérol), n'est pas négligeable par rapport au poids.

2 Oscillateurs

2.1 Rappels théoriques

Un grand nombre de situations physiques conduisent à une équation différentielle du second ordre à coefficients constants. Sous sa forme canonique, elle s'écrit :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2}{\tau} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0. \quad (1)$$

où $x(t)$ est la grandeur physique considérée. ω_0 est appelée pulsation propre du système, et τ est le temps caractéristique d'amortissement.

Plusieurs régimes peuvent exister :

- $1/\tau = 0$: il n'y a pas de frottements du tout dans le problème (c'est donc forcément un modèle). On retombe sur l'équation d'un oscillateur harmonique dont les solutions sont des oscillations périodiques sinusoïdales de pulsation ω_0 .
- $\omega_0 \tau > 1$: les frottements sont faibles. Le mouvement est "pseudo-périodique" : il oscille à une pulsation ω , mais l'amplitude du mouvement décroît exponentiellement. ω est appelée *pseudo-pulsation*, et vaut $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{1}{\tau^2}}$. La grandeur $x(t)$ est donnée par $x(t) = Ae^{-t/\tau} \cos(\omega t + \phi)$ et représente des oscillations amorties. Les constantes d'intégration A et ϕ sont déterminées par les conditions initiales.
- $\omega_0 \tau < 1$: le mouvement n'est pas oscillant, $x(t)$ tend exponentiellement vers sa valeur limite ;

Remarques



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

- On passe des pulsations ω aux fréquences ν selon $\omega = 2\pi\nu$.
- On pourra noter que les circuits électriques RLC rentrent dans le cadre de cette modélisation.

On étudie dans la suite deux exemples très classiques d'oscillateurs : le pendule simple et le ressort.

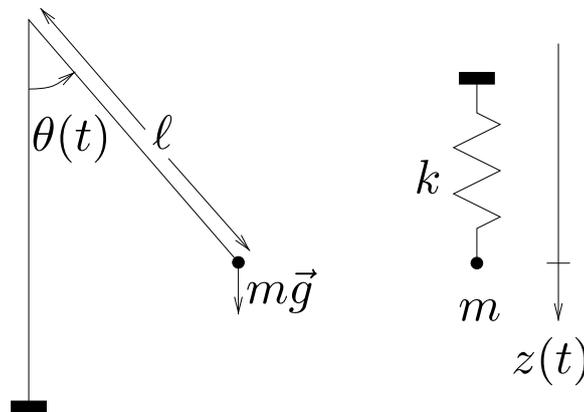


FIGURE 1 – Deux exemples d'oscillateurs mécaniques : pendule simple et ressort vertical

2.2 Pendule simple

Modélisation : Le pendule simple est schématisé sur le dessin de gauche de la figure ci-dessus : une masse m , soumise au champ de pesanteur g , est reliée à un point fixe par un fil de longueur ℓ de masse négligeable.¹ En utilisant (par exemple) la seconde loi de Newton, on montre que l'angle $\theta(t)$ entre le pendule et la verticale vérifie :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{\ell} \sin\theta = 0; \quad (2)$$

Noter que cette équation est indépendante de la masse m . Dans le cas des petites oscillations on peut linéariser le sinus pour retrouver l'équation d'un oscillateur harmonique de période propre $2\pi\sqrt{\ell/g}$. On a montré en TD que les oscillations sont alors isochrones, c'est-à-dire que leur période est indépendante de leur amplitude. Cette propriété repose sur la linéarisation du sinus et n'est donc vraie que pour des oscillations de faible amplitude.

Protocole : Vous disposez d'un pendule muni d'un capteur de mesure de l'angle $\theta(t)$ qui se relie à la carte SYSAM-SP5; le logiciel *Latis Pro* qui reconnaît automatiquement le pendule vous permet d'acquérir la fonction $\theta(t)$ (voir polycopié *Acquisition et traitement des données*). En utilisant la fonction de modélisation du logiciel on peut ensuite déduire la pseudo-période et le temps d'amortissement des oscillations.

Expériences :

- vérifier l'isochronisme des petites oscillations et montrer que pour θ petit on retrouve bien la période propre du système. Réaliser ensuite l'expérience pour différents angles, de plus en plus grands, et montrer l'écart à l'isochronisme. Comparer à la valeur théorique, dite formule de Borda

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \left(1 + \frac{\theta_0^2}{16}\right)$$

où θ_0 est l'amplitude de l'oscillation dont on mesure la période ;

- montrer la diminution du temps d'amortissement en augmentant les frottements à l'aide d'une pale trempant dans un fluide ;
- considérer la conservation de l'énergie mécanique, somme des énergies cinétique et potentielle (voir la remarque plus bas).

1. Le pendule simple est un modèle limite de pendule où toute la masse est concentrée en un point. On appelle plus généralement *pendule pesant* tout objet qui tourne autour d'un axe fixe.

Remarque : Attention, la tige du pendule *Eurosmart* ayant une masse pas vraiment négligeable par rapport à la masselotte extrême, la période mesurée peut différer un peu de celle de la formule théorique du pendule simple, du fait qu'on dispose en fait d'un *pendule pesant* (voir TD sur le moment cinétique).

Autre protocole : On peut aussi étudier de manière plus rudimentaire les oscillations d'un pendule simple fabriqué en suspendant une masse à un fil attaché à une potence, l'avantage étant la possibilité de faire varier, outre la longueur du fil, la masse de l'objet. La période peut se mesurer manuellement à l'aide d'un chronomètre (mesurer sur quelques périodes pour réduire d'autant l'incertitude) ou avec une fourche optique qui produit un signal électrique à chaque passage du pendule.

Première expérience possible : On peut d'abord vérifier la relation entre période et longueur du pendule. Pour différentes longueurs on fait un bref enregistrement à partir d'un angle faible (pour ne pas avoir à considérer la formule de Borda) et on mesure la période du mouvement à la main, via les curseurs de Latis Pro. On peut aussi montrer qu'elle ne dépend pas de la masse. La même mesure effectuée avec différents angles de lâché permet d'illustrer la perte d'isochronisme aux grandes amplitudes.

Deuxième expérience possible : On peut aussi choisir de placer le pendule dans une configuration donnée (celle avec la masse le plus au bout possible, par exemple) et enregistrer les oscillations à partir d'un angle important (autour d'une soixantaine de degrés) et jusqu'à arrêt quasi complet du pendule. Il faudra commencer par choisir correctement la durée de l'expérience et le nombre de points à enregistrer par seconde dont on déduit le nombre de points total.

L'enregistrement s'exporte sous Qtiplot via un copié-collé du tableau de valeurs. Ajuster l'ensemble de la courbe d'un seul coup est illusoire mais on peut faire un ajustement de différents morceaux (dont l'amplitude ne varie quasiment pas) répartis tout du long de l'expérience. La formule adéquate est

$$A \cos(\omega(x - b)) + c, \quad (3)$$

où c est la valeur moyenne du signal (c 'est un reliquat d'une erreur de calibration du pendule), on peut la fixer en allant préalablement lire la valeur finale lorsque le pendule est à l'arrêt. b sert à translater l'origine des temps, a et ω sont respectivement l'amplitude du mouvement et sa pulsation, deux grandeurs que l'on cherche à extraire.

On relève alors, pour chacun, le temps depuis le début de l'expérience, l'amplitude du mouvement à cet instant, et la période associée. On peut alors tracer :

- la période en fonction de l'amplitude du mouvement pour vérifier la formule de Borda ;
- l'amplitude en fonction du temps pour observer une loi exponentielle dont le temps caractéristique est τ , lié au coefficient de frottements.

2.3 Dynamique d'un ressort vertical

La masse du schéma de droite de la figure a un mouvement oscillatoire de pulsation $\sqrt{k/m}$.

Protocole : Accrocher l'extrémité d'un ressort à une noix fixée sur une potence. Suspendre une masselotte à l'autre extrémité du ressort.

Expérience : On peut étudier le mouvement d'une masse suspendue grâce à la caméra Jeulin, et en déduire la pulsation des oscillations.

3 Mise en évidence de la troisième loi de Newton

Nous proposons ici une expérience permettant d'illustrer la troisième loi de Newton, ou *principe des actions réciproques*.

Protocole :



- Placer une éprouvette remplie d'eau sur une balance. Séparément, préparer une masse (environ 200 g) attachée à un dynamomètre de 10 N qui pend au-dessus de l'éprouvette grâce à une potence. Lire la force F_1 exercée sur le dynamomètre et tarer la balance qui affiche donc $m_1 = 0$ kg.
- Dans un deuxième temps, immerger complètement la masse dans l'éprouvette comme illustré sur la figure ci-dessous. Le dynamomètre mesure F_2 et la balance affiche une certaine masse m_2 positive.

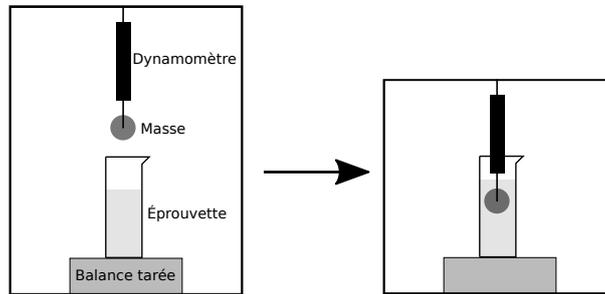


FIGURE 2 – Dispositif expérimental mettant en évidence le principe des actions réciproques

Que s'est-il passé ? Au début, la bille subit son poids $\vec{P} = m\vec{g}$ et la force exercée par le dynamomètre \vec{F}_1 . Pour cet équilibre le PFD projeté sur la verticale ascendante donne $0 = -P + F_1$. La force F_1 lue sur le dynamomètre est donc exactement le poids de la bille.

Dans un second temps, la bille est immergée dans l'eau et subit donc la poussée d'Archimède $\vec{\Pi} = \rho_{\text{eau}} V g \vec{u}_z$. En lui appliquant le PFD à l'équilibre et projeté sur \vec{u}_z , on obtient

$$0 = -P + F_2 + \Pi . \quad (4)$$

Autrement dit, la valeur F_2 lue sur le dynamomètre dans l'état final est $F_2 = P - \Pi$. On peut donc mesurer simplement la poussée d'Archimède :

$$\Pi = F_1 - F_2 > 0 . \quad (5)$$

Pourquoi la valeur affichée sur la balance a-t-elle augmentée ? Par la troisième loi de Newton et le principe des actions réciproques ! Puisque l'eau, par la poussée d'Archimède, a exercé sur la bille une force $\vec{\Pi}$ il faut que la bille ait réciproquement exercé sur l'eau une force $-\vec{\Pi}$. Cette force a été transmise à la balance, qui l'affiche à un facteur g près. Vérifier donc que $m_2 g = \Pi$.

Vous pouvez enfin vérifier que toutes ces mesures sont cohérentes avec la formule connue de la poussée d'Archimède, en mesurant au pied à coulisse le diamètre d de la bille et prenant la masse volumique de l'acier comprise entre 7500 et 8100 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$:

$$\Pi = \rho_{\text{acier}} \frac{\pi}{6} d^3 g . \quad (6)$$

4 Mobiles autoportés

Ces expériences sont **facultatives** dans la mesure où vous ne les réinvestirez probablement pas (non pas que ce soit interdit, mais d'autres expériences sont souvent plus simples à mettre en œuvre et tout aussi illustratives). Ne vous y attardez que si vous avez fait correctement le reste. Idéalement, il s'agirait de réaliser de manière quantitative **au moins une** expérience parmi la liste (non-exhaustive) ci-dessous.

Protocole : On dispose d'une table et de deux mobiles autoporteurs² auxquels on peut ajouter des masselottes. Brancher les fils d'alimentation aux mobiles en veillant à fermer le circuit électrique. On suit le mouvement du (des) mobile(s) avec la caméra rapide Jeulin.³ Des frottements subsistent souvent : pour les réduire il faut s'assurer au niveau à bulle que la surface de la table est la plus horizontale possible. Consulter la notice de l'appareil.

2. On évitera de parler de "table à coussin d'air" car c'est le mobile lui-même qui assure l'éjection de l'air.

3. Le branchement avait une seconde utilité : il permettait de repérer la position des mobiles au cours du temps. On imposait des

4.1 Mouvement de mobiles pseudo-isolés

Un système mécanique est *pseudo-isolé* lorsque toutes les forces s'appliquant sur lui s'annulent. Une masse au repos sur une table est pseudo-isolée puisqu'elle subit son poids et la réaction normale de la table, qui se compensent. Cependant, si on la met en mouvement, elle va subir de plus les frottements de la table et ne sera plus pseudo-isolée : elle ralentit. Le coussin d'air des mobiles autoporteurs permet de s'affranchir de ces frottements solides (les frottements de l'air sont cependant toujours présents, quoi qu'on aimerait les négliger). Ils restent soumis uniquement à leur poids et à la réaction normale du support (stricto sensu *du coussin d'air*) de sorte qu'ils sont toujours pseudo-isolés.

Pour une procédure expérimentale alternative, voir le Bellier, section 10.2.1, p 149.

- Si on lance un mobile sans vitesse initiale, vérifier qu'il se déplace à vitesse constante. On entend par là que le **vecteur vitesse** est constant, en norme comme en direction ;
- Si on donne une vitesse angulaire en plus, vérifier que le moment cinétique est conservé. Le moment d'inertie étant bien sûr une constante du système il s'agit de vérifier que la vitesse de rotation est constante ;
- Dans le cas de deux mobiles liés l'un à l'autre, vérifier que le centre d'inertie (barycentre des masses du système) se déplace à vitesse constante (toujours en terme vectoriel) ;

On peut enfin étudier les chocs symétriques ou asymétriques (l'un des deux mobiles est lesté), avec des collisions élastiques (énergie cinétique conservée) ou inélastiques (utiliser les bandes velcro) mais c'est très accessoire dans une manip déjà facultative.

4.2 Mouvement rectiligne uniformément accéléré

Réf : voir aussi le Bellier, section 10.2.2, p 151

Ce dispositif expérimental permet l'étude d'un d'un mobile soumis à une force constante, donc à accélération constante. C'est donc l'analogie de la chute libre mais à l'horizontal. Deux méthodes sont possibles :

- Créer la force en penchant la table d'un angle θ . La force subie par le mobile tangente à la table est alors $mg \sin \theta$;
- Tirer sur le mobile en fixant sur le côté de la table une poulie et reliant le mobile de masse M à une masse m suspendue dans le vide par l'intermédiaire d'un fil souple passant sur la poulie (voir schéma). En supposant le fil inextensible et sans masse, et en négligeant les efforts induit par la poulie et sa rotation, le poids de m est directement transmis à M qui subit une accélération $\frac{m}{m+M}g$.

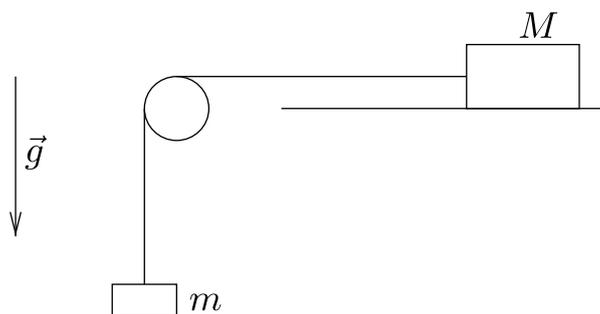


FIGURE 3 – Poulie : obtenir une force constante sur un mobile

impulsions haute tension sur une pointe métallique au centre de chaque mobile, et le circuit était fermé par une feuille (chère) conductrice imbibée de pigments. On plaçait une feuille blanche entre la pointe et la feuille conductrice, et lors d'une décharge la feuille blanche était marquée d'un point d'encre. L'enregistrement était commandé par une pédale.

4.3 Mouvement à force centrale [très facultatif]

Un mouvement est dit à *force centrale* lorsque la direction de la force s'exerçant sur le mobile C passe par un point O fixe au cours du temps. Dans ce cas le mouvement vérifie la loi des aires : l'aire de la surface balayée par OC au cours d'un intervalle de durée donnée est constante au cours du temps. Sur la figure ci-dessous chacun des secteurs triangulaires doit donc avoir la même aire.

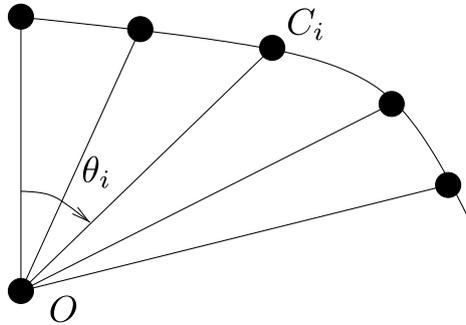


FIGURE 4 – Vérification de la loi des aires

À l'aide de la poulie, ou en fixant l'extrémité du fil relié au mobile en un point fixe et en donnant une vitesse initiale au mobile réaliser un enregistrement et vérifier la loi des aires :

$$\frac{1}{2}(\theta_{i+1} - \theta_i)|\vec{OC}_i|^2 = \text{cste} \quad (7)$$

D'autres exemples de manipulations sont présentés dans le Bellier, section 9.1.3, p 138.