



Département de physique

## La Collection TP de PHYSIQUE

### Travaux Pratiques de MECANIQUE



Roue de Maxwell



Etude d'un ressort



**Faculté des Sciences**  
**Département de Physique**



**Travaux Pratiques de Mécanique 1ère année**

**Liste des séances de TP**

**0. Séance d'introduction**

**1. Etude d'un récepteur (M)**

**2. Etude d'un mouvement circulaire (G)**

**3. Enregistrement et étude d'un mouvement rectiligne (G)**

**4. Détermination de la constante de raideur d'un ressort (M)**

**G = Graphique; M= Sur Matériel**



## **TP Introduction : Séance de préparation aux travaux pratiques**

### **1. Termes associés**

Méthodes de mesure, appareils de mesure, incertitudes sur les mesures, calculs d'erreurs, tableaux de mesure, tracé de graphes, extrapolation, interpolation, rédaction d'un compte-rendu.

### **2. Principe et objectifs**

Les travaux pratiques de physique constituent l'élément indispensable de l'étude de la physique.

D'une part, on apprend les méthodes fondamentales de mesure, on se familiarise avec les appareils de mesure; on apprend à faire correctement les mesures et à évaluer leurs incertitudes.

D'autre part, on étudie certains phénomènes physiques, ce qui complète les connaissances reçues pendant les cours théoriques. On apprend également à étudier méthodiquement et logiquement les phénomènes et d'en tirer les conclusions nécessaires.

### **3. Conseils généraux**

#### **3.1. Avant la séance :**

Pour être profitable, une manipulation doit avoir été préparée à l'avance par l'étude du texte de la manipulation et des paragraphes correspondants du cours. Au début de chaque séance de TP, l'enseignant procédera à une interrogation écrite brève (environ 10mn) pour évaluer la préparation de la manipulation. Il faut donc, en conséquence, que l'étudiant ait préparé à l'avance la partie théorique du TP (titre de la manipulation, son but, théorie brève du phénomène à étudier, principe de la méthode de mesure...).

#### **3.2. Pendant la séance :**

Pendant la séance, l'étudiant devra :

- a – examiner le dispositif expérimental et les appareils de mesure; se rendre compte du rôle de leurs différentes parties.
- b – procéder à la préparation expérimentale de la manipulation (montage des dispositifs, des circuits électriques, ... etc) en cherchant toujours à opérer dans un cadre logique.
- c – manipuler les appareils de mesure avec la plus grande attention, n'encombrent pas votre table de travail d'objets inutiles tels que livres, cahiers ...
- d – le dispositif expérimental comprend dans certains TP un circuit électrique; vérifier que votre montage correspond bien au schéma indiqué; le faire toujours contrôler par l'enseignant de TP avant de le relier à la source de tension (secteur ou pile).

e - noter tous les résultats de mesure obtenus sur votre feuille de réponse.

Ces résultats doivent presque toujours être groupés dans un tableau. Inscrire les résultats au fur et à mesure qu'ils sont obtenus.

f- bien indiquer les unités choisies ; dans une colonne de résultats exprimés avec le même unité, on se contentera d'indiquer l'unité une fois pour toutes en tête de colonne.

g- vérifier rapidement, par quelques calculs approchés, que l'ordre de grandeur des phénomènes observés conduit à un résultat vraisemblable; cela permet de déceler les mesures défectueuses et de les refaire.

h- lorsque toutes les mesures sont terminées, regrouper les appareils comme ils étaient à votre arrivée; assurez-vous que la table de travail et les alentours sont aussi propres qu'au début de la séance.

i- compléter alors la rédaction de la feuille de réponse (tableaux de mesures calculs et graphes sur papier millimétré, calculs d'incertitude et conclusions).

#### **4. Incertitudes et calculs approchés**

Étant donné l'extrême importance des calculs d'incertitude dans la pratique d'un ingénieur, on se propose de rappeler quelques notions fondamentales.

##### **4.1. Incertitudes systématiques et accidentelles :**

Quand un expérimentateur répète plusieurs fois une même mesure, en s'efforçant de se placer dans les mêmes conditions, l'expérience montre que les différentes valeurs obtenues ne sont pas rigoureusement les mêmes.

Donc une mesure physique ne donne jamais la valeur exacte de la grandeur à mesurer. Son résultat est seulement approché par la suite d'un certain nombre d'erreurs ou d'incertitudes.

On admet deux genres d'incertitudes : les incertitudes systématiques (dues au défaut de justesse des instruments de mesure ou à l'imperfection de l'observation) et les incertitudes accidentelles provenant d'un défaut de sensibilité et de fidélité d'un appareil, ainsi que de l'imperfection des sens de l'observateur.

##### **4.2. Calculs d'incertitudes :**

On suppose que nos appareils et méthodes de mesures excluent toutes possibilités d'incertitudes systématiques et on se propose d'évaluer l'incertitude accidentelle sur le résultat de l'expérience.

##### **a- Erreur absolue :**

Soit à mesurer une certaine grandeur A. Si l'on recommence plusieurs fois la mesure, on obtient

des nombres légèrement différents. Si  $X$  est la valeur exacte de  $A$ ,  $a$  le résultat de la mesure, la différence :  $\delta a = a - X$  est appelée erreur absolue de la mesure.

**b- Incertitude absolue** : présentation du résultat d'une mesure

L'erreur absolue n'étant pas connue, on doit se contenter d'en rechercher une limite supérieure  $\Delta a$ , appelée incertitude absolue, telle que :  $|\delta a| \leq \Delta a$ .

On prend souvent :

- pour valeur approchée  $a$  de  $A$ , la valeur moyenne arithmétique des résultats des  $n$  mesures

$$\text{effectuées : } a = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}$$

- pour incertitude absolue  $\Delta a$ , la valeur moyenne des valeurs absolues des écarts entre chaque résultat et cette moyenne  $a$  :

$$\Delta a = \frac{|a_1 - a| + |a_2 - a| + |a_3 - a| + \dots + |a_n - a|}{n}$$

**Exemple** : supposons qu'à la suite de la mesure d'une longueur très voisine de 2 m, on soit ainsi conduit à adopter :

- pour valeur approchée :  $a = 2,001$  m
- pour incertitude absolue :  $\Delta a = 1\text{mm} = 0,001\text{m}$

On peut affirmer que la longueur exacte  $X$  est comprise entre  $a - \Delta a$  et  $a + \Delta a$ , ce qui donne ici :  $2,000\text{m} \leq X \leq 2,002\text{m}$  ; on condense cette double inégalité sous la forme :

$$X = a \pm \Delta a \text{ ou } X = 2,001 \pm 0,001\text{m}.$$

**c- Incertitude relative** : précision d'une mesure.

On appelle incertitude relative le rapport  $\Delta a / X$ . Une mesure est d'autant plus précise que l'incertitude du résultat est plus petite, comparée à ce résultat : c'est pourquoi l'on se sert de l'incertitude relative  $\Delta a / a$  pour caractériser la précision d'une mesure.

**d- Mesures indirectes** : calculs d'incertitudes.

Pour exprimer les incertitudes  $\Delta g$  ou  $\Delta g/g$  d'une grandeur  $G$  calculée à partir d'autres grandeurs  $A, B, C, \dots$  il faut procéder à un calcul d'erreurs à partir des incertitudes qui entachent les nombres  $a, b, c, \dots$  en utilisant la relation entre les nombres  $g, a, b, c, \dots$

- **Théorème des incertitudes absolues** :

L'incertitude absolue sur une somme ou une différence est égale à la somme des incertitudes absolues sur chaque terme.

Si :  $g = a + b$  ou  $g = a - b$ , on a :  $\Delta g = \Delta a + \Delta b$

- **Théorème des incertitudes relatives :**

L'incertitude relative sur un produit ou un quotient est égale à la somme des incertitudes relatives sur chaque terme.

$$\text{Si : } g = a.b \text{ ou } g = \frac{a}{b}, \text{ on a : } \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$$

**Corollaire :** a) Si  $g = a^n$ , on a toujours  $\frac{\Delta g}{g} = n \frac{\Delta a}{a}$

b) Si  $g = a^n b^m / c^p$ , on a :  $\frac{\Delta g}{g} = n \frac{\Delta a}{a} + m \frac{\Delta b}{b} + p \frac{\Delta c}{c}$

**Exemple :** volume d'un cylindre

$$V = D^2 \frac{h}{4}, \text{ on a : } \frac{\Delta V}{V} = 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}$$

## **5. Représentation graphique**

Dans la plupart des cas, on a recours à la représentation graphique des résultats obtenus. Pour tracer le graphique, on fait tout d'abord le choix d'un système de coordonnées et d'échelle en abscisses et en ordonnées.

Ensuite, on trace les courbes en utilisant les points représentatifs.

**Remarques :** Tous les résultats partiels doivent être groupés dans un tableau. Les mesures étant incertaines, nous obtiendrons une ligne brisée si nous nous contentions de joindre les points correspondants à une série de mesures. Mais si le phénomène est continu, la courbe ne doit pas présenter de rupture de pente, elle doit avoir une allure régulière. Si nous avons effectué un grand nombre de mesures, nous obtiendrons un nuage de points et la courbe devra traverser le nuage là où il est le plus dense.

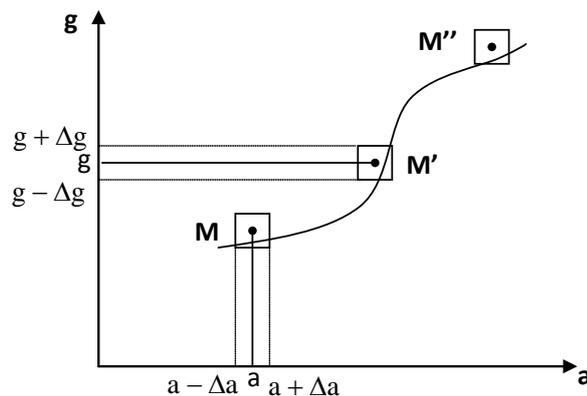
Habituellement, on porte sur le graphique les incertitudes des mesures particulières  $g + \Delta g$  tracées parallèlement à OY et  $a + \Delta a$  suivant OX comme le montre la figure 1.

Soit  $g = f(a)$  la grandeur dont la variation a été étudiée en fonction de la variable a.

Son graphique est donné sur la figure ci-contre.

Les points M, M', M'' donnent les valeurs

moyennes des mesures particulières, tandis que  $\Delta g$  et  $\Delta a$  sont les incertitudes



**Figure 1**

sur  $g$  et  $a$ . La courbe passe au plus près des points représentatifs à l'intérieur des rectangles d'erreurs  $\Delta g, \Delta a$ .

**Attention:** Le choix de l'échelle est très important; il faut veiller à ce qu'il y ait une utilisation optimale de la feuille de papier millimétré (le graphe ne doit pas occuper une toute petite portion de la feuille).

## **6. Exploitation graphique**

### **6.1. Vérification d'une loi connue :**

Si une loi s'exprime par une fonction linéaire, il n'y a pas de difficulté à vérifier si les points s'alignent effectivement.

Si la loi est parabolique, exponentielle, ..., il devient nécessaire de la représenter point par point et de chercher à la superposer à la courbe expérimentale.

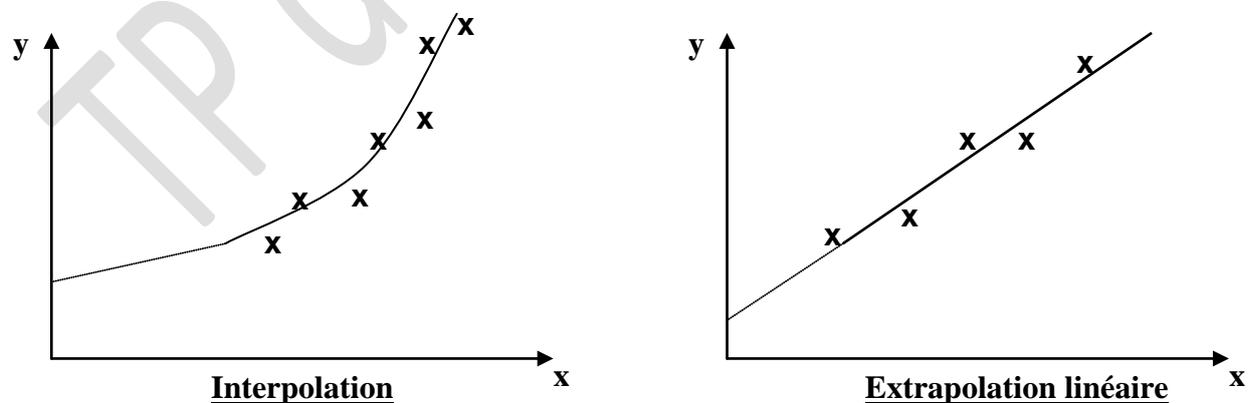
Une autre méthode, beaucoup plus simple, consiste à faire un changement de variable pour obtenir une droite.

**Exemples :** - Si la loi est parabolique  $y = ax^2$ , on fait le changement de variable  $x^2 = X$ , le graphe de  $y = aX$  est alors une droite.

- Si la loi est hyperbolique  $y = \frac{a}{x}$ , on obtiendra une droite avec le changement de variable suivant :  $X = \frac{1}{x}$ .

### **6.2. Interpolation et extrapolation :**

Il arrive que la mesure de  $x$  ne peut être effectuée et, par la suite, la valeur de  $y = f(x)$  reste inconnue. Dans ce domaine de valeurs  $x$ , le graphe de  $y$  ne peut pas être tracé. En ce cas, on effectue l'interpolation en faisant continuer la courbe dans le domaine des valeurs non mesurées.



**Figure 2 : Interpolation et extrapolation**

### **6.3. Cas d'un graphique linéaire:**

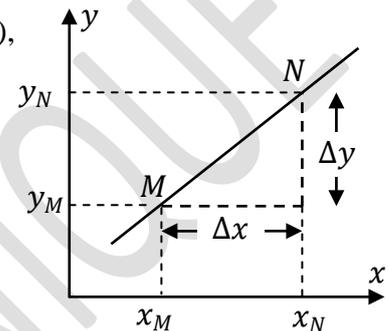
Souvent, dans le cas dans le cas des représentations linéaires entre deux grandeurs physiques  $y$  et  $x$ , on est amené à déterminer graphiquement la constante de proportionnalité entre ces grandeurs. Cela revient finalement à calculer la pente de la droite  $y=f(x)$  ; la procédure de calcul se fait comme suit :

- après avoir tracé la droite liant les  $x$  et  $y$  (passant par le maximum de points expérimentaux et laissant autant de points de part et d'autre de la droite), on choisit deux points quelconques de cette droite (de préférence éloignés l'un de l'autre)  $M$  et  $N$ ,

- on trace en pointillés deux segments de droite, l'un parallèle l'axe  $Ox$  et passant par  $M$ , l'autre parallèle à  $Oy$  et passant par  $N$  (voir figure 3 ci-dessous),

- la pente ' $a$ ' de la droite est alors donnée par :

$$a = \frac{y_N - y_M}{x_N - x_M} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$



## 7. Travail à effectuer

### 7.1. Tracé de graphes :

L'étude d'un mouvement rectiligne a donné les tableaux de mesures suivants :

Tableau 1 :

Temps (s)	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8
Position (m)	0.000	0.025	0.094	0.198	0.332	0.490	0.668	0.862	1.069	1.207

Tableau 2 :

Temps (s)	10.1	10.3	10.5	10.7	10.9	11.1	11.3	11.5	11.7	11.9
Vitesse (m/s)	0.125	0.345	0.520	0.670	0.790	0.890	0.970	1.035	1.090	1.135

- Tracer les graphes donnant respectivement la position et la vitesse du mobile en fonction du temps.

### 7.2. Incertitude et précision :

Pour mesurer l'épaisseur d'un cylindre creux, on mesure les diamètres intérieur  $D_1$  et extérieur  $D_2$  et on trouve :

$$D_1 = (19.5 \pm 0.1) \text{ mm}$$

$$D_2 = (26.7 \pm 0.1) \text{ mm}$$

- Donner le résultat de la mesure et sa précision.



## TP n° 1 : Etude d'un récepteur

### 1. Termes associés

Récepteur, moteur, conversion d'énergie, énergie électrique, énergie mécanique, énergie potentielle, puissance, puissance utile, puissance absorbée, puissance mécanique, rendement d'un moteur.

### 2. Principe et objectifs

Un moteur, fixé sur une console et alimenté par une tension  $V$ , porte à son extrémité une poulie sur laquelle est enroulé un fil supportant à son extrémité inférieure libre une masse  $M$ . Le principe est de déterminer le rendement de ce moteur, défini comme étant le rapport entre l'énergie utile fournie (de l'énergie mécanique) et l'énergie reçue ou absorbée (ici de l'énergie électrique). Il s'agit également d'établir la variation de ce rendement en fonction de l'énergie mécanique restituée, à travers la masse  $M$ .

### 3. Théorie et évaluation

On appelle récepteur, tout dispositif qui reçoit de l'énergie électrique et qui la restitue sous plusieurs autres formes. De ce point de vue, un moteur est un récepteur dont le but est de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Considérons un moteur dans un circuit électrique.

Soient  $A$  et  $B$  les bornes de ce récepteur portées respectivement aux potentiels  $V_A$  et  $V_B$  ( $V_A > V_B$ ).

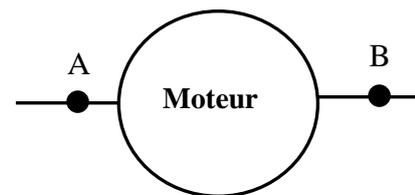
Choisissons un intervalle de temps  $\Delta t$ , centré sur  $t$ , tel que la différence de potentiel  $V_A - V_B$

soit sensiblement constante au cours de cet intervalle de temps. Si  $\Delta q$  est la charge électrique qui traverse ce récepteur pendant  $\Delta t$ , l'énergie électrique absorbée pendant ce même temps est:

$$W = \Delta q (V_A - V_B) \quad (1)$$

La puissance moyenne absorbée par le moteur pendant cet intervalle  $\Delta t$  est donné donc :

$$P_m = \frac{\Delta q}{\Delta t} (V_A - V_B) \quad (2)$$



**Figure 1: Récepteur**

Mais  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}$  lorsque  $\Delta t \rightarrow 0$  est l'intensité du courant  $I(t)$ , d'où on reçoit la relation pour la puissance instantanée :

$$P(t) = (V_A - V_B) \cdot I(t) \quad (3)$$

Si, dans le circuit, la différence de potentiel ( $V_A - V_B$ ) est constante en fonction du temps, la puissance instantanée sera elle-même constante, à condition que l'intensité ne varie pas.

On appellera **rendement** du moteur  $R(t)$ , le rapport de la puissance utile qu'il fournit à l'instant  $t$  à la puissance totale qu'il absorbe au même instant :

$$R(t) = P_u(t) / P_a(t) \quad (4)$$

On se propose, dans cette manipulation de mesurer le rendement du moteur lorsqu'il est employé à élever des charges de masse  $m$ .

## 4. Manipulation

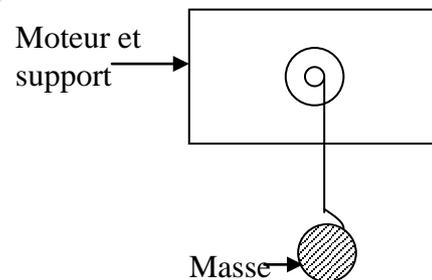
### 4.1. Montage expérimental:

Le montage expérimental est celui montré en figure 2. On dispose:

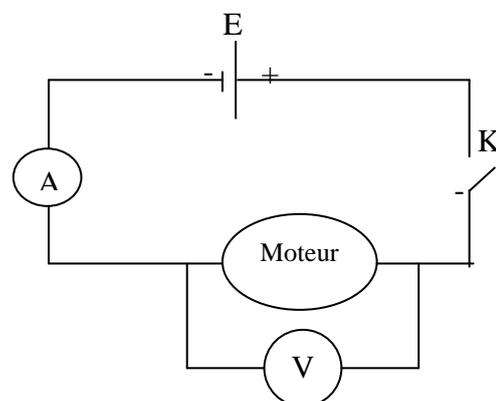
- d'un moteur fixé sur une console située à 1,8 m environ du sol; il fonctionne sous une tension continue de l'ordre de 4 volts et porte à son extrémité une poulie sur laquelle est enroulé un fil nylon.
- d'une batterie de f.e.m.  $E$ .
- d'un voltmètre et d'un ampèremètre
- d'un interrupteur permettant de couper à volonté l'alimentation du moteur
- d'un chronomètre et de masses marquées
- d'une règle graduée

### 4.2. Méthodes de mesure:

- 1- Réaliser le montage 2 ci-contre.



**Figure 2a:** Montage expérimental



**Figure 2b:** Montage électrique

2- Décrire la méthode de mesure pour déterminer la puissance électrique absorbée par le moteur fonctionnant à vide ou en charge.

3- Décrire et justifier la méthode de mesure pour déterminer la puissance mécanique restituée par le moteur lorsqu'il élève un matériau de masse  $m$  d'une hauteur  $h$ .

On rappelle à cet effet que lorsqu'on élève une masse  $m$  d'une hauteur  $h$ , sa variation d'énergie potentielle est  $mgh$ .

4- Etude de la variation du rendement  $R$  du moteur en fonction de la masse  $m$ .

**Remarque :** Vous ne devez en aucun cas dépasser la charge maximale autorisée (ici 260g).

Remplir le tableau de mesures suivant :

M	$V_A - V_B$	I	t	h	Pu	Pa	R(M)
60g							
110g							
160g							
210g							
360g							

- Tracer le graphe  $R(M)$

- Quelle conclusion tirez-vous de la courbe  $R(M)$  dans la région où le rendement est le plus élevé ?

Quelle devrait être l'allure de la courbe  $R(M)$  pour des masses plus grandes que la masse maximale ?

- L'énergie mécanique est-elle égale à l'énergie absorbée. Si non, sous quelle forme l'énergie manquante apparaît-elle ?



## **TP n° 2 : Etude d'un mouvement circulaire** **(TP graphique 2)**

### **1. Termes associés**

Mobile, mouvement circulaire dans le plan, étude cinématique et dynamique, vecteur position, vecteur déplacement, référentiel cartésien, vecteur vitesse moyenne, vecteur accélération et ses composantes intrinsèques (normale et tangentielle), équation horaire du mouvement.

### **2. Principe et objectifs**

L'objectif de ce TP est l'enregistrement et l'étude d'un mouvement circulaire d'un mobile (mouvement dans un plan). Une fois le mouvement du mobile enregistré, on détermine les différentes positions occupées par ce mobile à des intervalles de temps égaux; à partir de ces positions, on détermine les vecteurs déplacements et les vecteurs vitesses moyennes et instantanées, puis les vecteurs accélération ainsi que leurs composantes intrinsèques (accélération normale et accélération tangentielle); enfin, on déterminera l'équation horaire  $s(t)$  du mouvement circulaire.

### **3. Théorie et évaluation**

Un mouvement circulaire est un mouvement dont la trajectoire est un cercle caractérisé par son centre  $O$  et son rayon  $R$ . Il est logique de choisir l'origine du repère en centre du cercle et l'axe  $OZ$  perpendiculaire au plan contenant la trajectoire. Le système de coordonnées polaires est bien adapté pour ce type de mouvement. Les équations horaires du mouvement peuvent s'écrire:

$$r(t) = R = \text{constante} \quad \text{et} \quad \theta = \theta(t) \quad (1)$$

La forme de la fonction  $\theta = \theta(t)$  qualifiera le type de mouvement circulaire. Suivant la forme de la fonction  $\theta = \theta(t)$ , le mouvement sera dit circulaire et :

- Uniforme si  $\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0$  avec  $\dot{\theta} = \omega_0 = \text{constante}$  (2)
  - Uniformément varié (accélééré ou décélééré) si  $\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_0 = \text{constante}$ , soit  $\dot{\theta} = \omega = \ddot{\theta}_0 t + \dot{\theta}_0$  et  $\theta(t) = \frac{1}{2} \ddot{\theta}_0 t^2 + \dot{\theta}_0 t + \theta_0$  (3)
  - Sinusoïdal si  $\theta(t) = \theta_m \cos(\omega t + \varphi)$ . (4)
- **Mouvement circulaire quelconque**

Les caractéristiques cinématiques du mouvement circulaire peuvent se déduire du schéma présenté sur la figure 1 et sont données par :

$$\overrightarrow{OM}(t) = (r \cos\theta)\vec{i} + (r \sin\theta)\vec{j}$$

ou bien  $\overrightarrow{OM}(t) = r\vec{u}_r(t) = R \vec{u}_r(t)$  (5)

La vitesse est donnée l'expression:

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{d(r\vec{u}_r)}{dt} = R \frac{d\vec{u}_r}{dt} = R\dot{\theta}\vec{u}_\theta = R\omega(t)\vec{u}_\theta$$
 (6)

le vecteur accélération est déduit en dérivant  $\vec{v}$ :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = R \frac{d(\omega\vec{u}_\theta)}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} \vec{u}_\theta + R\omega \frac{d\vec{u}_\theta}{dt}$$

$$\text{soit: } \vec{a} = -R\omega^2 \vec{u}_r + R\dot{\omega} \vec{u}_\theta$$
 (7)

En adoptant le repère  $(O, \vec{u}_n, \vec{u}_t)$ , avec

$\vec{u}_n = -\vec{u}_r$  et  $\vec{u}_t = \vec{u}_\theta$ , on obtient les composantes intrinsèques de l'accélération:  $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$  avec:

$\vec{a}_t$  composante tangentielle (ou transversale) =  $\frac{dv}{dt} \vec{u}_t$  toujours parallèle au vecteur vitesse

→ représentant physiquement la variation du module du vecteur vitesse,

$\vec{a}_n$  composante normale (ou radiale) =  $\frac{v^2}{R} \vec{u}_n = R\omega^2 \vec{u}_n$  toujours dirigée vers le centre du cercle

→ représentant physiquement la variation de la direction du vecteur vitesse.

### • Mouvement circulaire uniforme

Dans ce cas, la vitesse angulaire est constante:  $\omega = \omega_0 = \frac{d\theta}{dt} = \text{cste}$ ; l'équation horaire angulaire s'écrit dans ce cas:  $\theta = \omega_0 t + \theta_0$ ; la vitesse sera alors:  $v = R\omega_0 = \text{cste}$ .

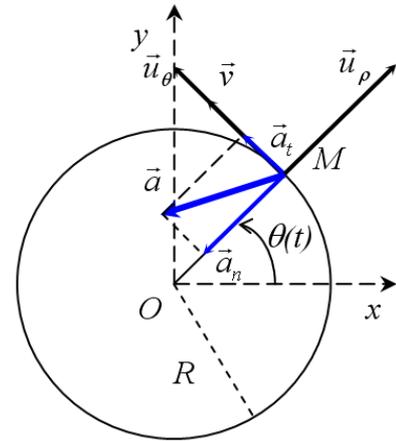
## 4. Manipulation

### 4.1. Enregistrement du mouvement :

Le mobile utilisé est une sonnette électrique munie d'un marteau qui frappe tous les  $1/100^{\text{ème}}$  de seconde sur du papier carbone (même principe que l'enregistreur utilisé en TP N°1), voir figure 1.

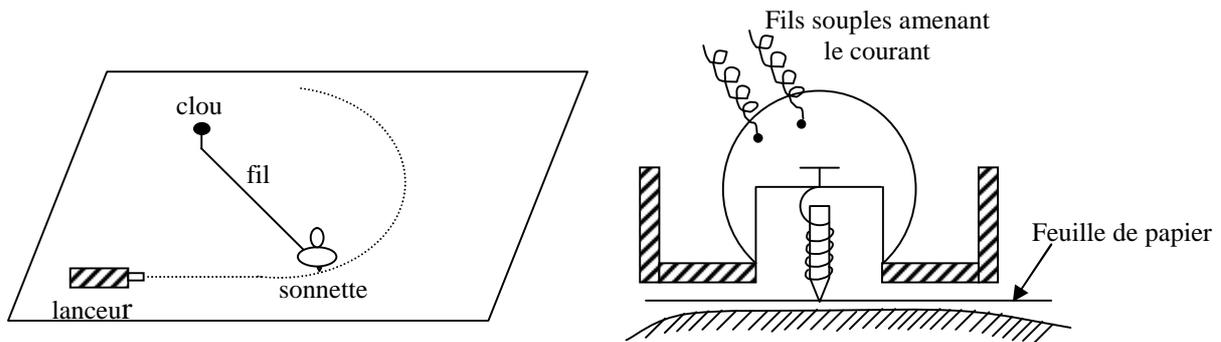
Cette sonnette est fixée sur un disque métallique lisse percé d'un trou ; lorsque la sonnette est mise en marche, le marteau de la sonnette, passant à travers le trou, laisse des traces à intervalles de temps réguliers sur une feuille de papier posée sur la table.

La sonnette, lancée sur la table, enregistre donc non seulement sa position mais aussi l'instant auquel correspond cette position. Nous avons attaché la sonnette à une ficelle dont l'autre extrémité était fixée à un clou planté sur la table horizontale. Le fil étant tendu, nous avons lancé la sonnette sur la table à l'aide d'un lanceur ; elle a décrit un mouvement circulaire.



**Figure 1** : Vecteurs vitesse et accélération dans le cas d'un mouvement circulaire quelconque

Le document ci-joint (page 28) représente la feuille de papier de l'enregistrement à l'échelle  $\frac{1}{2}$ . Vous utiliserez ce document s'il ne vous est pas possible d'enregistrer un document à l'échelle 1 en salle de TP. Dans ce cas, placer sous le document à l'échelle  $\frac{1}{2}$ , une grande feuille de papier (type nappe de restaurant) et reproduire le document à l'échelle 1 : il suffit de tracer un cercle de rayon double de celui du document et de prolonger les rayons OM du document jusqu'à leur intersection avec ce cercle.



#### 4.2. Étude vectorielle du mouvement :

- Dessinez les vecteurs déplacement successifs de la sonnette  $\Delta\vec{r}$ .
  - En déduire les modules des vecteurs-vitesse moyenne successifs.
  - Après avoir fait le choix d'une échelle, représentez ces vecteurs  $\overrightarrow{v_{moy}}$ .
  - A quels vecteurs vitesse instantanée peut-on assimiler ces vecteurs  $\overrightarrow{v_{moy}}$  ?
  - Déterminer graphiquement les vecteurs variation de vitesse  $\Delta\vec{v}$  successifs.
- En déduire les vecteurs accélération pour différentes positions de la sonnette (prendre environ 4 positions). Indiquez l'échelle choisie pour représenter ces vecteurs.

#### 4.3. Étude du mouvement en coordonnées intrinsèques :

- Vous pouvez maintenant remplacer chaque vecteur accélération par ses composantes  $\vec{a}_n$  et  $\vec{a}_t$  sur deux axes, tangent et normal à la trajectoire, définis par les vecteurs unitaires  $\vec{u}_n$  et  $\vec{u}_t$ .  
Peut-on dire que  $\vec{a}_t$  est constante ? Même chose pour  $\vec{a}_n$  ?
- Tracer le graphe  $v(t)$  de la vitesse en fonction du temps. En déduire l'équation (horaire) du mouvement  $s(t)$ .
- En comparant les résultats précédents, peut-on dire que :  $a_t = \frac{dv}{dt}$  et que  $a_n = \frac{v^2}{R}$  ?

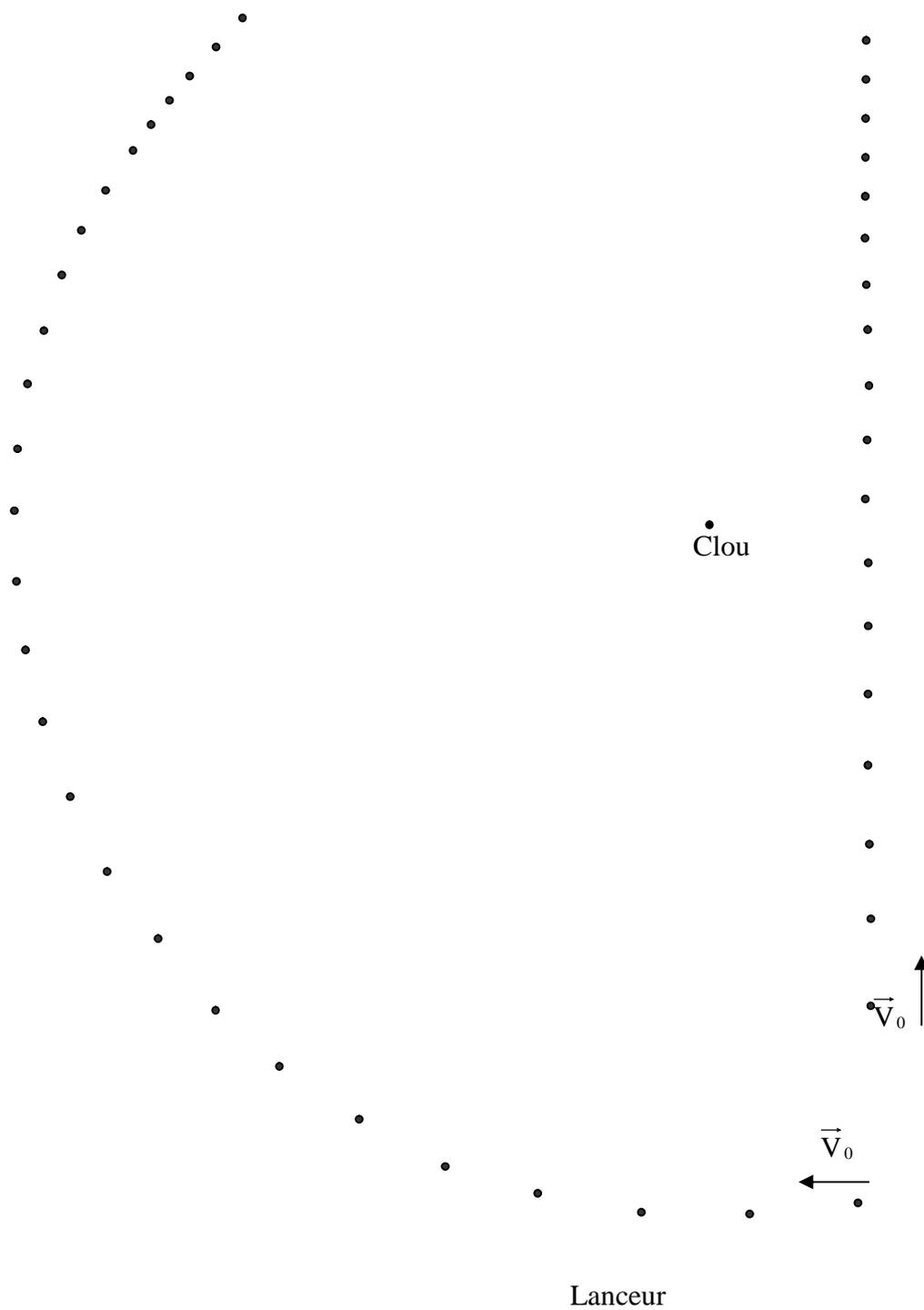
#### 4.4. Étude dynamique du mouvement :

a – Si vous savez déjà les forces qui agissent sur un mobile et son accélération, représentez dans un trièdre  $\vec{u}_t, \vec{u}_n, \vec{k}$  ( $\vec{k}$  vertical) les différentes forces agissant sur la sonnette.

Quelles sont les forces constantes et les forces variables ? (faites la distinction entre direction et module).

a- A côté de l'enregistrement du mouvement circulaire, figure l'enregistrement à l'échelle 1 du mouvement de la sonnette décrochée du fil et lancée par le lanceur sur la table horizontale. Déduisez l'accélération  $\vec{a}_2$  de ce deuxième mouvement.

Quelle relation existe-t-il entre  $\vec{a}_2$  et  $\vec{a}_t$  ? Expliquez par les forces.



$\Delta t = 0.002s$

Echelle


0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 (cm)

**Document : Mouvement circulaire TP**



## TP n° 3 : Etude d'un mouvement rectiligne

### 1. Termes associés

Mobile, trajectoire rectiligne, référentiel cartésien, vecteur position, vitesse instantanée, vitesse moyenne, accélération, aire sous une courbe, pente d'une droite.

### 2. Principe et objectifs

L'objectif de ce TP est l'enregistrement et l'étude d'un mouvement rectiligne. Une fois le mouvement du mobile enregistré, on détermine les différentes positions occupées par ce mobile à des intervalles de temps égaux; à partir de ces positions, on détermine les vitesses instantanées et moyennes, pour accéder finalement à l'accélération du mouvement et en déduire ainsi la nature du mouvement.

### 3. Théorie et évaluation

La position M d'un mobile est repérée sur un axe orienté Ox par le vecteur position :

$$\overrightarrow{OM}(t) = x(t)\vec{i} \quad (1)$$

où  $\vec{i}$  est le vecteur unitaire sur l'axe Ox alors que x est l'abscisse cartésienne qui est une fonction réelle du temps. Le vecteur vitesse instantanée est défini par :

$$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} \quad (2)$$

qu'on peut écrire sous la forme :

$$\vec{v}(t) = v_x(t)\vec{i} \quad \text{avec } v_x = \frac{dOM}{dt} = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

Le vecteur accélération est obtenu en dérivant le vecteur vitesse par rapport au temps ; il s'écrit :

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (4)$$

et sa composante sur l'axe Ox est :

$$a_x(t) = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5)$$

Comme le montre la relation (3), on peut déterminer la vitesse en dérivant l'expression analytique de l'abscisse  $x(t)$ . Il en est de même pour l'accélération qu'on obtient en dérivant l'expression analytique de la vitesse  $v(t)$ .

Lors de l'étude expérimentale du mouvement du mobile, les positions de ce dernier ne sont connues qu'à certains instants uniquement, à intervalles de temps réguliers en général :

$x(t_0), x(t_0 + \Delta t), x(t_0 + 2 \Delta T), \dots$  Pour calculer la vitesse ou l'accélération, on est amené à faire des approximations pour le calcul des dérivées. Ces approximations donnent, en général, de bons résultats en accord avec la théorie.

Rappel: Graphiquement, la dérivée en un point est égale à la pente de la tangente à la courbe en ce point.

Il est possible aussi de déterminer la vitesse si l'expression analytique de l'accélération est connue; il suffit de faire un calcul intégral. Graphiquement, l'intégrale d'une fonction est égale à l'aire (algébrique) de la surface délimitée par la courbe, l'axe des temps et les deux droites verticales qui représentent les bornes d'intégration:

$$\Delta x = x(t_2) - x(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \equiv \pm \text{aire sous la courbe } v(t).$$

Remarque: Dans l'étude du mouvement unidirectionnel, on simplifie généralement la notation en écrivant simplement  $v$  à la place de  $v_x$  ou  $a$  au lieu de  $a_x$ . Ces termes ne doivent pas être confondus avec les modules.

## **4. Manipulation**

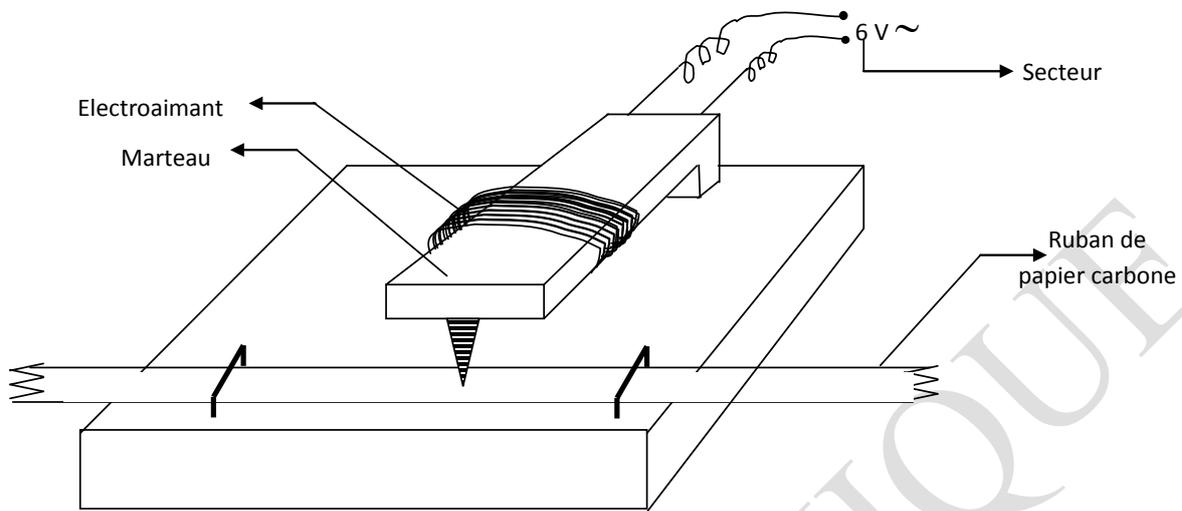
### **4.1. Enregistrement du mouvement :**

Pour étudier le mouvement d'un corps, il faut pouvoir repérer sa position à différents instants et, de préférence, à des intervalles de temps égaux.

Sur votre table, un enregistreur alimenté en courant alternatif sert de dispositif pouvant enregistrer un mouvement (voir figure 1): excité par le courant du secteur, le marteau de l'enregistreur frappe le ruban de papier carbone tous les  $1/50^{\text{ème}}$  de seconde ; cette bande de papier se déplaçant sous le marteau est donc marqué (datée) tous les 1/50s.

A l'une des extrémités de la bande est attaché un mobile (dans notre cas un chariot). Le schéma 2 montre le déplacement du chariot et l'enregistrement progressif de la bande de papier :

- l'enregistreur est mis sous tension et, à un instant que l'on considère comme l'instant  $t=0$ , le chariot se met en mouvement grâce à la masse qui lui est accrochée par l'intermédiaire d'un fil passant sur la gorge d'une poulie.
- Par rapport à la position initiale prise comme origine ( $x_i=0$ ), le chariot a parcouru à un instant  $t$  une distance  $x$ .
- Pendant ce temps, la bande de papier a défilé sous le marteau d'une longueur égale à  $x$ . C'est la distance qui sépare la première marque du marteau sur le papier de celle faite à l'instant considéré :  $d=x(t)$ .



**Figure 1: Enregistreur**

On peut donc étudier le mouvement  $x(t)$  du mobile à partir de l'enregistrement  $d(t)$  effectué sur la bande de papier.

#### 4.2. Description du montage à réaliser :

Le montage à réaliser est donné par la figure 2 ci-dessous. Il faut procéder comme suit :

- faites coulisser la bande de papier à l'intérieur de l'enregistreur sous le marteau et attachez-la au chariot à l'aide du ruban adhésif;
- placez le chariot maintenu immobile près de l'enregistreur ; mettez en marche l'enregistreur en le branchant à la source, puis lâchez le chariot (un étudiant du binôme doit se tenir prêt à recueillir le chariot en fin de parcours pour éviter sa chute). Le mouvement de chariot est ainsi enregistré (la bande de papier est jointe au compte-rendu).

#### Matériel utilisé

- un enregistreur électrique
- une bande de papier carbone d'environ 80 cm.
- un chariot
- du fil
- une poulie
- du ruban adhésif
- une masse servant de poids tenseur.

**NB : En cas d'indisponibilité de ruban de papier carbone (l'expérience ne pouvant être réalisée), l'enseignant mettra à la disposition de l'étudiant un papier déjà enregistré, qui sera ainsi analysé.**

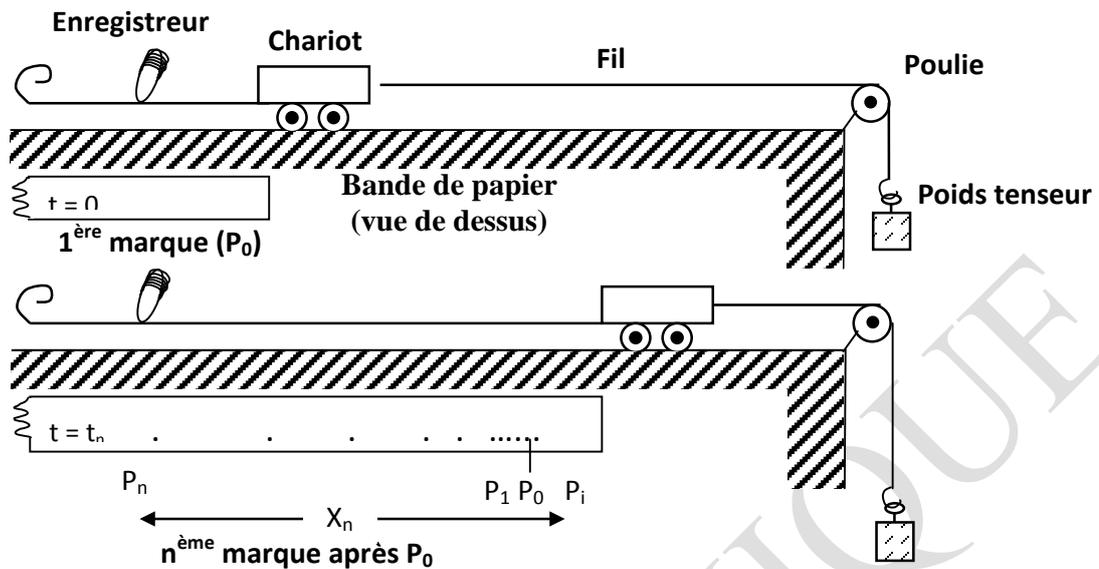


Figure 2 : Position du chariot à  $t=0$ , puis à  $t=t_n$ .

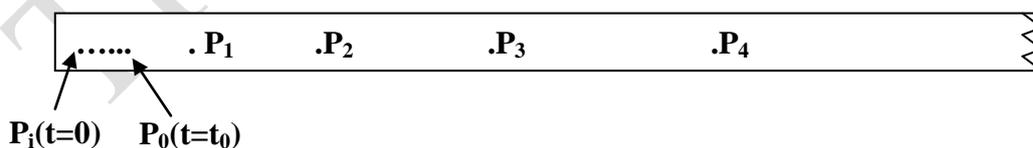
### 4.3. Tracé du graphe $x(t)$ :

On vous propose de tracer d'abord le graphe  $x(t)$  de la position du mobile par rapport à la position initiale en fonction du temps. Or, il est souvent difficile de séparer les premiers points marqués sur la bande de papier et donc d'attribuer à chaque position  $x$  du mobile, un instant  $t$  correspondant. Si c'est le cas, vous commencerez les mesures avec le 1<sup>er</sup> point nettement séparé des autres, soit  $P_0$ .

Soit  $P_i$  le point qui correspond au début du mouvement. Si l'on choisit comme origine des temps le début du mouvement :  $t(P_i)=0$ ,  $x(P_i)=0$ .

Le point a été marqué à l'instant  $t_0$  :  $t(P_0)=t_0$ ,  $x(P_0)$ .

L'instant  $t_0$  ne peut être connu directement ; par contre,  $x_0$  peut être mesuré sur la bande :  $x_0=P_iP_0$ .



- Numérotez vos points :  $P_0$ ,  $P_1$  pour  $t_0+1/50^{\text{ème}}$  s,  $P_2$  pour  $t_0+2/50$ s .....
- Mesurez  $x(t_0)$ ,  $x(t_1)$ ,  $x(t_2)$ , ...

- Remplissez les 2 premières colonnes du tableau de mesures (1), puis tracez le graphe  $x(t)$  en choisissant l'instant  $t_0$  comme origine des temps (choisir convenablement les échelles ; les points expérimentaux sont marqués d'une croix).

t(s)	x mesuré	x lu sur le graphe	$\Delta x$	v
$T_0$	$x_0 =$	$x'_0 =$		
			$x'_1 - x'_0 =$	
$t_1 = t_0 + 1/50$	$x_1 =$	$x'_1 =$		
			$x'_2 - x'_1 =$	
$t_2 = t_0 + 2/50$	$x_2 =$	$x'_2 =$		

**Attention** : Pour calculer  $x$ , il faut prendre les valeurs de  $x$  lues sur le graphe continu  $x(t)$ . Le graphe remplace les points expérimentaux et corrige la dispersion des mesures présentées par les points  $P(t, x)$ .

#### 4.4. Détermination de la vitesse en fonction du temps :

Pour atteindre la vitesse instantanée, vous disposez de 2 procédés (voir cours) :

- Soit mesurer la pente de la tangente au graphe  $x(t)$  à chaque instant (mesure directe de la vitesse instantanée) ;
- soit mesurer la vitesse moyenne  $V_m = \Delta x / \Delta t$  sur un certain intervalle de temps, puis l'assimiler à la vitesse instantanée au centre de l'intervalle ; encore faut-il que cette approximation soit valable pour l'intervalle de temps  $\Delta t$  que vous avez choisi. Il faut donc vérifier qu'il en est bien ainsi dans le cadre de vos mesures. Il suffit de procéder comme suit :
  - Tracer la sécante qui joint les points  $P(t_i, x_i)$  et  $P(t_j, x_j)$  du graphe (mesure de la vitesse moyenne

$v_m$ ). Par exemple, prendre  $\Delta t = t_2 - t_1 = 4/50$  s

- Comparer cette pente avec celle de la tangente à l'instant  $(t_i+t_j)/2$  (mesure de la vitesse instantanée au centre de l'intervalle).

Le centre de l'intervalle considéré dans l'exemple ci-dessus est  $t_i+2/50$ .

- Concluez

Si cette assimilation entre vitesse moyenne et vitesse instantanée semble possible, et si vous préférez utiliser la méthode (b), vous pouvez alors calculer les vitesses successives en complétant le tableau (1).

- Tracer le graphe  $v(t)$  de la vitesse instantanée en fonction du temps ; (pour tracer les graphes  $x(t)$  et  $v(t)$ , suivre les instructions générales du tracé d'une courbe de données lors de la séance d'introduction).
  - Pouvez-vous déduire de ce graphe la valeur de  $t_0$  ?
  - Pouvez-vous aussi le faire à partir du graphe  $x(t)$  ? comparez.
  - Pouvez-vous maintenant calculer la valeur de  $x_0$  à partir de  $v(t)$  ?
  - Comparez les résultats ainsi obtenus à ceux que vous pouvez apprécier sur la bande de papier.

#### 4.5. Détermination de l'accélération en fonction du temps :

- A partir du graphe  $v(t)$ , tracer le graphe de l'accélération en fonction du temps.
  - Écrire alors l'équation du mouvement du chariot et en préciser sa nature
-



## **TP n° 4 : Détermination de la constante de raideur d'un ressort**

### **1. Termes associés**

Ressort, constante de raideur d'un ressort, méthode statique, méthode dynamique, allongement sous l'effet du poids, domaine élastique, ressort à spires, pendule élastique, oscillations, période.

### **2. Principe de mesure de la constante de raideur d'un ressort**

L'objectif visé dans ce TP est la détermination expérimentale de la constante de raideur d'un ressort. On dispose, à cet effet, de deux méthodes : méthode statique et méthode dynamique.

#### **1<sup>ère</sup> méthode : Méthode statique**

On place un objet de masse  $m$  à l'extrémité inférieure d'un ressort dont on veut mesurer la constante de raideur, l'extrémité supérieure étant accrochée à un support immobile. Le protocole utilisé est de faire varier la masse  $m$  et de mesurer à chaque fois, une fois l'équilibre atteint, l'allongement relatif de la longueur du ressort. Le tracé du graphe obtenu  $F = P$  ( $F$  force de rappel du ressort) permet de déterminer la constante de rappel (ou de raideur) du ressort.

#### **2<sup>ème</sup> méthode : Méthode dynamique**

On reprend le même ressort dont on accroche l'extrémité supérieure à un support immobile, l'autre extrémité supportant une masse marquée de valeur  $m$ . Une fois l'équilibre atteint, on tire légèrement vers le bas l'objet de masse  $m$  et on le lâche. Il s'ensuit un mouvement oscillatoire périodique de la masse  $m$  dont on mesurera la période. On répète l'expérience en faisant varier la masse  $m$ . Le tracé du graphe  $T^2 = f(m)$  permet d'accéder à la constante de raideur du ressort.

Attention : la masse  $m$  doit être écartée légèrement de sa position d'équilibre ; ceci permet d'utiliser la loi de Hooke, valable uniquement dans le domaine élastique.

### **3. Théorie et évaluation**

Un ressort est une pièce mécanique qui utilise les propriétés élastiques de certains matériaux pour reprendre sa forme et sa position initiales après avoir subi une déformation. A l'action de déformation, le ressort réagit en exerçant une force égale et opposée, dite force de rappel, caractérisée par une constante (dite de raideur) caractéristique du ressort.

Cette force présente les caractéristiques suivantes :

- Point d'application : point de contact entre le ressort et l'objet

- Direction : celle du ressort

- Sens : si le ressort est étiré, la force est dirigée de l'objet vers le ressort;

si le ressort est comprimé, la force est dirigée du ressort vers l'objet;

- Norme :  $F=k(L-L_0)$  où  $k$  est une constante appelée constante de raideur du ressort,  $L_0$  est la longueur à vide du ressort et  $L$  la longueur du ressort lorsque l'objet est accroché, avec  $F$  en N,  $k$  en N/m et les longueurs en m. Plus cette constante est élevée, plus il sera difficile de déformer le ressort. Cette constante de raideur peut être déterminée de deux façons différentes, en utilisant soit la méthode statique, soit la méthode dynamique.

**Étude statique :**

On accroche l'extrémité supérieure d'un ressort de longueur à vide  $L_0$  à un support fixe, et son extrémité inférieure supportant un objet de masse  $m$  (voir figure 1). Une fois l'équilibre atteint, la longueur du

ressort devient  $L$  et on peut écrire:  $\vec{P} + \vec{F} = 0$  avec:

$$P = mg \text{ et } F = k(L - L_0)$$

La 2ème loi de Newton impose:

$$P - k.x = 0 \rightarrow P = k.dx = k(L-L_0)$$

Il suffit donc de répéter l'expérience en faisant varier la valeur de la masse  $m$  et de tracer le graphe  $P=f(\Delta L)$ . La constante de rappel du ressort est donnée par la pente de ce graphe .

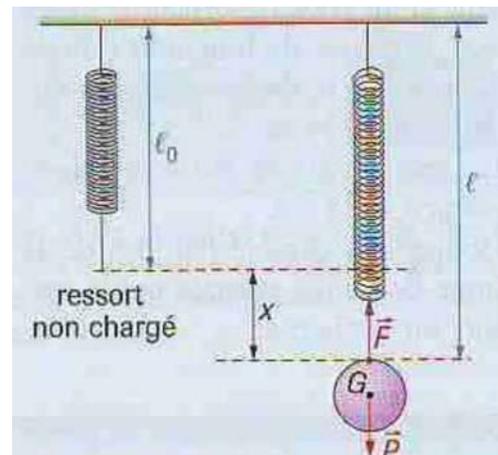


Figure 1

**Étude dynamique :**

On reprend le système {ressort + masse  $m$ } initialement à l'équilibre, puis on tire la masse  $m$  légèrement vers le bas et on l'abandonne à lui-même, il effectue des oscillations de part et d'autre de sa position d'équilibre ; on parle d'un pendule élastique vertical.

La relation fondamentale de la dynamique permet de montrer que le mouvement pris par le système est rectiligne sinusoïdal de période  $T$  (à condition bien sûr que la distance dont on le tire soit suffisamment petite).

Il suffit de mesurer la période  $T$  des oscillations pour accéder à la constante de rappel du ressort utilisé. Appliquons cette relation au

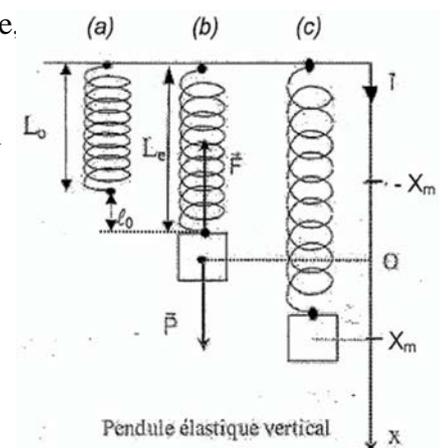


Figure 2: Pendule élastique vertical

pendule (voir figure 2):  $P + F = m.a$

avec :  $a = d^2x/dt^2$ , soit  $m.g - k.dx = m.a$  (1) (dans notre cas,  $x=L$ )

le second terme peut être développé ainsi :  $k.dx = k.(x_0-x) = k.x_0 - k.x$

A l'équilibre (partie statique), on a trouvé:  $P = F$ , soit  $mg = k.x_0$

En remplaçant dans l'équation (1), on a donc:  $-k.x = m.a \rightarrow m.d^2x/dt^2 + k.x=0$  (2)

Cette équation différentielle admet comme solution :  $x(t) = A.\sin(w.t + \Phi)$  (3)

La dérivée seconde de cette solution donne :

$d^2x/dt^2 = -(k/m).x \rightarrow$  qu'on écrit sous la forme  $d^2x/dt^2 = -w^2.x$

On en déduit la pulsation du mouvement:  $w^2 = k/m$ , soit, en reliant à la période  $T$  à  $w$ :  $w=2\pi/T$ ,

d'où:  $4.\pi^2/T^2 = k/m$  et donc:  $T^2 = (4.\pi^2.m)/k$ , d'où l'expression de la période en fonction des données du système

utilisé ( $m$  et constante de rappel du ressort):  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

Pour déterminer la constante  $k$  du ressort, il faut donc tracer la courbe :  $T^2 = f(m)$ ; la pente de cette

droite est alors:  $a=T^2/m = (4.\pi^2)/k \rightarrow k = (4.\pi^2)/a$

## 4. Manipulation

Afin de déterminer la constante de rappel ou de raideur d'un ressort, on utilise les deux méthodes citées ci-dessus: la méthode statique et la méthode dynamique.

### 4a. Etude statique :

On suspend verticalement l'extrémité supérieure d'un ressort de longueur  $L_0$  à un support immobile, une masse  $m$  étant accrochée à son extrémité inférieure. Une fois l'équilibre atteint, on mesure l'allongement  $\Delta L = L - L_0$ ,  $L_0$  étant la longueur initiale du ressort (sans masse suspendue). Puis on fait varier la valeur de la masse accrochée au ressort et on relève, à chaque fois, l'allongement  $\Delta L$ .

Compléter le tableau 1 ci-dessous:

Tableau 1:

Masse $m$ (g)	0	60	110	160	210	260
$P = mg$ (N)	0					
$L$ (cm)	$L_0 =$					
Allongement (cm)	$\Delta L = L-L_0$					

- Tracer alors le graphe donnant  $P$  en fonction de l'allongement, soit  $P = f(\Delta L)$ . Quelle est la nature

de ce graphe.

- En déduire la constante de raideur  $k$  du ressort.
- Calculer l'incertitude sur la mesure de  $k$ .

#### 4b. Etude dynamique:

Après avoir accroché l'extrémité supérieure du ressort à un support immobile, on suspend une masse  $m$  (de valeur  $m=60\text{g}$ ) à son extrémité inférieure. Une fois l'équilibre atteint, on tire légèrement la masse vers le bas, puis on la lâche. Le système est alors animé d'un mouvement rectiligne sinusoïdal (à la condition d'avoir écarté légèrement la masse  $m$  de sa position d'équilibre). On mesure alors la durée de 10 oscillations et on en déduit la période du mouvement (voir partie théorique).

On répète l'expérience en faisant varier la masse  $m$  de 60g à 260g. Compléter alors le tableau 2 ci-dessous:

Tableau 2:

Masse $m$ (g)	60	110	160	210	260
$T = t/10$ (s)					
$T^2$ ( $\text{s}^2$ )					

- Tracer sur feuille de papier millimétré, le graphe donnant  $T^2$  en fonction de  $m$ . Quelle est la nature de ce graphe ?
- En déduire la constante de raideur du ressort utilisé.

#### 4c. Comparaison:

Comparer les résultats obtenus à l'aide de deux méthodes et conclure.

# La Collection TP de PHYSIQUE

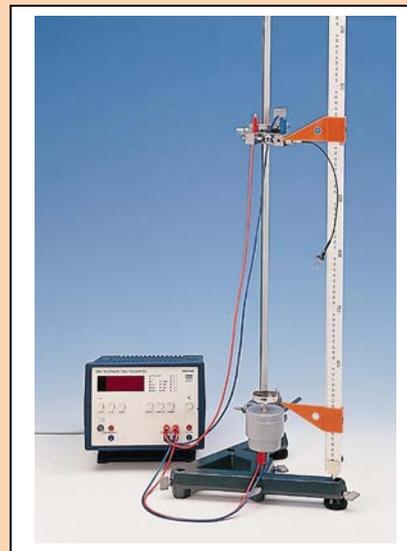


## Travaux Pratiques de MECANIQUE

*Cette collection TP de PHYSIQUE est un modeste recueil des travaux pratiques de physique assurés au sein des laboratoires du département de physique de la faculté des sciences (UMMTO); ces TP, conçus sur la base du matériel disponible, concernent plusieurs domaines de la physique (Mécanique, Electricité, Thermodynamique, Electromagnétisme, Physique de la Matière Condensée, Radiocristallographie, Optique,...). Ils constituent un apport pédagogique complémentaire aux cours magistraux dispensés dans les filières Licence et Master du département.*



Roue de Maxwell



Appareil de chute libre