

## TP : CALORIMÉTRIE

But du TP : Vérifier et appliquer quelques lois de la thermodynamique, dans les domaines de la *thermométrie*, de la *calorimétrie* et des *changements d'état*.

### 1 Introduction

La *calorimétrie* est la mesure des transferts thermiques entre différents corps contenus dans une même enceinte *calorifugée*, appelée *calorimètre*. Il existe différents types de calorimètres : isothermes, adiabatiques, à flux thermique (ou microcalorimètre)...

Nous n'utiliserons que le calorimètre *adiabatique*, peu précis mais facile à mettre en œuvre dans le temps dont nous disposons.

- Le calorimètre se compose d'une enceinte cylindrique en aluminium poli, appelée enceinte calorimé-trique.
- À l'intérieur de cette enceinte, on dispose un vase Dewar (limite les fuites par rayonnement), qui repose sur des cales en polystyrène ou de la feutrine, afin de limiter les fuites thermiques par contact.
- Le vase Dewar contient ensuite un vase en verre de protection dans lequel on place le corps calorimétrique, en général de l'eau pour la gamme de températures étudiées ici. L'eau permet un bon échange thermique entre les corps d'étude.
- On dispose aussi d'un ensemble d'accessoires : couvercle, agitateur, thermomètres à mercure, qui plongent dans le liquide calorimétrique.

Le T.P. est conçu pour une gestion optimale du temps. Une fois les manipulations commencées, on n'enlèvera plus le calorimètre de la balance électronique jusqu'à la fin des mesures de calorimétrie. Il est *important* de noter toute modification du système.

### 2 Masse en eau du calorimètre

#### 2.1 Mesure de la masse en eau du calorimètre (première méthode)

##### 2.1.1 Principe de la méthode des mélanges

Dans la méthode des mélanges, on place dans le fluide calorimétrique en équilibre à une température  $\theta_f$ , les corps que l'on désire étudier, portés à une température initiale  $\theta_c$  différente de  $\theta_f$ .

Il y a alors rupture de l'équilibre thermodynamique et échanges thermiques au sein de l'enceinte calorimétrique entre les différents constituants du système.

Si on appelle A le corps à étudier, et B le reste du système, alors, l'enceinte étant supposée « parfaitement » calorifugée, on peut écrire le transfert d'énergie thermique sous la forme :  $Q_A + Q_B = 0$ . Soit encore si nous supposons que nous travaillons à pression constante,  $\Delta H_A + \Delta H_B = 0$ , soit :

$$m_A C_{p,A}(T_f - T_A) + m_B C_{p,B}(T_f - T_B) = 0$$

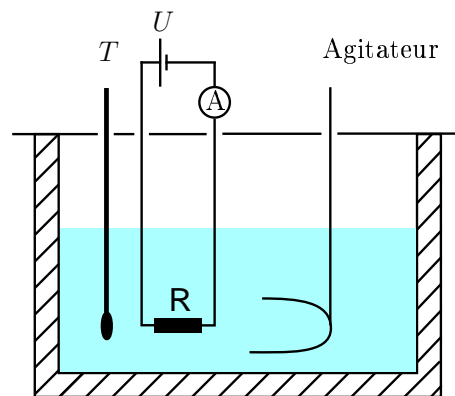


FIGURE 1 – Calorimètre calorifugé avec ses accessoires.

Une partie de l'énergie thermique transférée de A vers le reste du système sert non seulement à modifier la température du fluide calorimétrique, mais aussi à modifier la température du calorimètre et de ses accessoires. On quantifie ces transferts parasites en introduisant une "masse équivalente en eau" du calorimètre. On note cette masse  $\mu$ .

**Remarque :** À l'instant où débute la manipulation, on suppose que l'on a attendu suffisamment longtemps pour que le calorimètre et ses accessoires soient à la même température que le liquide calorimétrique B.

L'équation du calorimètre réel devient alors ;

$$m_A C_{p,A}(T_f - T_A) + m_B C_{p,B}(T_f - T_B) + \mu C_{p,B}(T_f - T_B) = 0$$

### 2.1.2 Protocole expérimental

On détermine  $\mu$  une seule fois pour toutes les manipulations de la séance, il faut donc veiller à faire soigneusement cette mesure.

- 1) S'assurer que le calorimètre et tous ses accessoires sont parfaitement propres et secs. Au besoin les essuyer soigneusement.
- 2) À l'aide d'une balance électronique de précision, peser le calorimètre avec tous ses accessoires. On note  $M_{cal}^0$  cette masse :  $M_{cal}^0 = \dots\dots\dots$
- 3) Ajouter une masse d'eau  $m_1 = 100$  g à température ambiante  $\theta_1$  (à mesurer). La masse d'eau sera déterminée à la balance électronique et la température mesurée à l'aide d'un thermomètre digital ou à mercure.

**Remarque :** Pour déterminer avec précision  $m_1$  on peut mesurer à nouveau la masse  $M_{cal}^0$  du calorimètre complet et on déduit  $m_1$  par :

$$m_1 = M_{cal}^0 - M_{cal}^0 = \dots\dots\dots$$

- 4) Attendre suffisamment pour atteindre le nouvel équilibre thermique puis noter la température  $\theta_1$  :

$$\theta_1 = \dots\dots\dots$$

- 5) Préparer une masse  $m_2 = 50$  g d'eau portée à une température  $\theta_2 = 50$  °C environ, grâce à un chauffe-ballon. Cette température  $\theta_2$  est repérée à l'aide d'un thermomètre :

$$\theta_2 = \dots\dots\dots$$

- 6) Verser soigneusement la masse d'eau précédente dans le calorimètre et mesurer ensuite la température du mélange  $\theta_m$  à l'équilibre thermique.  
Attention, les fuites thermiques font diminuer la température après  $\theta_m$  pour atteindre à nouveau la température ambiante.

**Remarque** : on peut déterminer la masse exacte  $m_2$  d'eau ajoutée par :

$$m_2 = M''_{cal} - M'_{cal} = \dots\dots\dots$$

### 2.1.3 Exploitation

Déduire des mesures précédentes la valeur en eau  $\mu$  du calorimètre :

$$\mu = \dots\dots\dots$$

## 2.2 Mesure de la masse en eau calorimètre (deuxième méthode)

### 2.2.1 Loi de Joule

On considère le calorimètre représenté figure 2. Un conducteur ohmique de résistance  $R = 12\Omega$  plonge dans une masse  $m_e$  d'eau à la température initiale  $T_i$ . Ce conducteur ohmique est alimenté sous une tension continue  $U = 10$  V.

**Remarque** : le conducteur ohmique ne peut être alimenté sous 10 V que lorsqu'il plonge dans l'eau, sinon il serait détruit !

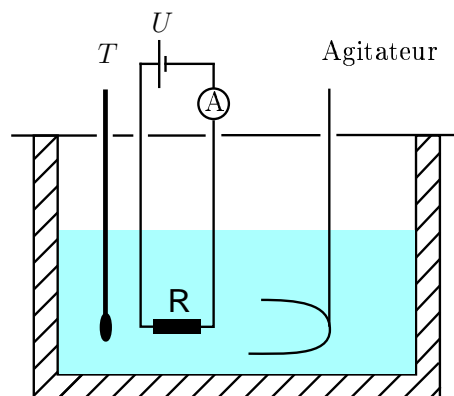


FIGURE 2 – Loi de JOULE. Calorimètre calorifugé avec ses accessoires.

### 2.2.2 Calculs théoriques

- ☞ En supposant que les pertes énergétiques du calorimètre sont négligeables pendant la durée  $\Delta t$  de l'expérience, montrer que la loi d'évolution avec le temps de la température  $T$  de l'eau

s'écrit :

$$T(t) = T_i + \frac{U^2}{RC_e(m_e + \mu)} \times t$$

avec  $\mu$  la masse en eau du calorimètre et  $C_e = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  la capacité calorifique de l'eau dans les conditions de l'expérience.

- ☞ En déduire que le relevé expérimental de  $T$  en fonction du temps permet de déterminer la masse en eau  $\mu$  du calorimètre.

### 2.2.3 Mesures

- ☞ Se reporter aux phases (1), (2), (3) et (4) du protocole expérimental décrit au paragraphe § 2.1.1.
- ☞ Insérer la résistance chauffante et s'assurer qu'elle est entièrement immergée dans la masse initiale  $m_1$  d'eau à la température  $\theta_1$ .
- ☞ Fermer le circuit électrique et relever la température  $T(t)$  de l'eau pendant une durée  $\Delta t$  suffisante, à l'aide d'une carte d'acquisition munie de son capteur de température. On prendra soin pendant le relevé d'homogénéiser la température à l'aide de l'agitateur.

### 2.2.4 Analyse des résultats

- ☞ Vérifier graphiquement la loi de JOULE.
- ☞ Déduire des mesures précédentes la valeur de la masse en eau  $\mu$  du calorimètre et de ses accessoires.

## 3 Mesure de la chaleur latente de fusion

### 3.1 Présentation

On va déterminer la chaleur latente massique de fusion  $L_f$  de la glace par la méthode des mélanges :

- ☞ Écrire la relation d'équilibre thermique du système et en déduire l'expression de la chaleur latente  $L_f$  en fonction des autres grandeurs.

### 3.2 Expérimentation

Il est important d'utiliser de petits glaçons, secs et à une température très proche de  $0^\circ\text{C}$ . Pour mettre ces glaçons dans ces conditions, on peut les mettre dans un mélange eau-glace. À une température proche de  $0^\circ\text{C}$ , les glaçons sont relativement transparents. On pourra aussi mesurer leur température à l'aide d'un thermomètre.

- 1) Mettre une masse  $m = 200 \text{ g}$  d'eau dans le calorimètre. Relever la température du système :  $\theta_i = \dots\dots\dots$
- 2) Introduire une masse  $m_g$  de glace sèche et à  $0^\circ\text{C}$  d'environ  $50 \text{ g}$ . La masse de glace sera déterminée avec précision après l'expérience, par pesée de l'ensemble et par différence. Mesurer ensuite la température du mélange à l'équilibre thermique.

$$\theta_f = \dots\dots\dots$$

### 3.3 Exploitation

☞ Déduire des mesures précédentes la valeur de la chaleur latente de fusion de la glace

$$L_f = \dots\dots\dots$$

☞ Comparer le résultat avec la valeur couramment indiquée dans les tables :  $L_f = 334 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .  
Conclure.

## 4 Mesures de la capacité calorifique des solides

Les expériences de ce paragraphe ont pour thème la détermination de la capacité calorifique de deux corps métalliques. Les corps solides seront chauffés jusqu'à une température  $\theta_c$  dans un bain d'eau.

### 4.1 Mesure de la capacité calorifique du cuivre

On utilise le cylindre en cuivre.

1) Compléter la quantité d'eau dans le calorimètre à 250 g environ (les pièces métalliques doivent être entièrement immergées). Par pesée, déterminer la masse d'eau présente dans le calorimètre :

$$m_e = M'_{cal} - M_{cal} = \dots\dots\dots$$

2) Attendre pendant quelques minutes que la température atteigne sa valeur d'équilibre

$$\theta_1 = \dots\dots\dots$$

3) Pendant ce temps, chauffer une des pièces métalliques jusqu'à une température  $\theta_2$  d'environ  $80^\circ\text{C}$  :

$$\theta_2 = \dots\dots\dots$$

et introduire rapidement mais aussi délicatement (le vase Dewar est fragile) le cylindre métallique dans le calorimètre. Suivre avec attention l'évolution de la température du mélange et noter la température d'équilibre

$$\theta_f = \dots\dots\dots$$

**Exploitation :**

Déduire des mesures précédentes, la valeur de la capacité calorifique massique du cuivre :

$$c_{p,\text{Cu}} = \dots\dots\dots$$

### 4.2 Mesure de la capacité calorifique de l'aluminium

Reprendre la même procédure et les mêmes mesures dans le cas du cylindre en aluminium. Compléter si nécessaire la quantité d'eau pour atteindre  $m_e = 250 \text{ g}$ . Avant de commencer toute manipulation, laisser la température redescendre à la valeur ambiante pendant le temps nécessaire.

**Exploitation :**

Déduire des mesures précédentes, la valeur de la capacité calorifique massique de l'aluminium :

$$c_{p,\text{Al}} = \dots\dots\dots$$

### 4.3 Conclusion

- ☞ Comparer les valeurs des capacités calorifiques molaires  $c_{p,m}$  mesurées pour le cuivre et l'aluminium.
- ☞ Comparer les valeurs obtenues avec celles prévues par la loi de DULONG et PETIT. Conclure.

Données numériques :  $M_{Cu} = 63,55 \text{ g.mol}^{-1}$ ;  $M_{Al} = 26,98 \text{ g.mol}^{-1}$ ;  $\rho_{Cu} = 8,96 \text{ g.cm}^{-3}$ ;  $\rho_{Al} = 2,70 \text{ g.cm}^{-3}$ .

## 5 Annexe : Étalonnage de la résistance de platine

### 5.1 Thermomètre à résistance de Platine

Comme tous les métaux, le platine possède une résistivité  $\rho(T)$  qui varie avec la température. L'évolution de la résistance d'un métal avec la température peut donc être représentée par un polynôme (développement en série) en  $T$  ou en  $\theta$ . Pour la gamme de températures qui nous intéresse  $[0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}]$ , une variation linéaire est suffisante pour la résistance de platine. On écrira donc :

$$R_{Pt}(\theta) = R_0(1 + \alpha\theta)$$

Avec  $\alpha$  le coefficient de température donné dans les tables et dont on évaluera une valeur approchée<sup>1</sup> par étalonnage.  $R_0$  est la valeur de la résistance de platine utilisée<sup>2</sup> à  $0^\circ\text{C}$ .

Les résistances de platine sont souvent protégées des corrosions par une gaine en acier inoxydable, qui permet un bon contact thermique. La précision de cette sonde est limitée à  $10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$  environ (deux chiffres après la virgule).

On peut avantageusement réaliser les mesures de résistance à l'aide d'un multimètre numérique MX579 plutôt qu'un pont de WHEATSTONE. Il est encore plus intéressant d'utiliser (ce que nous ferons ici) un convertisseur résistance tension  $R \rightarrow U$  du type de celui présenté en annexe ???. On suivra ensuite l'évolution de la tension  $U(T)$  image de la température mesurée  $T$  à l'aide d'une carte d'acquisition du type FastLab ou d'une table traçante.

### 5.2 Étalonnage de la résistance de Platine

L'étalonnage de la résistance de platine consiste à déterminer  $R_0$  et accessoirement ici  $\alpha$  par la mesure de deux points fixes connus : l'ébullition de l'eau sous pression  $P_0$  (normalement  $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) et le mélange eau - glace.

- ☞ Déterminer  $R_0$  en plongeant la sonde au voisinage de la surface d'un mélange eau - glace :  $R_0 = \dots\dots\dots$
- ☞ Déterminer  $R_{100}$  en plaçant la sonde à la surface de l'eau en ébullition :  $R_{100} = \dots\dots\dots$
- ☞ Dédire des mesures précédentes les trois grandeurs suivantes :

---

1. La valeur de  $\alpha$  est donnée dans les tables avec une précision nettement meilleur que ce que l'on peut espérer au laboratoire de physique. En toute rigueur on doit utiliser la valeur des tables plutôt qu'une valeur mesurée de manière peu précise. C'est plutôt l'utilisation d'un point fixe qui nous intéresse ici, nous en profitons pour estimer la valeur de  $\alpha$ .

2. La valeur de  $R_0$  dépend de la géométrie de la résistance de platine utilisée. En général on dispose de résistance Pt100 telles que  $R_0 = 100 \text{ } \Omega$

- $R_0 = \dots\dots\dots$  ;
- $\alpha = \dots\dots\dots$  ;
- $W = \frac{R_{100}}{R_0} = \dots\dots\dots$

☞ Comparer la valeur obtenue pour  $\alpha$  avec celle proposée dans les tables :  $\alpha = 3,92 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .  
Analyser les causes possibles d'erreur.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Masse en eau du calorimètre</b>	<b>1</b>
2.1	Mesure de la masse en eau du calorimètre (première méthode) . . . . .	1
2.1.1	Principe de la méthode des mélanges . . . . .	1
2.1.2	Protocole expérimental . . . . .	2
2.1.3	Exploitation . . . . .	3
2.2	Mesure de la masse en eau calorimètre (deuxième méthode) . . . . .	3
2.2.1	Loi de Joule . . . . .	3
2.2.2	Calculs théoriques . . . . .	3
2.2.3	Mesures . . . . .	4
2.2.4	Analyse des résultats . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Mesure de la chaleur latente de fusion</b>	<b>4</b>
3.1	Présentation . . . . .	4
3.2	Expérimentation . . . . .	4
3.3	Exploitation . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Mesures de la capacité calorifique des solides</b>	<b>5</b>
4.1	Mesure de la capacité calorifique du cuivre . . . . .	5
4.2	Mesure de la capacité calorifique de l'aluminium . . . . .	5
4.3	Conclusion . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Annexe : Étalonnage de la résistance de platine</b>	<b>6</b>
5.1	Thermomètre à résistance de Platine . . . . .	6
5.2	Étalonnage de la résistance de Platine . . . . .	6

# TP : Expériences de mécanique

## 1 Utilisation de la caméra rapide

### 1.1 Chute libre verticale

#### 1.1.1 Enregistrement de la vidéo

**Conditions d'enregistrement** : Se placer dans un endroit suffisamment éclairé et utiliser une balle de couleur contrastante avec le fond. Pour l'étalonnage (échelle), il est nécessaire de connaître une hauteur réelle présente dans la vidéo. Placer alors une règle dans dans le même plan de chute.

[☞] Lancer l'enregistrement de la vidéo de chute libre verticale la balle *sans vitesse initiale*. Enregistrer la vidéo sous le nom *TP9chutelibre1.avi*.

#### 1.1.2 Traitement de la vidéo

[☞] **Lancez LatisPro** : *Edition > Analyse de séquence vidéo*. Appuyer sur "Fichiers" et charger la vidéo *TP9chutelibre1.avi*. La visionnez en cliquant sur "Lecture" puis sur "<<" pour revenir au début.

[☞] **Choix de l'origine et du repère** : Avancer image par image (>) jusqu'au lâcher de la balle puis placer l'origine du repère d'espace, choisir l'orientation des axes.

[☞] **Étalonnage** : Définir l'étalon en utilisant sur la règle taille  $l$  (utiliser le zoom pour plus de précision).

[☞] **Mesures** : Sélectionner manuellement (avec précision) les positions successives de la bille. Puis, fermer la vidéo.

[☞] **Exploitation** : Modéliser la courbe "Mouvement Y" (axe vertical) et la renommer  $Y$ .

[☞] Modéliser aussi la courbe "Mouvement X" (axe horizontal) et la renommer  $X1$ . Commenter l'allure de  $X1(t)$ .

[☞] **Observation des vecteurs vitesse et accélération** :

Dans : *traitement > calculs spécifiques > vecteurs* :

Glisser vos mesures  $X1(t)$  sur l'axe horizontal et  $Y(t)$  sur l'axe vertical ; observer les vecteurs vitesse  $\vec{v}$  et accélération  $\vec{a}$ . Conclure.

[☞] Calculer et représenter dérivée de  $Y(t)$  (Aller dans : *traitement > calculs spécifiques > dérivée*, renommer la courbe en  $V_y$ , unité m/s). Faites une modélisation de la courbe et donner l'équation horaire.

Comparer avec les résultats théoriques.

[☞] Déduire la valeur de l'accélération de pesanteur  $g$ .

Conclure.

#### 1.1.3 Étude énergétique

[☞] Dans la feuille de calcul (F3) :

- Calculer l'énergie cinétique  $E_c$  de la bille.
- Calculer l'énergie potentielle  $E_p$  de la bille.
- Calculer l'énergie mécanique  $E_m$  de la bille.

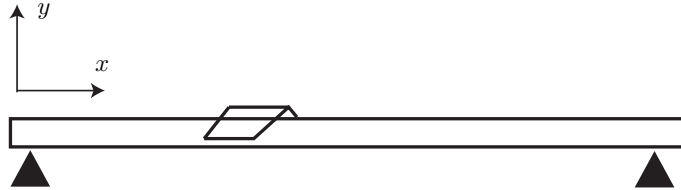
[☞] Représenter les différentes courbes  $E_c(t)$ ,  $E_p(t)$  et  $E_m(t)$ .

[☞] Comparer avec les résultats théoriques du cours et expliquer les éventuelles différences.



## 1.2 Mouvement rectiligne uniforme

[📷] Réglez la soufflerie sur un débit d'air suffisant pour que le mobile ne frotte pas sur le rail.



[📷] Enregistrer le mouvement à l'aide la caméra. Il faut placer une règle dans le même plan du mouvement (étalon).

[📷] **Lancez LatisPro** : *Edition>Analyse de séquence vidéo*. Appuyer sur "Fichiers" et charger la vidéo. La visionnez en cliquant sur "Lecture" puis sur "<<" pour revenir au début.

[📷] **Choix de l'origine et du repère** : Avancer image par image (>) jusqu'au lâcher du solide puis placer l'origine du repère d'espace, choisir l'orientation des axes.

[📷] **Étalonnage** : Définir l'étalon en utilisant sur la règle taille  $l$  (utiliser le zoom pour plus de précision).

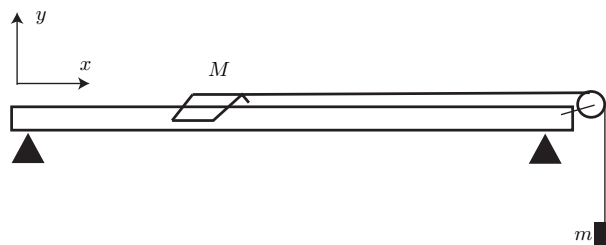
[📷] **Mesures** : Sélectionner manuellement (avec précision) les positions successives d'un point du mobile. Puis, fermer la vidéo.

[📷] **Exploitation** : Modéliser la courbe "Mouvement Y". Donner l'équation du mouvement  $x(t)$ . Conclure.

[📷] Déterminer l'énergie cinétique du mobile ainsi que son incertitude. Est-elle constante au cours du mouvement ? Que dire de l'énergie mécanique du mobile.

## 1.3 Mouvement rectiligne uniformément varié

Pour réaliser un mouvement uniformément varié, on utilise le dispositif schématisé ci-dessous.



### 1.3.1 Rappel théorique

[🔍] Calculer l'accélération  $a$  du mobile  $M$ . Commenter.

[🔍] Déterminer l'expression de la force  $T$  qu'exerce le fil sur le mobile  $M$ .

[🔍] Déterminer l'expression du travail  $W$  de  $T$  quand le mobile parcourt une distance  $d$ .

[🔍] Déterminer l'expression de la vitesse et de la position du mobile en fonction du temps  $t$ .

### 1.3.2 Enregistrement et traitement du mouvement

[📷] Enregistrer le mouvement du mobile à l'aide la caméra. Il faut placer une règle dans le même plan du mouvement (étalon).

[📷] En utilisant la même méthode d'en 1., déterminer l'accélération  $a$ .

[📷] Déterminer la force  $T$  exercée par le fil sur le mobile.

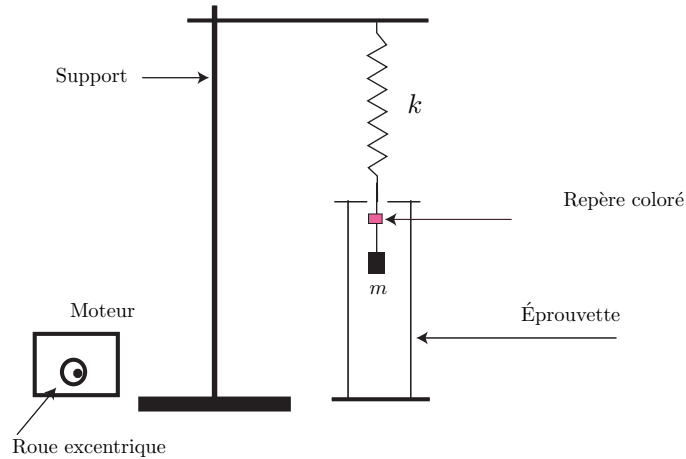
[📷] Étant donnée les incertitudes, peut-on dire que vos mesures sont conformes à la théorie ?

[📷] Déduisez de vos mesures la variation d'énergie cinétique entre deux instants. Comparez ce résultat au travail  $W$  de la force  $T$  entre ces deux mêmes instants. Conclure.

[📷] Que dire de l'énergie mécanique du mobile au cours du mouvement ?

## 2 Oscillateurs

### 2.1 Oscillateur élastique



Le ressort est de raideur  $k$  et de longueur à vide  $l_0$ .

#### 2.1.1 Rappels théoriques

[A] Déterminer l'équation différentielle de la masse  $m$ . On note  $\lambda$  le coefficient de frottement fluide et on néglige la masse du ressort.

[A] Quelle est la solution de cette équation ?

[A] Montrer que la période des oscillations est :  $T = \frac{2\pi}{\sqrt{k/m - \lambda^2/(4m^2)}}$

[A] Que devient l'expression de la période dans le cas d'un ressort de masse non négligeable ?

[A] Déterminer l'expression du décrement logarithmique  $\delta = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{z(t+nT)}{z(t)} \right)$  en fonction de  $T$  et  $\lambda$ .

#### 2.1.2 Étude dynamique

[V] Enregistrer les oscillations (quelques périodes) à l'aide de la caméra. Il faut placer une règle dans le même plan du mouvement (étalon).

[V] **Lancez LatisPro** : *Edition > Analyse de séquence vidéo*. Appuyer sur "Fichiers" et charger la vidéo. La visionner en cliquant sur "Lecture" puis sur "<<" pour revenir au début.

[V] **Choix de l'origine et du repère** : Avancer image par image (>) jusqu'au lâcher de la bille puis placer l'origine du repère d'espace, choisir l'orientation des axes.

[V] **Étalonnage** : Définir l'étalon en utilisant sur la règle taille  $l$  (utiliser le zoom pour plus de précision).

[V] **Mesures** : Sélectionner manuellement (avec précision) les positions successives de la bille. Puis, fermer la vidéo.

[V] **Exploitation** : Modéliser la courbe "Mouvement Y".

[V] Visualiser  $z(t)$  et déterminer la période des oscillations. Les amortissements sont-elles négligeable dans cette expériences ?

[V] Déterminer la période  $T_0$  des oscillations puis déduire alors la valeur  $k$ . Comparer avec la méthode statique.

#### 2.1.3 Étude énergétique

[V] Dans la feuille de calcul (F3) :

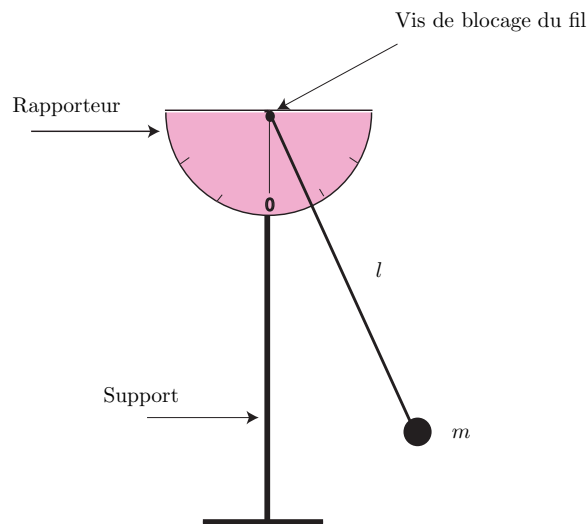
- Calculer l'énergie cinétique  $E_c$  de la masse.
- Calculer l'énergie potentielle  $E_p(z)$  de la masse.
- Calculer l'énergie mécanique  $E_m$  de la masse.

- [☞] Représenter les différentes courbes  $E_c(t)$ ,  $E_p(t)$  et  $E_m(t)$ .
- [☞] Comparer avec les résultats théoriques du cours et expliquer les éventuelles différences.

### 2.1.4 Étude de l'amortissement

- [☞] Remplir l'éprouvette d'eau et ajuster si besoin la hauteur du système pour que la masse reste tout le temps dans l'eau au cours du mouvement.
- [☞] À l'aide de LatisPro, tracer les variations  $z(t)$ .
- [☞] Déterminer la période  $T$  des oscillations amorties (pseudopériode). Comparer  $T$  et  $T_0$ .
- [☞] Calculer le décrement logarithmique  $\delta$  et déduire la valeur du coefficient de frottement fluide  $\lambda$  entre l'eau et la masse  $m$ .

## 2.2 Oscillateur simple



### 2.2.1 Rappels théoriques

- [☞] Déterminer l'équation différentielle de la masse  $m$ . On note  $\lambda$  le coefficient de frottement fluide. Le fil est inextensible et de masse négligeable.
- [☞] Quelle est la solution de cette équation ?
- [☞] Quelle est la période  $T_0$  des petites oscillations ?
- [☞] Montrer que l'expression approchée à l'ordre 2 de la période dans le cas des grandes amplitudes ( $\theta_0 < 60^\circ$ ) est :

$$T = T_0 \left( 1 + \frac{\theta_0^2}{16} \right)$$

- [☞] Déterminer l'expression du décrement logarithmique  $\delta = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{z(t+nT)}{z(t)} \right)$  en fonction de  $T$  et  $\lambda$ .

### 2.2.2 Mesure de l'accélération de pesanteur $g$

- [☞] Mesurer la longueur  $l$  du pendule.
- [☞] Pour mesurer la période avec un chronomètre, on mesure la durée  $\Delta t$  de 10 périodes et on divise par 10 ( $T = \frac{\Delta t}{10}$ ). Expliquer l'intérêt de cette méthode.
- [☞] Réaliser 5 mesures indépendantes de la période propre  $T_0$  des petites oscillations ( $\theta_0 \sim 3^\circ$ ) :  $T_0 = \dots \pm \dots$
- [☞] Déduire la valeur de l'accélération de pesanteur  $g$  :  $g = \dots \pm \dots$
- [☞] Comparer avec la valeur acceptée de  $g$ .
- [☞] Changer la valeur de la masse  $m$  puis mesurer la période des petites oscillations. Conclure.

### 2.2.3 Influence de l'amplitude des oscillations

[☞] Pour différentes valeurs de l'amplitude des oscillations  $\theta_0$ , mesurer la période des oscillations et remplir le tableau suivant :

$\theta_0(^{\circ})$	2	5	.....		30	40
$T$ (s)			.....			

[☞] Estimer l'incertitude sur la mesure de l'angle  $\theta_0$  :  $\Delta\theta_0 = \dots\dots\dots$

[☞] Tracer la courbe  $T = f(\theta_0^2)$  avec  $\theta_0$  en radians.

[☞] Modéliser cette courbe en utilisant la formule de  $T$  précédente. Cette formule est-elle vérifiée pour les petits angles ?

[☞] Déduire alors la valeur de la période propre  $T_0 = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots$ . Comparer avec la valeurs précédente

### 2.2.4 Étude énergétique

[☞] Enregistrer les petites oscillations (quelques périodes) à l'aide la caméra. Il faut placer une règle dans le même plan du mouvement (étalon).

[☞] **Lancez LatisPro** : *Edition > Analyse de séquence vidéo*. Appuyer sur "Fichiers" et charger la vidéo. La visionnez en cliquant sur "Lecture" puis sur "<<" pour revenir au début.

[☞] **Choix de l'origine et du repère** : Avancer image par image (>) jusqu'au lâcher de la bille puis placer l'origine du repère d'espace, choisir l'orientation des axes.

[☞] **Étalonnage** : Définir l'étalon en utilisant sur la règle taille  $l$  (utiliser le zoom pour plus de précision).

[☞] **Mesures** : Sélectionner manuellement (avec précision) les positions successives de la bille. Puis, fermer la vidéo.

[☞] **Exploitation** : Modéliser la courbe "Mouvement Y" (axe vertical) et la renommer  $y1$  et modéliser "Mouvement X" (axe horizontal) et la renommer  $x1$ .

[☞] Visualiser  $x1(t)$  et  $y1(t)$  puis, déterminer la période des oscillations. Les amortissements sont-elles négligeable dans cette expériences ?

[☞] Dans la feuille de calcul (F3) :

- Calculer l'énergie cinétique  $E_c$  de la masse.
- Calculer l'énergie potentielle  $E_p(z)$  de la masse.
- Calculer l'énergie mécanique  $E_m$  de la masse.

[☞] Représenter les différentes courbes  $E_c(t)$ ,  $E_p(t)$  et  $E_m(t)$ .

[☞] Comparer avec les résultats théoriques du cours et expliquer les éventuelles différences.

## 3 Mouvement de rotation d'un solide

### 3.1 Rappels

[☞] Rappeler la définition du moment d'une force par rapport à un axe.

[☞] Quelle l'expression de la vitesse  $\vec{v}(M)$  d'un point  $M$  d'un solide en rotation autour d'un axe fixe  $\Delta$  dans le référentiel d'étude ?

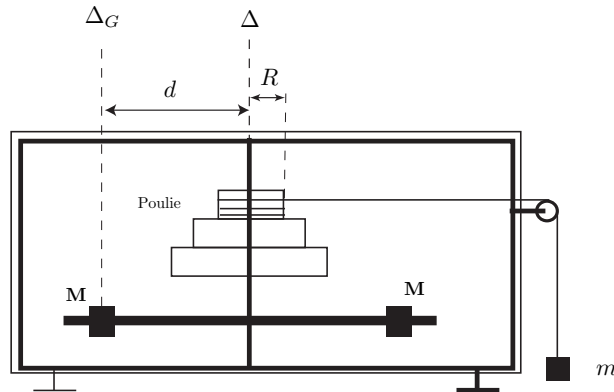
[☞] Quelle est l'expression du théorème du moment cinétique en projection sur l'axe de rotation du solide ?

[☞] Proposer quelques méthodes de mesure du moment d'inertie d'un solide par rapport à un axe.

### 3.2 Montage

On va utiliser un ensemble mécanique constitué d'une poulie à plusieurs gorges, mobile autour d'un axe vertical  $\Delta$  sur lequel est fixé un tige comportant deux masselotte diamétralement opposée, de position réglable (figure).

- **M** : masselotte cylindrique de masse  $M$  de rayon  $r$  et de hauteur  $h$ . On note  $J_G$  le moment d'inertie de **M** par rapport à l'axe  $\Delta_G // \Delta$ .
- **R**: rayon de la poulie.



- On note  $J_0$  le moment d'inertie par rapport à  $\Delta$  de l'ensemble **sans** masselottes.
- On néglige les frottements et la masse de la poulie de renvoi.

[4] Montrer que l'accélération angulaire  $\ddot{\theta}$  de l'ensemble est :

$$\ddot{\theta} = \frac{mgR}{J_0 + 2J_M + mR^2}$$

avec  $J_M = J_G + Md^2$ . Que représente  $J_M$  ?

[4] Quelle est la nature du mouvement ? Donner alors l'équation horaire du mouvement.

[4] Que peut-on dire du moment de la force exercée par le fil sur la poulie ?

### 3.3 Manipulations

#### 3.3.1 Détermination de $J_0$

[8] À l'aide du pied à coulisse, mesurer le rayon  $R$  de la poulie.

[8] Enlever les masselotes puis mesurer le temps  $t$  mis pour faire  $n$  tours. Noter la valeur de la masse  $m$  utilisée.

$n$	1	2	3	4	5	....
$t^2$ (s <sup>2</sup> )						

[8] Tracer la courbe  $n = f(t^2)$ .

[8] Expliquer l'allure de la courbe obtenue. Conclure.

[8] Faites une modélisation (régression) et donner l'équation  $n = f(t^2)$ .

[8] Dédurre la valeur du moment d'inertie  $J_0$  du système :  $J_0 = \dots \pm \dots$

#### 3.3.2 Détermination de $J_G$

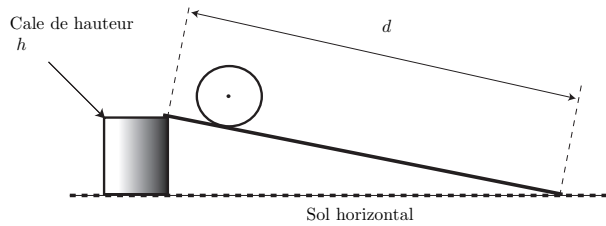
[8] Mettre en place les deux masselotes puis mesurer le temps  $t$  mis pour faire  $n$  tours.

$n$	1	2	3	4	5	....
$t^2$ (s <sup>2</sup> )						

[8] Tracer la courbe  $n = f(t^2)$ . Commenter.

[8] Faites une modélisation (régression) et donner l'équation  $n = f(t^2)$ .

[8] Dédurre la valeur du moment d'inertie  $J_0$  du système :  $J_G = \dots \pm \dots$



### 3.3.3 Détermination du moment d'inertie d'un cylindre

On souhaite déterminer le moment d'inertie  $J$  d'un cylindre en observant son roulement *sans glissement* sur un plan *faiblement* incliné d'un angle  $\alpha$ . Le rayon du cylindre est  $R$ . Sa masse est  $M$ . Il roule sur un plan incliné comme représenté ci-dessous.

[A] Déterminer l'énergie mécanique  $E_m$  du cylindre. Montrer que l'accélération de son centre de masse est :

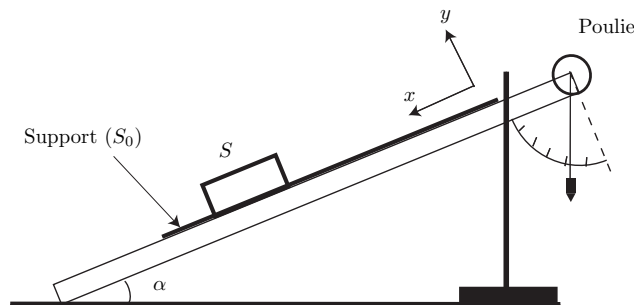
$$a = \frac{m}{m + \frac{J}{R^2}} g \sin(\alpha)$$

[M] Mesurer l'accélération  $a$  du cylindre, puis déduire son moment d'inertie  $J$ .

[M] Comparer avec la valeur théorique.

## 4 Etude des frottement solides

### 4.1 Dispositif expérimental



[A] Faire un bilan des forces pour le solide  $S$ .

[A] Montrer que le coefficient de frottement entre  $S$  et  $S_0$  est donné par :  $f = \tan(\alpha_0)$  où  $\alpha_0$  est l'angle limite permettant le démarrage du glissement de  $S$ .

[A] Dans le cas du roulement avec glissement montrer que :  $x(t) = g \cos \alpha (\tan \alpha - f) \frac{t^2}{2}$

[A] Donner l'expression de la composante tangentielle  $T$  et normale  $N$  de la force de contact  $R$  exercée par  $S_0$  sur  $S$ .

### 4.2 Manipulations

#### 4.2.1 Étude statique

[M] Placer la plan en position horizontale ( $\alpha = 0$ ). Fixer le support en plastique dessus.

[M] Disposer le solide  $S_1$  sur le plan, incliné d'un angle suffisamment faible pour qu'elle soit immobile. On augmente alors progressivement l'inclinaison du plan jusqu'à ce que le solide se mette à glisser.

[M] Repérer la valeur  $\alpha_0$  permettant le démarrage du mouvement :  $\alpha = \dots \pm \dots$ . Conclure.

[M] Déduire la valeur du coefficient de frottement statique :

$$f = \dots \pm \dots$$

[M] Déterminer la valeur du coefficient de frottement statique pour différents solides de différentes masse et différentes surface de contact.

### 4.2.2 Étude dynamique

On va enregistrer le mouvement de glissement du solide  $S$  sur le plan incliné, lorsque  $\alpha > \alpha_0$ . L'analyse de la vidéo avec LatisPro permet d'obtenir l'équation horaire du mouvement de glissement.

[☞] À l'aide la caméra, enregistrer le mouvement de glissement du solide  $S$  sur le plan incliné, lorsque  $\alpha > \alpha_0$ . Il faut placer une règle dans le même plan du mouvement (étalon).

[☞] **Lancez LatisPro** : *Edition > Analyse de séquence vidéo*. Appuyer sur "Fichiers" et charger la vidéo. La visionnez en cliquant sur "Lecture" puis sur "<<" pour revenir au début.

[☞] **Choix de l'origine et du repère** : Avancer image par image (>) jusqu'au lâcher de  $S$  puis placer l'origine du repère d'espace, choisir l'orientation des axes.

[☞] **Étalonnage** : Définir l'étalon en utilisant sur la règle taille  $l$  (utiliser le zoom pour plus de précision).

[☞] **Mesures** : Sélectionner manuellement (avec précision) les positions successives d'un point de  $S$ . Puis, fermer la vidéo.

[☞] **Exploitation** : Modéliser la courbe "Mouvement Y" (axe vertical) et la renommer  $y_1$  et modéliser "Mouvement X" (axe horizontal) et la renommer  $x_1$ . Donner l'équation horaire  $x_1(t)$  :

[☞] Déduire la valeur du coefficient de frottement solide  $f$ .

[☞] Comparer avec la valeur trouvée précédemment.

[☞] En utilisant la feuille de calcul de LatisPro (F3), calculer la composante tangentielle  $T$  et normale  $N$  de la force de contact  $\vec{R}$ .

[☞] Calculer et visualiser la vitesse de glissement  $v_g$  de  $S$  sur  $S_0$ . Conclure.

[☞] Tracer  $|T|$  en fonction de  $N$ . Conclure.

## 5 Annexe : Exemple de calcul d'incertitude

## 6 Exemples

### 6.1 Exemple 1 : Mesure d'une tension par un voltmètre

On mesure une tension par un voltmètre numérique.

- Affichage numérique :  $V = \dots$
- Incertitude de résolution (de lecture) :  $q = \dots$
- Incertitude de précision (formule du constructeur) :  $p = \dots$
- Incertitudes-type

$$- u_r = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \dots \text{ (loi uniforme)}$$

$$- u_c = \frac{p}{2\sqrt{3}} = \dots \text{ (loi uniforme)}$$

- Incertitude-type :

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_c^2} = \dots$$

- Incertitude élargie (avec un niveau de confiance de 95 %) :

$$U = 2u = \dots$$

- Résultat final :

$$V = \dots \pm \dots (\text{V})$$

## 6.2 Exemple 2 : Mesures avec la carte d'acquisition SP5-LatisPro

### 6.2.1 Mesure d'une tension

On va utiliser la méthode statistique.

- Régler le GBF pour sur une tension  $v$  continue de à 1 V.
- On utilisera Latis Pro avec un calibre +1/-1.
- Obtient-on une valeur unique de tension ? Comment l'expliquer?
- Enregistrer la liste des valeurs de tension mesurées.
- Donner la valeur moyenne  $v$  et l'écart-type  $\sigma_v$  de la distribution de valeurs de  $v$ .
- Déterminer l'intervalle de confiance à 95%.
- Comparer avec la plage de mesure  $a = \frac{v_{max}-v_{min}}{2}$ .
- Résultat :

$$V = \dots \pm \dots V$$

Cette incertitude pourra être utilisée pour toute mesure ultérieure de la tension.

### 6.2.2 Incertitude sur une mesure mécanique

On va traiter un exemple simple de chute parabolique (la vidéo est disponible dans la bibliothèque de LatisPro)

#### 6.2.2.1 Détermination des incertitudes

On va utiliser la méthode statistique.

- Ouvrir la vidéo est faire le paramétrage habituel (axes et étalon).
- Lancer l'acquisition et pointer le même point sur les images successives.
- Donner la valeur de l'écart-type  $\sigma_x$  de la distribution de valeurs de la position  $x$  (ou  $y$ ).
- Donner alors l'incertitude élargie  $\Delta x$  sur une mesure la position.
- Donner une estimation de l'incertitude  $\Delta t$  sur le temps.

#### 6.2.2.2 Détermination du champ de pesanteur

On va maintenant traiter la vidéo de chute parabolique pour déterminer la valeur du champ de pesanteur  $g$ .

- Ouvrir la vidéo est faire le paramétrage habituel (axes et étalon).
- Lancer l'acquisition et pointer la balle sur les images successives.
- Tracer les courbes de  $x(t)$  et  $y(t)$ .
- Faire une modélisation. Introduire les incertitudes mesurées dans le paragraphe précédent.
- Déduire la valeur de  $g$  :

$$g = \dots \pm \dots \text{m.s}^{-2}$$



### 6.3 Exemple 3 : Mesure d'un temps avec un chronomètre

Exemple : Mesure de la période d'un pendule simple. Données du constructeur :

- Résolution :  $1/100$  s
- Précision : 0,0006%
- Affichage numérique :  $T = \dots$
- Incertitude de résolution :  $q = \dots$
- Incertitude de précision :  $p = T * 0,0006/100 = \dots$
- Incertitude aléatoire de l'opérateur lors du déclenchement et l'arrêt.  
On considère que  $u_{op} \approx 0,1$  s (temps de réaction).

- Incertitudes-type

-  $u_r = \frac{q}{2\sqrt{3}} = \dots\dots$

-  $u_c = \frac{p}{2\sqrt{3}} = \dots\dots$

- L'incertitude-type sur  $T$  :

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_c^2 + u_{op}^2} = \dots$$

- Incertitude élargie (avec un niveau de confiance de 95 %) :

$$U = 2u = \dots\dots$$

- Résultat final :

$$T = \dots \pm \dots\dots s$$