

Capacités expérimentales :

- Longueurs : à partir d'une photo ou d'une vidéo. Évaluer, par comparaison à un étalon, une longueur (ou les coordonnées d'une position) sur une image numérique et en estimer la précision.
- Analyser une image numérique. Acquérir (webcam, appareil photo numérique, etc.) l'image d'un phénomène physique sous forme numérique, et l'exploiter à l'aide d'un logiciel pour conduire l'étude d'un phénomène.
- Mesurer une masse, un moment d'inertie. Utiliser une balance de précision. Repérer la position d'un centre de masse et mesurer un moment d'inertie à partir d'une période et de l'application de la loi d'Huygens fournie.
- Visualiser et décomposer un mouvement. Enregistrer un phénomène à l'aide d'une caméra numérique et repérer la trajectoire à l'aide d'un logiciel dédié, en déduire la vitesse et l'accélération.
- Cinématique du point. Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.
- Mouvement d'un solide. Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence une diminution de l'énergie mécanique.

Capacités numériques :

- À l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non-isochronisme des oscillations.

Matériel :

- | | | |
|----------------------------|--------------------|---|
| — Fond noir avec échelle | — Caméra (webcam) | — Réglet ou mètre ruban |
| — Lampe de bureau | — Logiciel Amcap | — Pendule avec barre rigide (6) |
| — Balance de précision (2) | — Logiciel Tracker | — Masselottes avec pastilles |
| — Chronomètre digital | — Logiciel Excel | — Système de freinage (voile avec pinces) |

Dans ce TP, on s'intéresse au pendule simple, sans dissipation et dans la limite des "petites" oscillations : cinématique et énergies. Puis on étudie les limites de la modélisation : oscillations amorties, non-isochronisme des "grandes" oscillations et pendule pesant.

Quelques précautions expérimentales pour le pendule :

- Avant de lâcher le pendule, il faut s'assurer que l'espace est dégagé : en particulier, on déplace par exemple l'écran d'ordinateur si nécessaire et on prévient toujours les autres personnes à proximité du pendule.
- Lors du mouvement du pendule, il convient de vérifier que les oscillations ont bien lieu dans un plan.

Il est conseillé de prévoir une clé USB en cas de changement de poste de travail.

On se place dans le référentiel terrestre \mathcal{R}_T considéré galiléen.

L'accélération de pesanteur terrestre est notée \vec{g} .

Le centre de rotation du pendule est O .

La position du pendule est repérée par son angle θ avec la verticale tel que l'axe $[Ox]$ est vertical descendant (et l'axe $[Oy]$ est horizontal).

Le pendule est constitué d'une masselotte de masse m et d'une barre de longueur totale ℓ' , masse m' et de moment d'inertie sur son axe de rotation J .

✍ Faire un schéma du dispositif avec les paramètres importants.

On étudie le pendule comme pendule simple et sans dissipation, de masse m et de longueur ℓ .

✍ Faire un schéma simplifié du dispositif avec les paramètres importants.

On rappelle que $J = \frac{1}{3}m'\ell'^2$ si la barre est en rotation à l'une de ses extrémités et $J = \frac{1}{12}m'\ell'^2$ si la barre est en rotation en son milieu.

● Fixer la barre du pendule à vide telle qu'elle reste horizontale.

✍ Justifier cette précaution expérimentale.

● Fixer la masselotte sur la barre.

✍ Justifier sa position.

✍ Vérifier que $J \ll m\ell^2$.

1 Pendule simple, sans dissipation et dans la limite des "petites" oscillations

On considère la modélisation du pendule comme un pendule simple, sans dissipation et dans la limite des "petites" oscillations.

1.1 Théorie

✍ Déterminer l'équation différentielle du mouvement du pendule en appliquant :

- le Principe fondamental de la Dynamique,
- le théorème de la puissance cinétique,
- le théorème de la puissance mécanique en commentant,
- la conservation de l'énergie mécanique en justifiant,
- le théorème du moment cinétique par rapport à un point fixe,
- le théorème du moment cinétique par rapport à un axe fixe.

On étudie le pendule dans l'approximation linéaire dite limite des "petites" oscillations.

✍ Simplifier l'équation différentielle du mouvement.

On présente toutes les expressions établies dans la suite avec les conditions initiales générales : $\theta(0) = \theta_0$ et $\dot{\theta}(0) = \Omega_0$:

1.1.1 Cinématique

✍ Déterminer l'équation horaire du mouvement.

✍ Préciser les caractéristiques du mouvement : amplitude, pulsation, phase à l'origine et valeur moyenne.

✍ Préciser la période des oscillations T_0 .

1.1.2 Énergies

✍ Déterminer l'expression de l'énergie cinétique.

On rappelle que $\cos(\varepsilon) \approx 1 - \frac{\varepsilon^2}{2}$ pour $\varepsilon \ll 1$.

✍ Simplifier l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur en choisissant l'origine à l'équilibre.

✍ Montrer que la période de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pesanteur est $\frac{T_0}{2}$.

✍ En déduire l'expression générale de l'énergie mécanique.

✍ Commenter.

✍ Tracer sur le même graphe les allures de énergie cinétique, de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie mécanique en fonction du temps.

✍ En déduire les expressions dans le cas d'un lâché de pendule avec comme conditions initiales expérimentales : $\theta(0) = \theta_0$ et $\dot{\theta}(0) = 0$.

Il est important de réaliser une acquisition de qualité avant de passer à un traitement complet pour réussir l'analyse, donc si l'analyse ne convient pas, il ne faut pas hésiter à reprendre le traitement voire l'acquisition.

1.2 Expérimentation

On choisit un lâché de pendule avec comme conditions initiales expérimentales : $\theta(0) = \theta_0$ et $\dot{\theta}(0) = 0$.

1.2.1 Acquisition

On cherche à faire l'acquisition de 3 oscillations environ du pendule.

- Estimer le temps d'acquisition.
- Réaliser les étapes suivantes pour acquérir la vidéo avec le logiciel Amcap :
 - Lancer le logiciel Amcap.
 - Dans le menu *Options*, vérifier que *Preview* est sélectionné pour visualiser les images filmées par la caméra "en direct" sur l'écran de l'ordinateur.
 - Dans le menu *Options*, *Video Capture Filter*, *Contrôle de la caméra*, décocher la case *Automatique* et modifier le contraste en choisissant l'exposition typiquement à -7 et cliquer sur *Appliquer* avant de quitter la fenêtre.
 - Dans le menu *Capture* avec *Set Time Limit*, choisir un temps de capture en secondes *sec* et cocher la case *Use Time Limit* avant de quitter la fenêtre.
 - Dans le menu *Capture* avec *Set Frame Rate*, choisir un nombre d'images capturées par seconde *f/sec* (frame per seconde), de typiquement 60 fps, et cocher la case *Use Frame Rate* et cliquer sur *Apply* avant de quitter la fenêtre.
 - Dans le menu *Options* avec *Video Capture Pin*, sélectionner l'*Espace de couleurs/compression YUY2* et la *Taille de sortie 320 × 176* et le même nombre d'images par seconde que dans *Capture Set Frame Rate*.
 - Vérifier que le *FrameRate* en bas à gauche des images filmées par la caméra "en direct" sur l'écran de l'ordinateur est bien réglé sinon modifier à nouveau la taille ou l'exposition de l'image.
 - En déplaçant le support du pendule et/ou l'écran de l'ordinateur qui porte la caméra, ajuster le champ (le centre de rotation, l'échelle et la masselotte doivent être/rester dans le cadre), l'horizontalité (le pendule est vertical à l'équilibre), la parallaxe (le plan du pendule est orthogonal à la direction de la caméra) et la netteté de l'image (la bague de la caméra permet de la régler).

- Dans le menu *Capture* avec *Start Capture*, sélectionner le dossier *Vidéos* pour pouvoir retrouver rapidement votre acquisition sur l'ordinateur et nommer votre vidéo.
- Lancer l'enregistrement avec *OK* dans *Ready to Capture* après avoir lâché le pendule.
- Enregistrer la vidéo sur votre clé USB (si besoin).

📎 Justifier le nombre d'images capturées par seconde choisi.

1.2.2 Traitement

- Réaliser les étapes suivantes pour extraire la position du pendule en fonction du temps avec le logiciel Tracker à partir de la vidéo réalisée avec le logiciel Amcap :
 - Lancer le logiciel Tracker.
 - Charger la vidéo (1^{ère} icône).
 - Étalonner les distances avec le bâton de Calibration (6^{ème} icône).
Les extrémités sont sélectionnées en appuyant sur la touche Maj et en cliquant sur les extrémités de l'échelle avec la souris.
L'unité est le mètre et le séparateur décimal est la virgule.
 - Ajouter le repère spatial (7^{ème} icône) en plaçant l'origine au centre de rotation et l'axe des *x* vertical descendant.
L'origine du repère spatial est à faire glisser avec la souris.
L'axe des *x* croissants est celui distingué avec le tiret. On peut rectifier un défaut éventuel de verticalité de l'acquisition.
 - Créer l'objet à étudier comme masse ponctuelle (8^{ème} icône).
L'objet est sélectionné en maintenant les touches du clavier Ctrl et Maj appuyées et en cliquant sur le centre de l'objet avec la souris.
 - Dans la nouvelle fenêtre, cliquer sur *Chercher* pour que le logiciel réalise automatiquement le traitement de la vidéo.
Si le centre de l'objet a bien été suivi par le logiciel, fermer la fenêtre.
- * Découvrir les autres fonctionnalités du logiciel Tracker.

📎 Récapituler les précautions expérimentales principales pour l'acquisition et le traitement de vidéos numériques.

1.3 Analyse

- Copier-coller les colonnes t (en s), x (en m) et y (en m) du logiciel Tracker vers le logiciel Excel.

1.3.1 Cinématique

- ✍ Expliquer comment calculer $\theta(t)$ à partir de $x(t)$ et $y(t)$.
- ✍ Expliquer comment calculer $\theta^*(t)$ pour que $-\theta_{min}^* = \theta_{max}^*$.
- Créer les colonnes θ (en rad) et θ^* (en rad).

- Tracer $\theta^*(t)$.
- Mesurer T_0^{exp} .

1.3.2 Énergies

On définit les énergies cinétique, potentielle de pesanteur et mécanique réduites : $e_c(t) = \frac{\dot{\theta}^{*2}(t)}{\theta_{max}^{*2}}$, $e_p(t) = \frac{1 - \cos \theta^*(t)}{1 - \cos \theta_{max}^*}$ et $e_m(t) = e_c(t) + e_p(t)$.

- Créer les colonnes e_c , e_p et e_m (sans unités).
- Tracer les énergies réduites sur un même graphe : $e_c(t)$, $e_p(t)$ et $e_m(t)$.
- Mesurer la période des énergies cinétique et potentielle de pesanteur.
- Que dire de l'énergie mécanique ?

2 Limites

2.1 Oscillations amorties

Le système de freinage (voile avec pinces) est ajouté sur la partie de la barre au-dessus du centre de rotation.

✍ * En évaluant le nombre de Reynolds, justifier qu'il s'agit de frottements fluides de type visqueux.

On cherche à faire l'acquisition des oscillations du pendule pendant tout le mouvement.

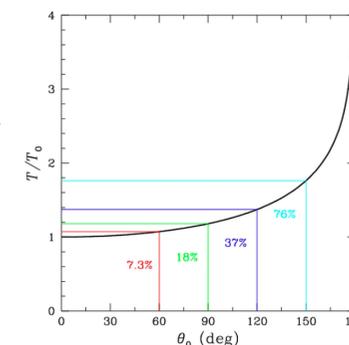
- Estimer le temps d'acquisition et justifier le nombre d'images capturées par seconde choisis.

- Pendule simple avec dissipation dans la limite des "petites" oscillations : Mesurer le facteur de qualité par plusieurs méthodes (Q^{τ_p} , Q^{T_p} et Q^{δ}) pour en déduire la mesure du coefficient de frottements visqueux α .

Les mesures suivantes peuvent être réalisées au chronomètre.

2.2 Non-isochronisme des "grandes" oscillations

La période des oscillations rapportée à la période des "petites" oscillations d'un pendule simple sans dissipation en fonction de l'angle initial du lâcher est résolue numériquement :



- Pendule simple, sans dissipation dans la limite des "grandes" oscillations : Mesurer la période des oscillations pour différents angles initiaux de lâchers $T(\theta_0)$ pour vérifier la cohérence des résultats expérimentaux avec le graphique théorique.

Capacité numérique : Utiliser le Jupiter Notebook pour étudier le non-isochronisme des "grandes" oscillations.

2.3 Pendule pesant

- Pendule pesant sans dissipation et dans la limite des "petites" oscillations : Mesurer la période des oscillations pour différentes positions de masselotte sur la barre $T_0(\ell)$ pour en déduire par la méthode de la régression linéaire, la mesure du moment d'inertie de la barre J et la comparer à la valeur attendue.

Conclusion

Erreurs et bilan (en rouge)

Matériel et logiciel (en vert) : Caméra (webcam) → Appareil vidéo numérique avec Amcap et Tracker

Compte-rendu de TP et Mesures et incertitudes (en noir)

Notions de Physique (en bleu) : Pendule