

**Département de Physique**

# **TRAVAUX PRATIQUES DE PHYSIQUE**

**\* \* \* \* \***

**SMIA  
Semestre 1**

**Responsables : JAOUHARI T. A.  
FACKIR L.**

**Année universitaire : 2017 – 2018**

# TABLE DES MATIERES

**GENERALITES ..... 1**

## **THERMODYNAMIQUE**

**1 – CALORIMETRIE.....13**

**2 – PRESSION DE VAPEUR .....19**

## **MECANIQUE**

**3 - SYSTEMES DE COORDONNEES.....22**

**4 - PENDULE "A g VARIABLE" .....28**

**LEXIQUE .....32**

# GENERALITES

## I - OBJECTIF DES TRAVAUX PRATIQUES

La physique est la science qui détermine les lois auxquelles obéissent les phénomènes de la nature ; elle étudie aussi les propriétés de la matière. Elle a été développée grâce à la méthode expérimentale, qui consiste à vérifier toutes les lois physiques par des expériences reproductibles.

L'enseignement universitaire est formé en général de trois parties essentielles, à savoir le **cours**, les travaux dirigés (**TD**) et les travaux pratiques (**TP**).

Le cours est la partie fondamentale qui explique théoriquement certains phénomènes physiques.

Les travaux dirigés permettent de comprendre certaines théories vues dans le cours à l'aide d'exercices et de problèmes.

Les travaux pratiques permettent d'illustrer par des expériences, certains phénomènes physiques vus dans le cours.

L'étude expérimentale d'un phénomène physique nécessite un appareillage scientifique, qui permet de réaliser des montages et de faire des mesures. Ces dernières nous permettent de vérifier la validité de certaines théories et de déterminer certaines grandeurs physiques.

## II - INCERTITUDES SUR LES MESURES

L'appareillage ainsi que les méthodes utilisées n'étant pas parfaits, les grandeurs physiques (masse, temps, ...) sont toujours déterminées de manière approchée. Ainsi, toute mesure est entachée d'une certaine incertitude due aux imperfections de l'instrument utilisé et des erreurs faites par l'opérateur.

### 1- Types d'incertitudes

Il y a plusieurs types d'incertitudes :

#### a- Incertitude systématique

Incertitude systématique = la plus petite grandeur, qu'on peut mesurer avec un instrument.

Elle provient de la limite de la mesure permise par l'instrument utilisé.

#### Exemples :

- 1- L'incertitude systématique provenant de la mesure d'une longueur  $\ell$ , par une règle graduée en millimètres est **1 mm**, car la plus petite longueur qu'on peut mesurer avec cette règle est 1 mm. Dans ce cas :

$$(\Delta \ell)_{\text{systématique}} = \mathbf{1 \text{ mm}}. (\Delta \text{ représente ici le symbole de l'incertitude}).$$

- 2- Une balance digitale (numérique) qui permet des mesures avec un chiffre après la virgule (**m = 12,4 g** par exemple), a une incertitude systématique  $(\Delta m)_{\text{systématique}} = \mathbf{0,1 \text{ g}}$ .

### **b- Incertitude accidentelle**

Cette incertitude est due à l'opérateur, lorsqu'il fait  $n$  mesures ( $g_1, g_2, \dots, g_n$ ) d'une grandeur physique  $G$  dans les mêmes conditions. Pour la calculer, on prend la valeur moyenne :

$$g_{\text{moyen}} = \frac{1}{n} (g_1 + g_2 + \dots + g_n) \quad n \geq 2$$

L'incertitude accidentelle est la valeur la plus grande entre les écarts  $|g_{\text{moyen}} - g_i|$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) :

$$(\Delta g)_{\text{accidentelle}} = \sup \{ |g_{\text{moyen}} - g_1|, |g_{\text{moyen}} - g_2|, \dots, |g_{\text{moyen}} - g_n| \}$$

Cette incertitude provient par exemple :

- des erreurs de parallaxe (l'œil de l'opérateur n'est pas perpendiculaire au plan de la lecture),
- du mauvais choix du calibre de l'appareil (voltmètre, ampèremètre, ...),
- de la finesse du spot d'un oscilloscope mal réglée.

### **c- Incertitude absolue**

L'incertitude absolue  $\Delta g$  est la somme des deux incertitudes précédentes :

$$\Delta g = (\Delta g)_{\text{systématique}} + (\Delta g)_{\text{accidentelle}}$$

C'est une quantité **toujours positive** et de **même unité que  $G$** . La valeur exacte  $g$  sera donc comprise entre :  $g_{\text{moyen}} - \Delta g$  et  $g_{\text{moyen}} + \Delta g$  :  $g_{\text{moyen}} - \Delta g \leq g \leq g_{\text{moyen}} + \Delta g$ .

**NB :** ♣  $\Delta g$  est toujours très inférieure à  $g$  ( $\Delta g \ll g$ ).

♣  $\Delta g$  est toujours positive ( $\Delta g \geq 0$ ).

♣  $\Delta g = (\Delta g)_{\text{systématique}}$  lorsqu'on fait une seule mesure.

#### **Exemple :**

On veut mesurer la longueur  $\ell$  d'un fil à l'aide d'une règle graduée en millimètres. L'incertitude systématique dans ce cas est :  $(\Delta \ell)_{\text{systématique}} = 1 \text{ mm} = 0,1 \text{ cm}$ .

Pour déterminer l'incertitude accidentelle, on fait cinq mesures successives ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) de la longueur  $\ell$ . On trouve alors les valeurs suivantes :

$$\ell_1 = 13 \text{ cm} ; \ell_2 = 13,4 \text{ cm} ; \ell_3 = 13,6 \text{ cm} ; \ell_4 = 13,5 \text{ cm} \text{ et } \ell_5 = 13 \text{ cm}.$$

La valeur moyenne de  $\ell$  est :  $\ell_{\text{moyen}} = 13,3 \text{ cm}$ .

Les écarts en valeur absolue  $|\ell_{\text{moyen}} - \ell_i|$  (avec  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) par rapport à la moyenne sont : **0,3 cm ; 0,1 cm ; 0,3 cm ; 0,2 cm et 0,3 cm.**

Le plus grand écart ( $\sup |\ell_{\text{moyen}} - \ell_i|$ ) est égal à **0,3 cm**. Il correspond à l'incertitude accidentelle  $(\Delta \ell)_{\text{accidentelle}}$ .

L'incertitude absolue  $\Delta \ell$  est :

$$\Delta \ell = (\Delta \ell)_{\text{systématique}} + (\Delta \ell)_{\text{accidentelle}} = 0,1 \text{ cm} + 0,3 \text{ cm} = 0,4 \text{ cm}$$

Le résultat final sera écrit sous la forme :  $\ell = (13,3 \pm 0,4) \text{ cm}$ .

La valeur réelle de  $\ell$  (inconnue), se trouve dans l'intervalle  $[(13,3 - 0,4) \text{ cm} ; (13,3 + 0,4) \text{ cm}]$ , c'est-à-dire dans l'intervalle  $[12,9 \text{ cm} ; 13,7 \text{ cm}]$ , ou encore :  $12,9 \text{ cm} \leq \ell_{\text{réelle}} \leq 13,7 \text{ cm}$ .

### Remarques :

- Si dans une série de mesures, une valeur est trop écartée de la moyenne, elle doit être refaite.
- Le résultat d'une mesure **g** doit être toujours accompagné de son incertitude absolue  $\Delta g$  et de son unité exprimée, en général, dans le système international [S.I].

$$\mathbf{G = (g \pm \Delta g) \text{ unité}}$$

- Il faut donner la valeur de l'incertitude absolue avec un seul chiffre significatif.

### Exemple :

Le calcul de l'indice **n** d'un milieu donne le résultat suivant :  $\mathbf{n = (1,335 \pm 0,052)}$ .

Ce résultat doit être arrondi ; on a alors :  $\mathbf{n = (1,34 \pm 0,05)}$ .

### d- Incertitude relative

On appelle incertitude relative (ou précision) sur **G**, la quantité  $\frac{\Delta g}{g_{\text{moyen}}}$ . Elle est positive, sans unité et souvent exprimée en pourcentage (%). Elle renseigne mieux que l'incertitude absolue sur le degré d'exactitude d'une mesure. Une mesure est d'autant plus précise que son incertitude relative est faible.

### Exemple:

$$\mathbf{m_1 = (200 \pm 10) \text{ g}} \text{ et } \mathbf{m_2 = (10 \pm 1) \text{ g}}$$

$$\frac{\Delta m_1}{m_1} = \frac{10}{200} = 0,05 = \frac{5}{100} = 5\% \text{ et } \frac{\Delta m_2}{m_2} = \frac{1}{10} = 0,1 = \frac{10}{100} = 10\%$$

Bien que  $\Delta m_1 > \Delta m_2$ , la précision sur  $m_1$  (5%) est meilleure que celle sur  $m_2$  (10%).

## **2- Calcul d'incertitudes**

En général, la détermination d'une grandeur **G** s'effectue par la mesure d'autres grandeurs physiques intermédiaires **X, Y, Z, ...** La grandeur **G** est alors définie par sa valeur **g** telle que  $\mathbf{g = f(x, y, z, ...)}$ .

Connaissant les incertitudes  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$  des mesures **x, y, z, ...**, on détermine alors l'incertitude absolue  $\Delta g$  en fonction de  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \dots$  en faisant un calcul d'incertitudes.

Pour faire ce calcul, on suit les étapes suivantes :

- On calcul séparément les dérivées partielles  $\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}, \frac{\partial g}{\partial z}, \dots$  puis on détermine la différentielle **dg** :

$$\mathbf{dg = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy + \frac{\partial g}{\partial z} dz + \dots}$$

- On fait la majoration physique pour calculer  $\Delta g$  (**d** est remplacé par  $\Delta$  et les coefficients de **dx, dy, ...** sont pris en valeur absolue).

$$\Delta g = \left| \frac{\partial g}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial g}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial g}{\partial z} \right| \Delta z + \dots$$

**Exemple 1 :**  $g = -3xy + \frac{2x}{t} + \frac{1}{4z} + 5z^2$

*1<sup>ère</sup> étape : calcul des différentielles partielles :*

$$\frac{\partial g}{\partial x} = -3y + \frac{2}{t}, \quad \frac{\partial g}{\partial y} = -3x, \quad \frac{\partial g}{\partial z} = 10z - \frac{1}{4z^2}, \quad \frac{\partial g}{\partial t} = -\frac{2x}{t^2}$$

*2<sup>ème</sup> étape : calcul de la différentielle totale dg :*

$$dg = (-3y + \frac{2}{t})dx + (-3x)dy + (10z - \frac{1}{4z^2})dz + (-\frac{2x}{t^2})dt$$

*3<sup>ème</sup> étape : majoration physique :*

$$\Delta g = \left| -3y + \frac{2}{t} \right| \Delta x + \left| -3x \right| \Delta y + \left| 10z - \frac{1}{4z^2} \right| \Delta z + \left| -\frac{2x}{t^2} \right| \Delta t$$

Lorsque l'expression de  $g$  comporte des produits et des quotients, on peut simplifier les calculs en utilisant la "méthode des logarithmes", comme dans l'exemple suivant :

**Exemple 2 :**  $g(x, y) = \frac{2x^2(y-1)}{x-4y}$

$$\ln g = \ln(2x^2) + \ln(y-1) - \ln(x-4y) \Rightarrow d(\ln g) = d(\ln(2x^2)) + d(\ln(y-1)) - d(\ln(x-4y))$$

D'où :  $\frac{dg}{g} = \frac{d(2x^2)}{2x^2} + \frac{d(y-1)}{y-1} - \frac{d(x-4y)}{x-4y} = \frac{2dx}{x} + \frac{dy}{y-1} - \frac{dx}{x-4y} + \frac{4dy}{x-4y}$

Arrivé à ce stade, on doit regrouper les termes qui ont le même élément différentiel ( $dx$  ou  $dy$ ) :

$$\frac{dg}{g} = \left( \frac{2}{x} - \frac{1}{x-4y} \right) dx + \left( \frac{1}{y-1} + \frac{4}{x-4y} \right) dy = \frac{1}{(x-4y)} \left( \left( \frac{x-8y}{x} \right) dx + \left( \frac{x-4}{y-1} \right) dy \right)$$

On passe ensuite aux incertitudes, en faisant la majoration physique et en remplaçant "d" par "Δ" :

$$\Delta g = \frac{g}{|x-4y|} \left( \left| \frac{x-8y}{x} \right| \Delta x + \left| \frac{x-4}{y-1} \right| \Delta y \right)$$

### III - COMPARAISON DES VALEURS ET DES METHODES

Soient  $g_1$  et  $g_2$  deux valeurs d'une même grandeur  $G$ , obtenues par deux méthodes de mesure différentes, avec les incertitudes absolues  $\Delta g_1$  et  $\Delta g_2$ . Pour faire une comparaison, il y a deux façons :

1 - **Comparaison de deux valeurs** en utilisant le **théorème de comparaison** : avant de dire que  $g_1$  est égale environ à  $g_2$ , on doit appliquer le théorème suivant :

si  $|g_1 - g_2| \leq \Delta g_1 + \Delta g_2$ , alors la différence entre les valeurs  $g_1$  et  $g_2$  n'a pas de signification physique.

Dans ce cas, nous avons  $g_1 \approx g_2$  ; on peut dire alors que les intervalles  $[g_1 - \Delta g_1, g_1 + \Delta g_1]$  et  $[g_2 - \Delta g_2, g_2 + \Delta g_2]$  ont une intersection non vide.

**NB : Pour comparer deux valeurs, il faut toujours utiliser le théorème de comparaison.**

2 - **Comparaison de deux méthodes** : si  $\frac{\Delta g_1}{g_1} < \frac{\Delta g_2}{g_2}$ , alors la première méthode de

mesure qui donne  $g_1$  est plus précise que celle qui donne  $g_2$ .

**Exemple** : dans une expérience, la méthode d'association en série donne la valeur d'une résistance  $R_s = (150 \pm 1) \Omega$ , alors que l'association en parallèle donne  $R_p = (148 \pm 2) \Omega$ . On a  $\Delta R_s / R_s = 0,007$  et  $\Delta R_p / R_p = 0,014$  ; la première méthode est donc la plus précise.

## IV- REPRESENTATION GRAPHIQUE

### 1- Rappels théoriques

La représentation graphique de la fonction  $y = f(x) = ax + b$  est une droite.

Considérons deux points  $A_1(x_1, y_1)$  et  $A_2(x_2, y_2)$  de la droite  $D$  (figure 1). On appelle pente de cette droite, le rapport  $p = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  ; on montre que  $p = a$ .

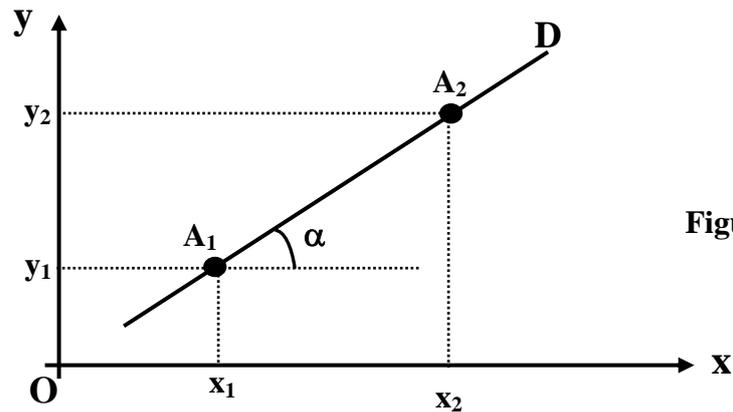


Figure 1

En mathématiques, quand le repère  $xOy$  est orthonormé, la pente  $p = \text{tg } \alpha$  est un nombre sans unité.

En physique, les grandeurs  $X$  et  $Y$  ont des unités. Par conséquent la pente  $p = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$

a aussi une unité ; on a donc :

$$p \neq \text{tg } \alpha$$

### 2- Traçage d'une courbe

Chaque grandeur  $X$  (ou  $Y$ ) est mesurée avec une certaine incertitude. Les résultats de mesure  $x \pm \Delta x$  et  $y \pm \Delta y$  sont en général regroupés dans un tableau :

	X	$\Delta X$	Y	$\Delta Y$
$A_1$	$x_1$	$\Delta x_1$	$y_1$	$\Delta y_1$
$A_2$	$x_2$	$\Delta x_2$	$y_2$	$\Delta y_2$
$A_3$	$x_3$	$\Delta x_3$	$y_3$	$\Delta y_3$
...	...	...	...	...

**Pour tracer la courbe  $Y = f(X)$ , on procède de la façon suivante :**

- a- On commence par tracer les axes des abscisses  $X$  et des ordonnées  $Y$  sur les bords d'un papier millimétré ; les unités de  $X$  et de  $Y$  doivent être indiquées (figure 2).
- b- On choisit les échelles des axes de façon que la courbe occupe le maximum de surface du papier millimétré (la pente d'une droite obtenue à partir de ce graphe sera alors la plus précise). L'erreur commise généralement par les étudiants, est de commencer les graduations des axes par zéro, ce qui donne une petite courbe. Alors que pour avoir une grande courbe, les valeurs maximales et minimales de  $X$  et  $Y$  doivent être placées le plus près des bords du papier millimétré.

Pour déterminer l'échelle de l'axe horizontal, on mesure sur le papier millimétré la distance  $m$  (en centimètres), entre le minimum ( $x_{\min}$ ) et le maximum ( $x_{\max}$ ) de  $X$ . La différence  $(x_{\max} - x_{\min}) = a$  (unité) correspond alors à  $m$  centimètres. On obtient ainsi :  $a$  (unité)  $\longrightarrow$   $m$  (cm).

Pour déterminer l'échelle verticale, on procède de la même façon. On note  $n$ , la distance mesurée en centimètres sur le papier millimétré, entre  $y_{\min}$  et  $y_{\max}$  ; on pose ensuite  $(y_{\max} - y_{\min}) = b$  (unité) et on a :  $b$  (unité)  $\longrightarrow$   $n$  (cm).

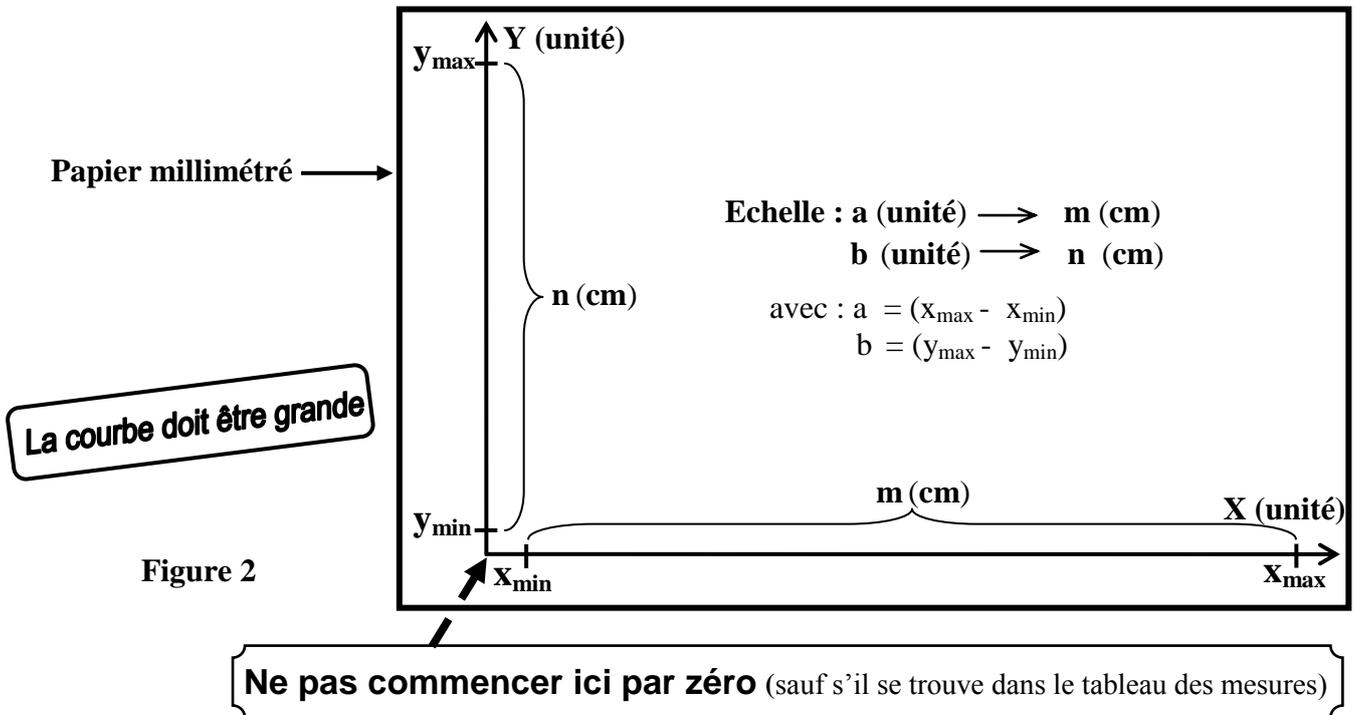


Figure 2

Cette échelle servira à placer les autres points expérimentaux  $A_i (x_i, y_i)$  sur le graphe. Soit par exemple  $x_1$  (avec  $x_{\min} < x_1 < x_{\max}$ ), l'abscisse d'un point  $A_1 (x_1, y_1)$ . Pour placer  $x_1$  sur l'axe horizontal, on doit déterminer la distance  $m'$  (en cm) entre  $x_{\min}$  et  $x_1$  (figure 3). On utilise alors la règle de trois suivante :

$$a = (x_{\max} - x_{\min}) \text{ (unité)} \longrightarrow m \text{ (cm)}$$

$$(x_1 - x_{\min}) \text{ (unité)} \longrightarrow m' \text{ (cm)} ; \text{ d'où : } m' = \frac{m}{a} (x_1 - x_{\min})$$

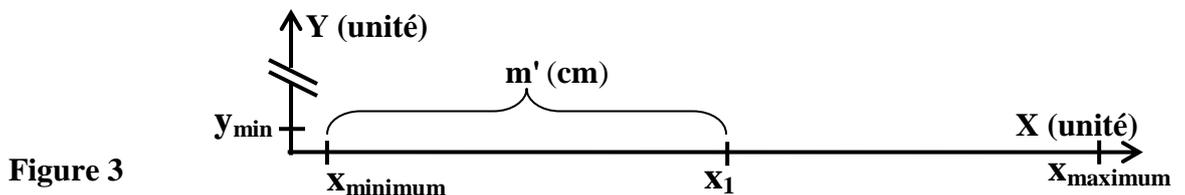


Figure 3

c- On place sur la courbe les points expérimentaux  $A_i(x_i, y_i)$  en les marquant avec des croix. Lorsque la courbe n'est pas une droite, on joint ces points par des traits sans tenir compte des incertitudes.

d- Lorsque la courbe est une droite, on tient compte des incertitudes. La mesure exacte alors de chaque point  $A_i(x_i, y_i)$  se trouve dans l'intervalle  $[x_i - \Delta x_i, x_i + \Delta x_i]$  pour l'axe des abscisses, et  $[y_i - \Delta y_i, y_i + \Delta y_i]$  pour l'axe des ordonnées. Ce qui se traduit sur le graphe par un segment horizontal de longueur  $2 \Delta x_i$  centré en  $x_i$  et par un segment vertical de longueur  $2 \Delta y_i$  centré en  $y_i$  (figure 4). Ceci permet de tracer un rectangle d'incertitude de cotés  $2 \Delta x_i$  et  $2 \Delta y_i$ , centré en  $A_i(x_i, y_i)$ . Ce rectangle contient l'ensemble des points dont les coordonnées  $x$  et  $y$  se trouvent dans les intervalles  $[x_i - \Delta x_i, x_i + \Delta x_i]$  et  $[y_i - \Delta y_i, y_i + \Delta y_i]$  ; ils vérifient tous les relations :

$$x_i - \Delta x_i \leq x \leq x_i + \Delta x_i \quad \text{et} \quad y_i - \Delta y_i \leq y \leq y_i + \Delta y_i.$$

**Remarque** : si l'échelle ne permet pas de tracer un rectangle, ce dernier est réduit à un segment ou à un point.

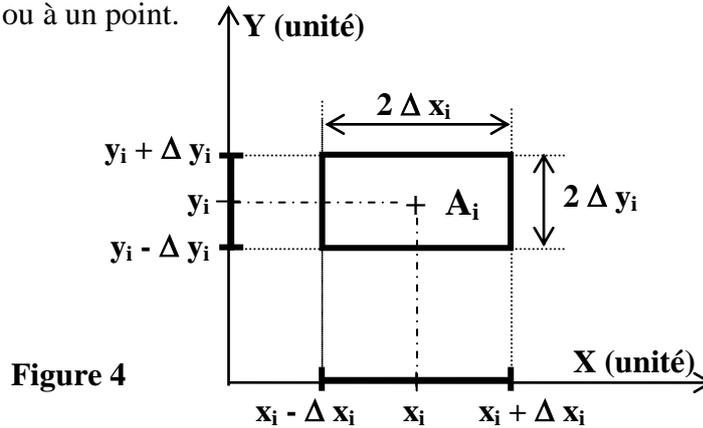


Figure 4

Autour de chaque point expérimental on trace un rectangle d'incertitude.

e- On trace ensuite deux droites limites  $D_1$  et  $D_2$  ayant respectivement la pente minimale  $p_1$  et la pente maximale  $p_2$ .  $D_1$  et  $D_2$  doivent passer par le maximum de rectangles d'incertitudes (exemple figure 5). Ceci permet de calculer la pente moyenne  $p_{moyenne}$  et son incertitude  $\Delta p_{moyenne}$  comme suit :

$$p_{moyenne} = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad \text{et} \quad \Delta p_{moyenne} = \frac{|p_1 - p_2|}{2}$$

f- L'échelle ainsi que le titre de la courbe doivent être indiqués sur le papier millimétré. On ne porte sur les axes que les graduations principales (de dix en dix ou de un en un, etc.).

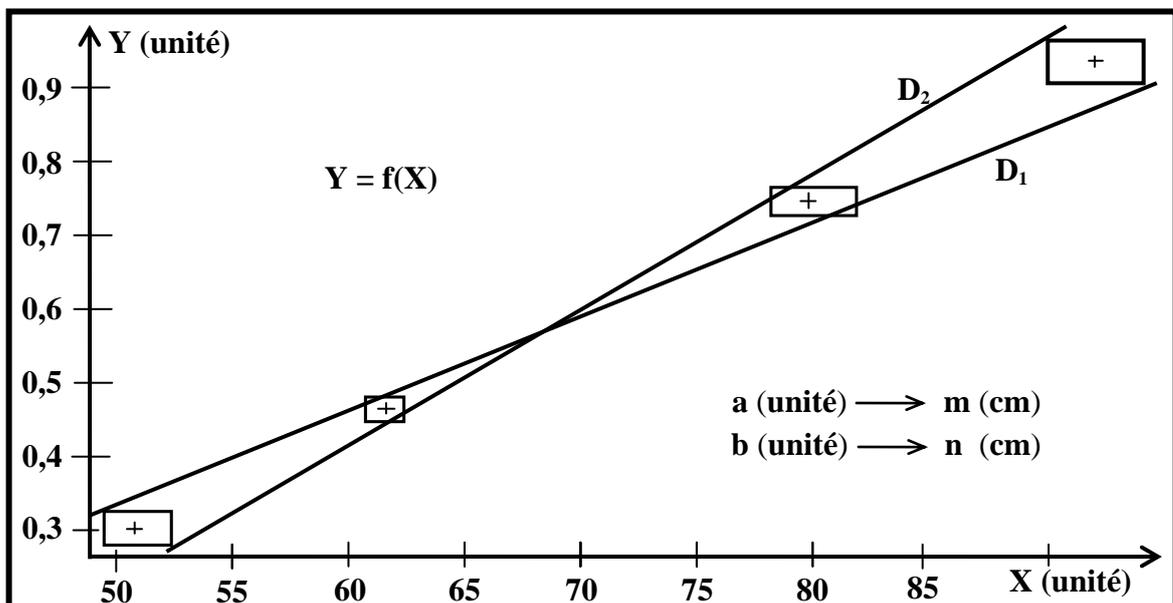


Figure 5

## V- MANIPULATION ET COMPTE-RENDU

Chaque séance de travaux pratiques est prévue pour faire une manipulation en relation avec une partie du cours de Physique. Chaque manipulation doit être bien préparée chez soi ; l'étudiant peut aussi passer dans la salle de T.P. avant sa séance pour voir l'appareillage. La séance de T.P. doit être entièrement consacrée à la réalisation des montages, aux mesures, au traçage des courbes et aux interprétations.

La manipulation est divisée essentiellement en trois parties :

- **But** : c'est l'objectif qu'il faut atteindre avec des moyens pratiques et qui doit être pris en considération tout au long de la manipulation.
- **Partie théorique** : elle comprend un résumé de la théorie ainsi que les lois du phénomène étudié. Les questions théoriques (calcul d'incertitudes, ...) doivent être traitées avant de venir à la salle des T. P.
- **Partie pratique** : elle concerne les mesures à faire dans la salle de TP ainsi que leur exploitation.

A la fin de chaque séance, le binôme (ou trinôme) doit remettre un compte-rendu (double feuille format papier ministre : voir figure 6), qui regroupe tous les résultats de la manipulation faite. Sur la première page doit figurer les noms des 2 ou 3 étudiants, la filière (SMIA ou SVTU), le groupe de TP ( $A_{11}$ ,  $A_{12}$ , ...,  $B_{72}$ ) et la date ; ceci doit éventuellement figurer sur les feuilles intercalaires et les papiers millimétrés. Laisser une marge (d'environ 3 cm) à gauche de **chaque page**. Ecrire le titre et le but de la manipulation. **La présentation du compte-rendu est prise en considération lors de la correction.**

The diagram shows a rectangular page layout with a 3 cm margin on the left side, indicated by a double-headed arrow. At the top, there are four fields for student information: 'Nom :', 'Filière :', 'Groupe :', and 'Date :', each followed by a dotted line for text entry. Below these fields is the 'Titre de la manipulation'. The page is divided into two main sections: '- **But**' and '- **Partie pratique**'. Under the 'Partie pratique' section, there is a sub-section '1 -' followed by a table with 6 columns and 2 rows. An arrow points to the right side of the page with the text 'Double feuille Format papier ministre'.

Figure 6

## VI - ORGANISATION DES TP

### 1- Organisation

Changement de filière : tout étudiant ayant fait un changement de filière (et dont le nom ne figure pas sur les listes affichées au bloc de TP de physique de S1 et S2), doit contacter immédiatement le responsable de TP. Il doit apporter une photocopie de son attestation d'inscription.

Annulation de dispense : les étudiants redoublants ayant une note de TP supérieure ou égale à 10/20 sont dispensés. Ceux dont la moyenne est comprise entre 10 et 11/20, peuvent refaire les TP après avoir déposé une demande auprès du responsable (il faut remplir un imprimé).

Nouvel inscrit : tout étudiant nouvellement inscrit (et dont le nom ne figure pas sur les listes affichées au bloc de TP de physique de S1 et S2), doit contacter immédiatement le responsable de TP. Il doit apporter une photocopie de son attestation d'inscription.

#### Absence

- La présence aux travaux pratiques est obligatoire.
- Toute absence non justifiée est sanctionnée par une note égale à zéro. **La justification doit être écrite et comporter un cachet.**
- L'absence non justifiée à deux séances de TP ne permet pas la validation du module de physique.

#### Coefficient des TP

- La note finale de TP est composée d'un contrôle individuel (30 %) et de la moyenne des comptes rendus (70 %). Le coefficient des TP est 1/4 ; celui de l'examen écrit est 3/4.

Réclamations : les notes de TP de physique sont affichées à la fin du semestre. Au cas où il y'a des erreurs, l'étudiant peut faire une réclamation auprès des responsables dans les 48 heures qui suivent l'affichage.

### 2- Recommandations générales

- Chaque binôme (ou trinôme) doit avoir la dernière version du polycopié, du papier millimétré, une calculatrice, une règle, un crayon, une gomme, etc.

- Dans la salle des travaux pratiques les étudiants doivent d'abord prendre toutes les mesures, puis tracer les courbes et faire des calculs détaillés. Les étudiants de chaque binôme (ou trinôme) doivent répartir les tâches entre eux.

- **Ne jamais alimenter un montage** (branchement de la prise du générateur) ou **allumer un générateur** : c'est l'enseignant qui s'en occupe après vérification du montage. Autrement c'est l'étudiant qui sera responsable de la détérioration éventuelle du matériel.

- Pendant la séance de T. P., il ne faut pas changer le matériel d'une paillasse à l'autre (fils de connexion, voltmètre, ...) et toute détérioration du matériel doit être signalée.

- Laisser les paillasses propres et ne pas écrire dessus.

- Avant de partir : \* ranger le matériel et les tabourets ;
  - \* vider l'eau du calorimètre et débrancher les fils de connexion ;
  - \* éteindre les appareils électriques.



L'Ampèremètre se branche en série aux bornes du circuit étudié alors que le voltmètre se branche en parallèle.

Le calibre **C** est la valeur maximale que peut mesurer un appareil. Son unité est celle de la grandeur mesurée.

## 2- Comment mesurer une grandeur électrique **G** (**U** ou **I**)

La mesure **g** d'une grandeur électrique **G** (une tension ou une intensité de courant), se fait de la façon suivante :

- On commence par choisir le calibre le plus grand (calibre **10 A** pour l'ampèremètre) afin d'éviter la détérioration de l'appareil. Cette étape nous permet d'avoir aussi l'ordre de grandeur de la mesure **g**.

- On cherche le calibre qui permet d'obtenir la plus grande déviation de l'aiguille, sans dépasser le maximum de l'échelle. On lit ensuite **N** : le **nombre de divisions** lues sur l'échelle choisie, indiqué par la position de l'aiguille sur le cadran.

- La valeur d'une tension **U** par exemple s'exprime par la relation suivante :

$$U = \frac{\text{Calibre} \times N}{\text{Echelle}} \quad \text{avec une incertitude} \quad \Delta U = \frac{\text{Classe} \times \text{Calibre}}{100}$$

(La classe d'un voltmètre est un nombre sans unité ; elle est spécifique à chaque appareil).

**Exemple** (figure 8) : pour une tension alternative, on a : **Calibre = 10 V**, **Echelle 30 (∞)**, **N = 12** graduations ; on a alors : **U = 4 V**.

On retrouve le même résultat en utilisant l'échelle 100 alternatif.

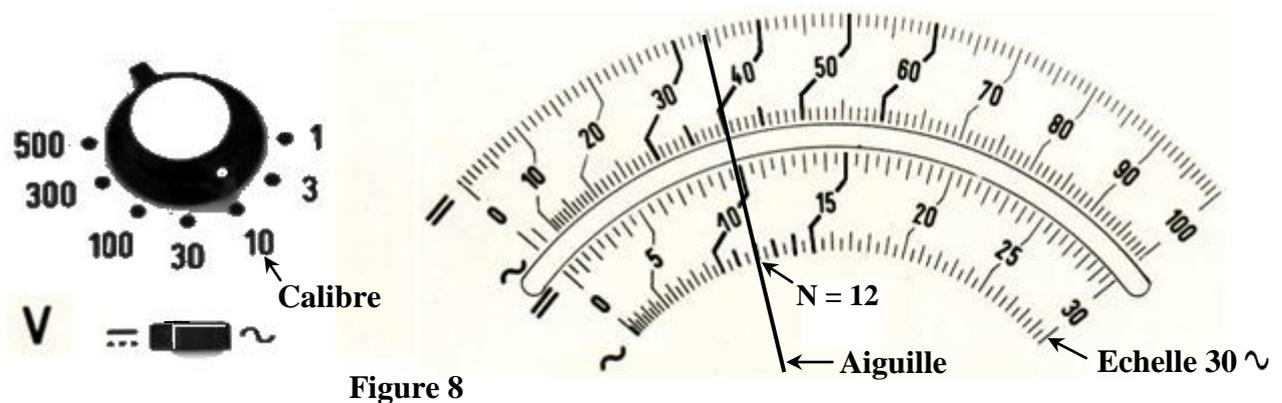


Figure 8

**NB :** Les mêmes formules sont valables pour le courant **I**, lu sur un ampèremètre. Il suffit de remplacer **U** par **I**.

### Remarques :

- Avant toute mesure, il est nécessaire de vérifier si l'aiguille est confondue avec le zéro de l'échelle, puis sélectionner le plus grand calibre.

- Le cadran est muni généralement d'un miroir ; pour relever une mesure, il faut se positionner de telle manière que l'aiguille et son image sur le miroir soient confondues, afin d'éviter les erreurs de parallaxe.

- Pour minimiser l'incertitude  $\Delta U$  (ou  $\Delta I$ ), on cherche toujours le calibre qui donne le maximum de déviation de l'aiguille du voltmètre (ou de l'ampèremètre), sans que celle-ci sort de l'échelle.

## VIII - UNITES DU SYSTEME INTERNATIONAL (SI)

### 1- Les unités de base du système SI

Grandeur	Unité	Symbole	Dimension
Longueur	mètre	<b>m</b>	L
Masse	kilogramme	<b>kg</b>	M
Temps	seconde	<b>s</b>	T
Intensité de courant	ampère	<b>A</b>	I
Température	kelvin	<b>K</b>	$\Theta$
Intensité lumineuse	candela	<b>cd</b>	J
Quantité de matière	mole	<b>mol</b>	d

### 2- Les unités supplémentaires

Grandeur	Unité	Symbole	Dimension
Angle	radian	<b>rad</b>	$\theta$
Angle solide	stéradian	<b>sr</b>	$\Omega$

### 3- Quelques unités dérivées ayant reçu un nom " spécifique "

Grandeur	Unité	Symbole	Dimension	« Correspondance »
Activité radioactive	becquerel	<b>Bq</b>	1/T	$s^{-1} = \text{Bq}$
Charge électrique	coulomb	<b>C</b>	$Q = IT$	$A \cdot s = C$
Energie, travail	joule	<b>J</b>	$ML^2/T^2$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} = J$
Force	newton	<b>N</b>	$ML/T^2$	$kg \cdot m \cdot s^{-2} = N$
Fréquence	hertz	<b>Hz</b>	1/T	$s^{-1} = \text{Hz}$
Pression	pascal	<b>Pa</b>	$M/LT^2$	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = \text{Pa}$
Puissance	watt	<b>W</b>	$P = ML^2/T^3$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} = W$
Résistance électrique	ohm	<b><math>\Omega</math></b>	$P/I^2 = U/I$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2} = \Omega$
Tension électrique	volt	<b>V</b>	$U = P/I$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1} = V$

### 4- Autres unités dérivées

Grandeur	Unité	Symbole	Dimension
Accélération	mètre par seconde carrée	<b><math>m \cdot s^{-2}</math></b>	$L/T^2$
Accélération angulaire	radian par seconde carrée	<b><math>rad \cdot s^{-2}</math></b>	$\theta/T^2$
Masse volumique	kilogramme par mètre cube	<b><math>kg \cdot m^{-3}</math></b>	$M/L^3$
Raideur	newton par mètre	<b><math>N \cdot m^{-1}</math></b>	$ML^2/T^2$
Vitesse	mètre par seconde	<b><math>m \cdot s^{-1}</math></b>	$L/T$
Vitesse angulaire	radian par seconde	<b><math>rad \cdot s^{-1}</math></b>	$\theta/T$

# CALORIMETRIE

## I- BUT

Le but de cette manipulation consiste à déterminer **J**, le coefficient reliant le joule et la calorie par la méthode électrique.

## II- PARTIE THEORIQUE

La calorimétrie consiste à déterminer expérimentalement des quantités de chaleur.

La chaleur (une forme d'énergie) est une grandeur physique qui n'est pas directement mesurable ; c'est pourquoi il est nécessaire de mesurer son effet sur un autre corps.

Cet effet peut :

- servir à augmenter ou diminuer la température d'un corps sans modifier son état physique ; cela correspond à la notion de chaleur spécifique ;

ou bien

- servir à un changement d'état physique d'un corps sans modifier sa température ; cela correspond à la notion de chaleur latente.

La chaleur spécifique d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire à l'unité de masse de ce corps pour élever sa température d'un degré. Alors que la chaleur latente est la chaleur nécessaire pour effectuer un changement d'état physique (vaporisation, fusion, etc.) d'une unité de masse d'un corps à température constante.

La chaleur spécifique et la chaleur latente, ainsi que d'autres grandeurs thermiques, peuvent être mesurées à l'aide d'un appareil appelé calorimètre. Le calorimètre est constitué d'un vase, appelé vase calorimétrique, isolé thermiquement du milieu extérieur.

J. P. JOULE (1818-1889) a montré que la chaleur et le travail sont deux modes de transfert d'énergie (premier principe de la thermodynamique). On peut envisager plusieurs modes de transfert de la chaleur :

\* Tout corps porté à une température émet un rayonnement thermique sous forme d'ondes électromagnétiques. Il s'agit du transfert de chaleur par rayonnement.

\* Lorsque deux corps **A** et **B** baignent dans un fluide (exemple l'air), ce fluide se réchauffe au contact du corps chaud, il se refroidit au contact du corps froid auquel il transmet de la chaleur. Il s'agit du transfert de chaleur par convection.

\* Si deux points d'un même corps sont à des températures différentes, la température varie alors de façon continue jusqu'à ce que tous les points du même corps soient à la même température. Il s'agit du transfert de chaleur par conduction.

### 1- Forme différentielle de la chaleur

Lors d'une transformation élémentaire, la quantité de chaleur échangée entre un système et le milieu extérieur (voir cours) s'écrit dans le diagramme (**P,T**) :

$$\delta Q = C_p dT + h dP \quad (1)$$

avec  $C_p$  la capacité calorifique à pression constante et  $h$  un coefficient calorimétrique.

Lorsque la transformation s'effectue à pression constante, ce qui sera le cas lors de cette manipulation, la relation (1) devient :

$$\delta Q = C_p dT \quad (2)$$

On définit aussi la chaleur massique  $c_p$  qui correspond à la capacité calorifique par unité de masse. On a alors  $C_p = mc_p$  où  $m$  est la masse du corps considéré.

On peut écrire la relation (2) sous la forme :

$$\delta Q = mc_p dT \quad (3)$$

## 2- Méthode électrique

La méthode électrique consiste à chauffer l'eau par effet Joule. Le passage d'un courant électrique d'intensité  $I$  (A) dans une résistance sous une tension  $U$ (V), plongée dans une masse  $m$ (g) d'eau pendant un temps  $t$  (s), va élever la température de l'eau de  $T_i$  (°C) à  $T_f$  (°C).

L'énergie apportée par effet Joule est :

$$W = UI t \quad (\text{en joules})$$

Si l'on suppose que les échanges thermiques s'effectuent sans perte, la chaleur reçue par la masse d'eau  $m$  est obtenue à partir de la relation (3) :

$$Q_m = mc_p (T_f - T_i) \quad (\text{en calories})$$

En réalité, il faut tenir compte de l'énergie absorbée par les parois du calorimètre. Cette perte d'énergie est équivalente à celle absorbée par une masse d'eau  $\mu$  (valeur en eau du calorimètre).

$$Q_\mu = \mu c_p (T_f - T_i)$$

La chaleur totale reçue par l'eau et le calorimètre est :

$$Q = Q_m + Q_\mu = (m + \mu) c_p (T_f - T_i)$$

Le coefficient  $J$  reliant la quantité de chaleur  $Q$  exprimée en calories au travail  $W$  exprimé en Joules s'obtient par le rapport :

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{UI t}{(m + \mu) c_p (T_f - T_i)}$$

avec  $c_p = (1 \pm 0,1) \text{ cal/g}^\circ\text{C}$  et  $\mu = (60 \pm 5) \text{ g}$ .

Une correction sur le terme  $(T_f - T_i)$  peut être faite. Pour cela, il faut tracer la courbe expérimentale  $T = f(t)$ , qui va permettre de tenir compte des pertes calorifiques (voir figure 5). Si on considère que le chauffage se fait instantanément à l'instant moyen  $(t' + t'')/2$ , alors la variation de température considérée est déterminée graphiquement :

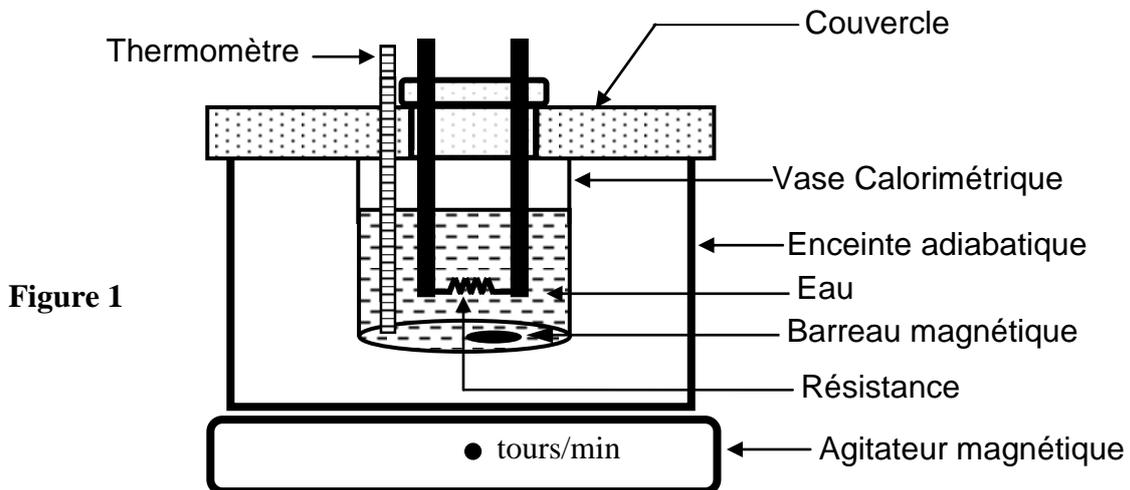
$$(T_f - T_i)_{\text{corrigée}} = (T_{C'} - T_{B'})$$

**Remarques :** l'état d'équilibre de notre système est défini comme suit :

- Equilibre thermique : la température est homogène dans tout le système (d'où l'intérêt d'utiliser un agitateur magnétique).
- Equilibre mécanique : au niveau de la surface de l'eau, il y a un équilibre mécanique puisque les deux forces de pression sont égales ; ce qui nous permet de considérer que la transformation se fait à pression constante.

### III- MATERIEL

Le calorimètre utilisé dans cette manipulation est celui de **BERTHELOT**. Il est essentiellement constitué de deux récipients cylindriques en aluminium, l'un contenant de l'eau, l'autre étant vide. Ces récipients constituent une enceinte adiabatique (pas d'échange de chaleur avec l'extérieur). Le grand récipient contient uniquement le petit récipient (vase calorimétrique). Ce dernier contient l'eau, le barreau magnétique et les accessoires (figure 1).



Le calorimètre est fermé par un couvercle percé de trous permettant le passage d'un thermomètre et d'une résistance électrique chauffante. Le dispositif expérimental comporte en plus un générateur, un agitateur magnétique, un thermomètre, un chronomètre, des fils de connexion, un ampèremètre, un voltmètre et un chronomètre (figure 2).

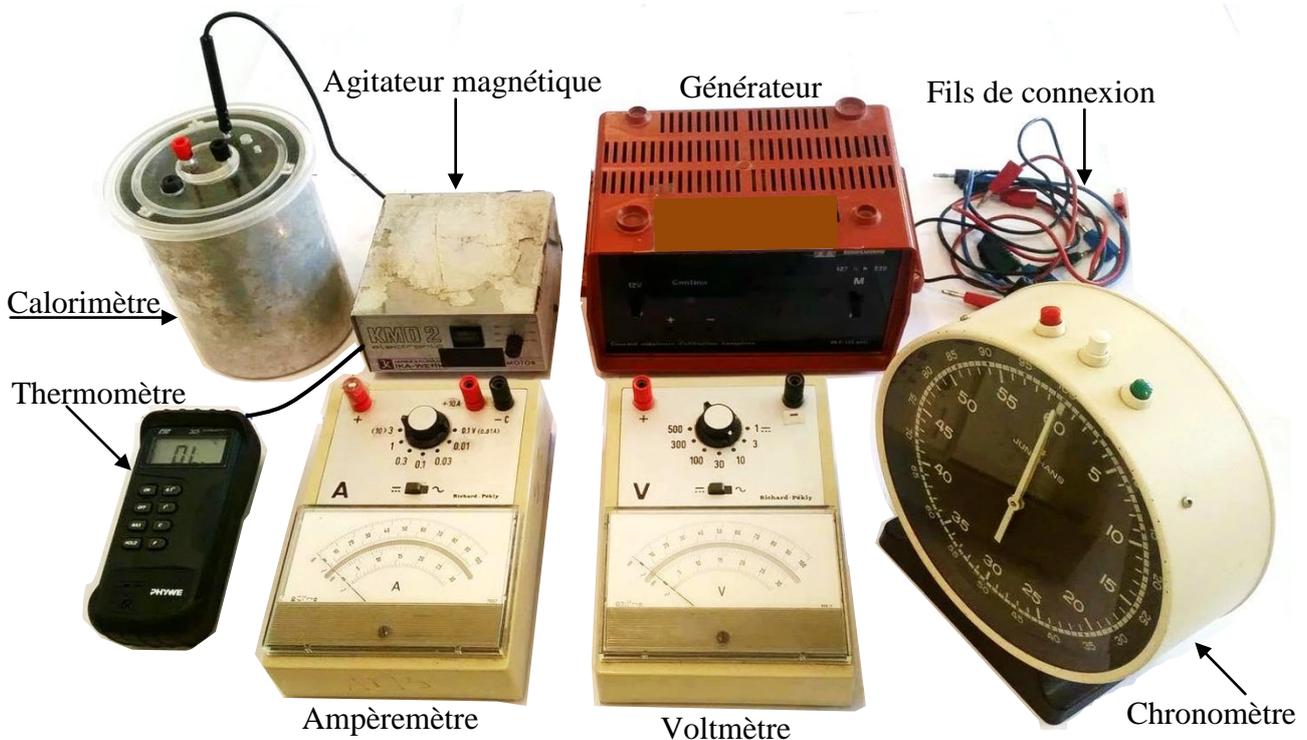
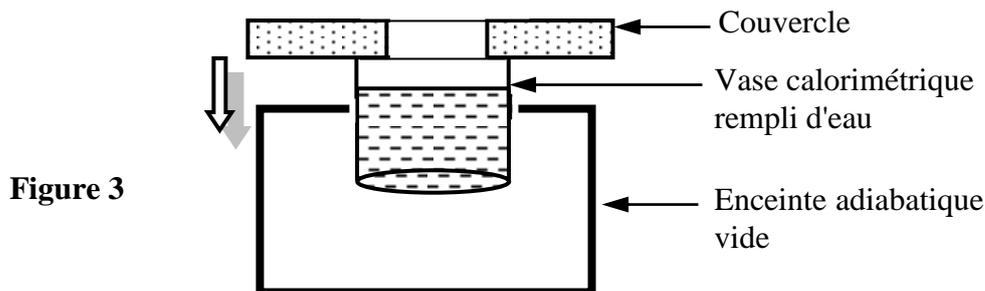


Figure 2 : Dispositif expérimental de la manipulation

## IV- PARTIE PRATIQUE

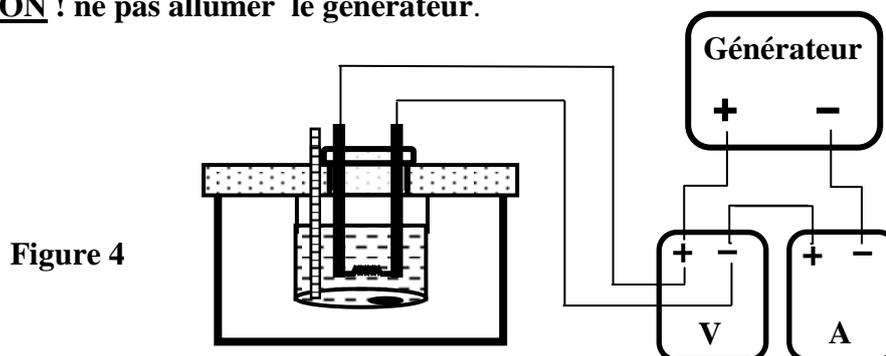
La manipulation consiste à déterminer le coefficient  $J$  qui relie la chaleur au travail, en étudiant l'évolution de la température  $T$  d'une masse  $m$  d'eau en fonction du temps  $t$ . Pour cela, suivre les étapes suivantes :

- Retirer le vase calorimétrique de l'enceinte adiabatique.
- Enlever le couvercle du vase.
- **Peser avec précision**, le vase calorimétrique **vide**, à l'aide de la balance. Noter sa masse.
- Ajouter dans ce vase une masse  $m$  d'eau froide (la valeur de  $m$  vous sera donnée dans la salle).
- Fixer le couvercle au vase calorimétrique **rempli d'eau**, puis mettre l'ensemble dans l'enceinte adiabatique vide (figure 3).



- Placer la résistance et le thermomètre dans le vase calorimétrique rempli d'eau.
- Réaliser le montage de la figure 4 et **le faire vérifier par votre enseignant**.

**ATTENTION ! ne pas allumer le générateur.**



- **Mettre** en marche l'agitateur magnétique qui fait tourner le barreau magnétique. La vitesse de rotation de ce dernier doit être faible. L'agitateur magnétique doit rester en marche au cours de toute la manipulation pour réaliser l'équilibre thermique.
- **Mettre** en marche le chronomètre; il ne doit être arrêté qu'à la fin de l'expérience.
- **Laisser** l'interrupteur du générateur ouvert. Relever la température de l'eau à **0** minute et **1** minute, sans arrêter le chronomètre (Tableau 1).
- **A la 2<sup>ème</sup>** minute (aiguille blanche du chronomètre devant la graduation 2 : figure 5), relever  $T$  et allumer le générateur.
- **Mesurer** la tension  $U$  et le courant  $I$  à l'aide du voltmètre et de l'ampèremètre.
- **Relever** la température toutes les minutes jusqu'à la **9<sup>ème</sup>** minute (Tableau 2).
- **A la 10<sup>ème</sup>** minute, relever  $T$  et éteindre le générateur : **le temps de chauffage dans cet exemple est 8 mn**. Continuer à relever la température jusqu'à la **14<sup>ème</sup>** minute (Tableau 3).
- **Arrêter** le chronomètre et l'agitateur magnétique.

- Remarques :**
- \* Les mesures de **T** sont prises au **début** de chaque minute.
  - \* Les valeurs de **t** sont données ici à titre d'exemple ; elles peuvent être changées par votre enseignant.
  - \* Donner le détail des calculs.

**Travail à faire sur le compte rendu :**

1- Remplir les tableaux suivants :

**Tableau 1 :** Eau froide + Agitation + Générateur éteint

t(min)	0	1
T(°C)		

**Tableau 2 :** Eau + Agitation + Générateur allumé

t(min)	2	3	4	5	6	7	8	9
T(°C)								

**Tableau 3 :** Eau chaude + Agitation + Générateur éteint

t(min)	10	11	12	13	14
T(°C)					

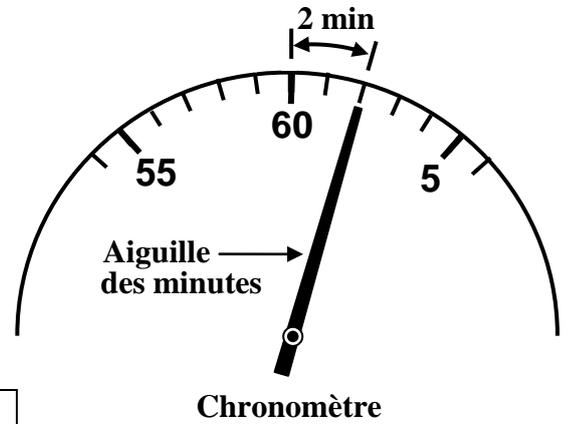


Figure 5

2- Tracer la courbe **T = f(t)** sur un papier millimétré (voir figure 6, page suivante).

3- Remplir le tableau ci-dessous (**t** est le temps de chauffage) :

U(V)	$\Delta U(V)$	I(A)	$\Delta I(A)$	m(g)	$\Delta m(g)$	t(s)	$\Delta t(s)$	$T_B'(°C)$	$\Delta T_B'(°C)$	$T_C'(°C)$	$\Delta T_C'(°C)$

**N.B. :** Pour la mesure de la tension **U** et du courant **I** ainsi que leurs incertitudes, voir le paragraphe " **UTILISATION DE L'AMPEREMETRE ET DU VOLTMETRE** " à la page 10. Le calibre de l'ampèremètre est 10 A.

4- Donner la valeur numérique de **J ± ΔJ** sachant que :

$$J = \frac{U I t}{(m + \mu) c_p (T_C' - T_B')}$$

$$\Delta J = J \left( \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta c_p}{c_p} + \frac{\Delta m + \Delta \mu}{m + \mu} + \frac{\Delta T_C' + \Delta T_B'}{|T_C' - T_B'|} \right)$$

5- Comparer cette valeur de **J**, avec celle déterminée à partir d'un calorimètre plus sophistiqué que celui de Berthelot (**4,18 ± 0,01**) J/cal. Conclure.

Sur la figure 6, on peut observer l'évolution de la température  $T$  d'une masse  $m$  d'eau en fonction du temps  $t$  ainsi que les corrections apportées.

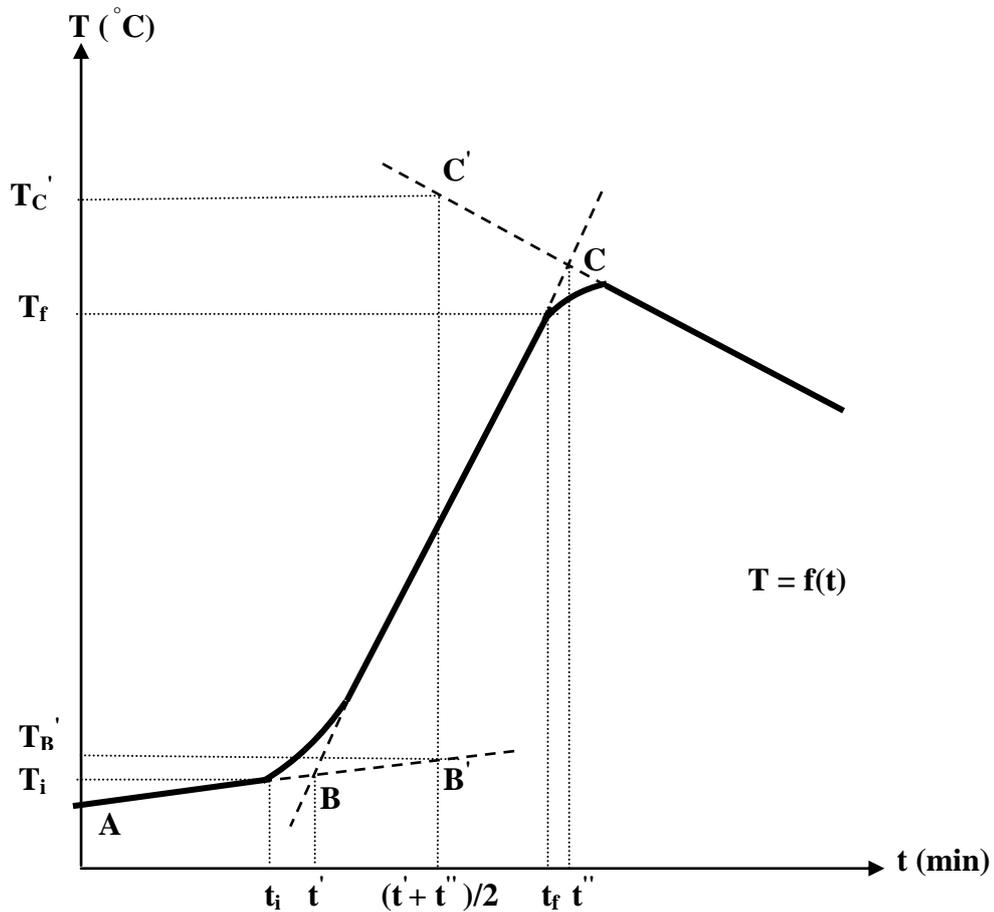


Figure 6

**AB** : eau froide.

$t_i$  : branchement de la résistance chauffante (interrupteur fermé).

$t'$  : début des échanges calorimétriques correspondant à l'intersection des segments **AB** et **BC**.

$t_f$  : arrêt de la résistance chauffante (interrupteur ouvert).

$t''$  : fin des échanges calorimétriques.

# PRESSIION DE VAPEUR D'EAU A HAUTE TEMPERATURE

## I- BUT

Le but de la manipulation est la mesure de la pression de vapeur d'eau en fonction de la température. A partir de ces valeurs, on détermine  $L_V$ , la chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau.

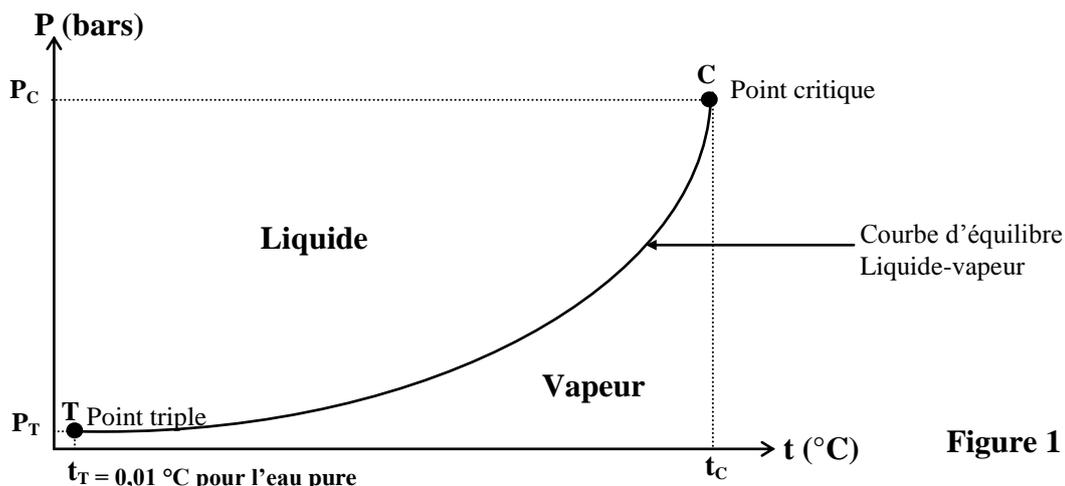
## II- PARTIE THEORIQUE

Dans une chambre bien fermée et sous pression, on chauffe de l'eau. Pendant cette opération, il se produit une vaporisation d'eau telle que la pression dans la chambre correspond à la pression de la vapeur saturante à la température présente. Cette pression est aussi la pression d'équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur. En faisant varier la température (en chauffant ou en refroidissant), on peut mesurer la pression de vapeur en fonction de la température, ce qui nous permet de déterminer la chaleur latente de vaporisation à différentes températures.

L'énergie thermique nécessaire à la vaporisation d'une mole de liquide d'un corps pur est la chaleur latente molaire de vaporisation  $L_V$ . A une température donnée  $t$  en  $^{\circ}\text{C}$  (ou  $T$  en degré Kelvin  $K$ , avec  $T = 273 + t$ ), correspond une pression de vapeur déterminée  $P$ , pour laquelle la phase liquide et la phase gazeuse se trouvent en équilibre. Sur la courbe limitant les deux phases (figure 1), on peut appliquer l'équation différentielle de Clausius-Clapyeron :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L_V}{T(V_V - V_{Li})} \quad (1)$$

$V_V$  et  $V_{Li}$  sont, respectivement, le volume molaire de la vapeur et du liquide.



Dans le cas de l'eau pure :

Point critique ( $P_C = 221,2 \text{ bars}$  ;  $t_C = 374,2^{\circ}\text{C}$  )

Point triple ( $P_T = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$  ;  $t_T = 0,01^{\circ}\text{C}$  )

Pour les faibles pressions de vapeur ( $P \ll P_C$ ), on a  $V_{Li} \ll V_V$ , donc  $V_V - V_{Li} \approx V_V$ , et la vapeur se comporte approximativement comme un gaz parfait ; on a alors :

$$V_V = \frac{RT}{P} \text{ avec } R = (8,314 \pm 0,001) \text{ J/K.mol, constante des gaz parfaits.}$$

On obtient ainsi à partir de la relation (1) :

$$\frac{dP}{P} = \frac{L_V}{R} \frac{dT}{T^2} \quad (2)$$

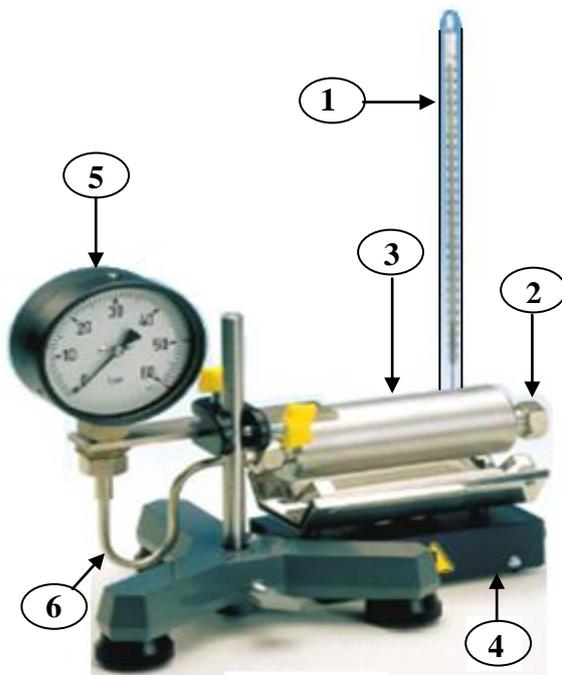
En supposant  $L_V$  constante, on obtient par intégration l'équation suivante de Van't-Hoff :

$$\ln P = -\frac{L_V}{RT} + \text{constante} \quad (3)$$

On a ainsi une fonction approximativement linéaire entre  $\ln P$  et  $1/T$ .

### III- MATERIEL

Le montage est effectué suivant la figure 2 ci-dessous :



- 1 : Thermomètre
- 2 : Port de remplissage de l'eau
- 3 : Chambre haute pression
- 4 : Appareil de chauffage électrique
- 5 : Manomètre
- 6 : Tube en U reliant la chambre haute pression au manomètre

Figure 2

La chambre à haute pression (d'une capacité de **15 ml**) est remplie complètement d'eau distillée ; aucune bulle d'air ne reste dans le tube en U de raccordement au manomètre. L'ensemble " chambre haute pression + manomètre " est fixé à l'aide d'un étrier de serrage ; on le met ensuite au dessus de l'appareil de chauffage électrique. Le thermomètre qui mesure la température  $t$  de l'eau est introduit dans un trou, situé sur la face supérieure de la chambre haute pression. On met dans ce trou une pâte thermo-conductrice.

**Attention** : pendant le chauffage, il ne faut pas toucher **l'appareil**, car il devient **très chaud**.

## IV- PARTIE PRATIQUE

- Demander à votre enseignant de mettre le thermomètre dans le trou de la chambre haute pression.
- Allumer l'appareil de chauffage électrique.
- Il faut attendre un certain temps, jusqu'à ce que l'eau à l'intérieur de la chambre commence à s'évaporer : la pression **P** commence alors à augmenter.
- Lorsque la pression **P** atteint **12 bars**, il faut **éteindre** immédiatement l'appareil de chauffage.
- **La température ne doit jamais atteindre 250 °C**, sinon le thermomètre va se détériorer.
- Relever les pressions et les températures correspondantes en lisant leurs valeurs sur le manomètre et sur le thermomètre. Reporter ces valeurs sur le tableau ci-dessous (les valeurs de **P** vous seront données par votre enseignant).

<b>Pression P (bars)</b>						
<b>Température t (°C)</b>						

- 1) a- Représenter graphiquement **P = f(t)** sur un papier millimétré, en indiquant la zone de la phase liquide et la zone de la phase vapeur.
- b- A partir de cette courbe, déterminer la température d'ébullition de l'eau sous une pression de **9 bars**. Remplir le tableau ci-dessous puis conclure.

<b>P (bars)</b>	<b>Température d'ébullition de l'eau (°C)</b>
<b>1,01325</b>	
<b>9</b>	

Dans les conditions normales, l'eau devient vapeur sous une pression **P = 1 atmosphère** (**1 atmosphère** correspond à **1,01325 bars**).

- 2) En prenant deux valeurs de **P** (**P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**) et **T** (**T<sub>1</sub>**, **T<sub>2</sub>**), on obtient la relation :

$$L_v = \frac{R}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \ln \frac{P_2}{P_1} . \text{ L'incertitude sur } L_v \text{ est : } \Delta L_v = L_v \left( \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta T_1}{T_1} \right) + RT_1 \frac{\Delta P_1}{P_1} .$$

A partir de ces deux expressions, déterminer la valeur de la chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau **L<sub>v</sub>**, puis son incertitude **Δ L<sub>v</sub>** en Joule/mol.

**Remarques :** \* Faire attention à la différence entre **T** et **t**.

\* Donner le détail des calculs sur le compte rendu.

- 3) Quel est le type de système thermodynamique étudié dans cette manipulation ? Justifier votre réponse.

# SYSTEMES DE COORDONNEES

## I- BUT

La présente manipulation consiste à repérer un point matériel  $M$  dans l'espace par rapport à un repère orthonormé. On utilisera les trois systèmes de coordonnées suivants :

- système cartésien
- système cylindrique
- système sphérique

Elle permet aussi d'utiliser les formules mathématiques de passage d'un système de coordonnées à un autre.

## II- PARTIE THEORIQUE

### 1- Systèmes de coordonnées

#### a- Coordonnées cartésiennes

$$x = Om_1$$

$$y = Om_2$$

$$z = Om_3$$

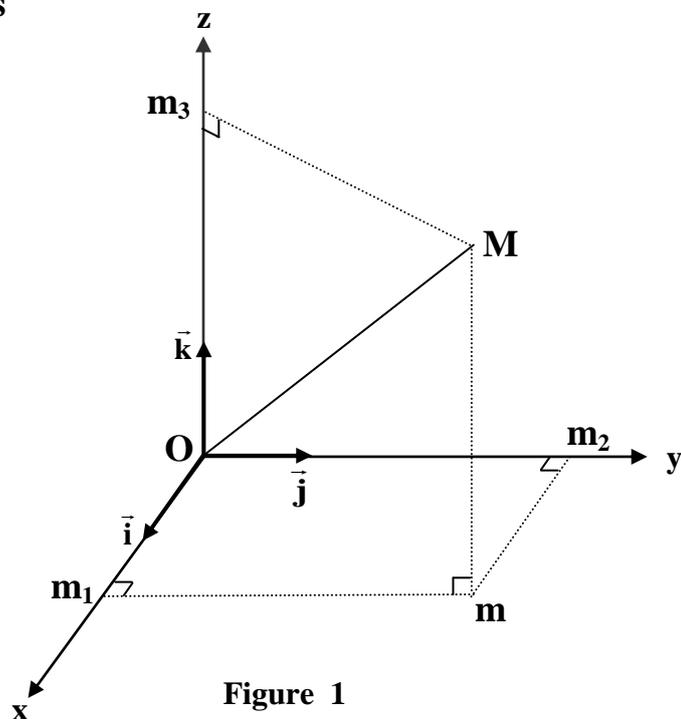


Figure 1

**Coordonnées cartésiennes : (x, y, z)**

Le point  $M$  est repéré par ses projections respectives  $m_1$ ,  $m_2$  et  $m_3$  sur les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  d'un repère orthonormé  $(O; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  (figure 1).  $m$  étant la projection orthogonale de  $M$  sur le plan  $(Oxy)$ , on a :

$$\overline{OM} = \overline{Om} + \overline{mM} = \overline{Om_1} + \overline{Om_2} + \overline{Om_3}$$

avec 
$$\overline{Om_1} = x\vec{i}, \quad \overline{Om_2} = y\vec{j}, \quad \overline{Om_3} = z\vec{k}$$

d'où 
$$\overline{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

Le point  $M$  est donc repéré dans l'espace par ses trois coordonnées cartésiennes :  $x$ ,  $y$  et  $z$ . Pour que le point  $M$  décrive tout l'espace, les paramètres  $x$ ,  $y$  et  $z$  varient comme suit :

$$-\infty < x < +\infty \qquad -\infty < y < +\infty \qquad -\infty < z < +\infty$$

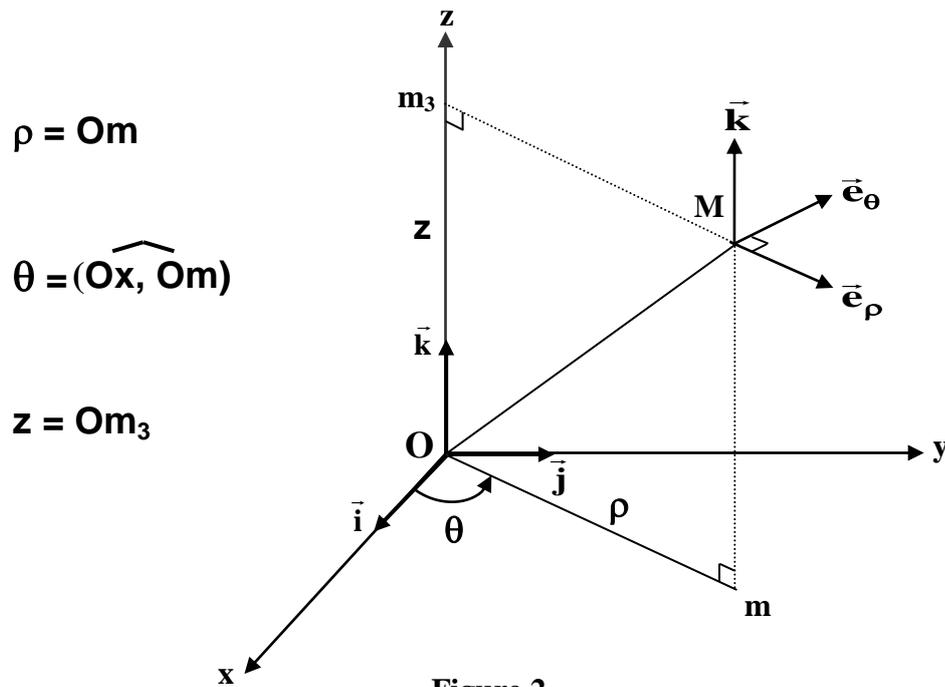
## b- Coordonnées cylindriques

Le point  $M$  est repéré en coordonnées cylindriques (figure 2) par trois paramètres  $(\rho, \theta, z)$  tels que :

\*  $\rho$  est le module du vecteur  $\overline{Om}$ ,  $m$  étant la projection du point  $M$  sur le plan  $(Oxy)$ .

\*  $\theta$  est l'angle  $(\vec{i}, \overline{Om})$  compté positivement dans le sens de  $\vec{i}$  vers  $\overline{Om}$ .

\*  $z$  est la projection orthogonale  $m_3$  du point  $M$  sur l'axe  $Oz$  :  $z = \overline{OM} \cdot \vec{k}$



**Coordonnées cylindriques :  $(\rho, \theta, z)$**

Pour que le point  $M$  décrive tout l'espace, les paramètres  $\rho$ ,  $\theta$  et  $z$  varient comme suit :

$$0 \leq \rho < +\infty \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad -\infty < z < +\infty$$

On définit une base locale orthonormée  $(\vec{e}_\rho, \vec{e}_\theta, \vec{k})$  de la façon suivante :

- $\vec{e}_\rho$  : vecteur unitaire de direction  $\overline{Om}$ .
- $\vec{e}_\theta$  : vecteur unitaire directement perpendiculaire à  $\overline{Om}$  (dans le sens de  $\theta$  croissant).
- $\vec{k}$  : vecteur unitaire tel que  $\vec{k} = \vec{e}_\rho \wedge \vec{e}_\theta$

La position du point  $M$  en coordonnées cylindriques est donnée par la relation :

$$\overline{OM} = \rho \vec{e}_\rho + z \vec{k}.$$

### c- Coordonnées sphériques

Le point **M** est repéré en coordonnées sphériques (figure 3) par trois paramètres (**r**, **θ**, **φ**) avec :

\* **r** est le module du rayon vecteur  $\overline{OM}$  :  $r = \|\overline{OM}\|$ .

\*  $\theta = (\vec{i}, \overline{Om})$  est l'angle compté positivement de  $\vec{i}$  vers  $\overline{Om}$ , avec **m** la projection du point **M** sur le plan (**Oxy**).

\*  $\varphi = (\vec{k}, \overline{OM})$  est l'angle compté positivement de  $\vec{k}$  vers  $\overline{OM}$ .

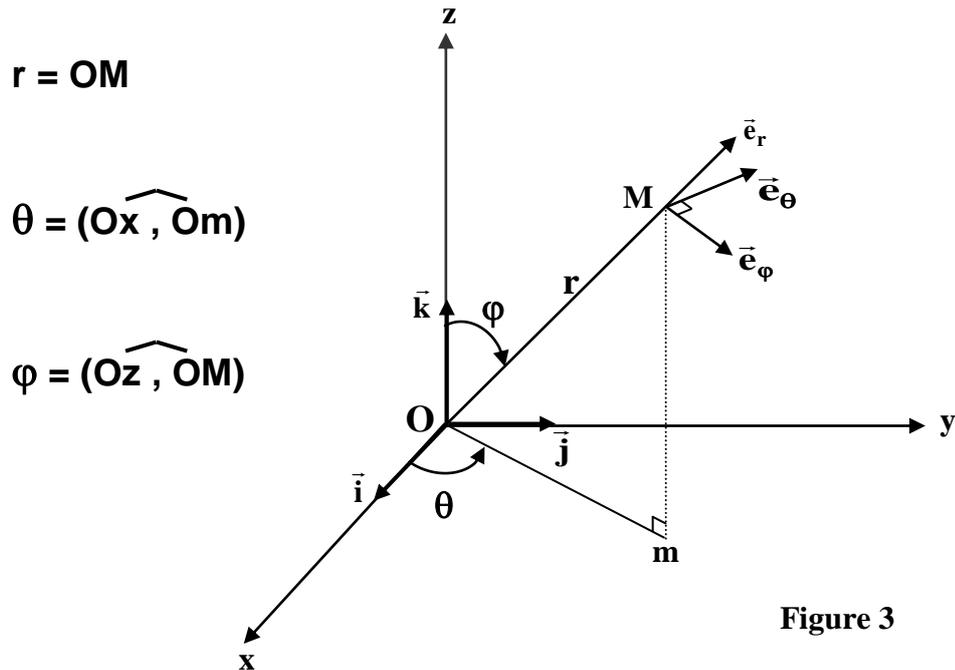


Figure 3

**Coordonnées sphériques : ( $r, \theta, \varphi$ )**

Pour que le point décrive tout l'espace, les paramètres **r**, **θ** et **φ** varient comme suit :

$$0 \leq r < \infty \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad 0 \leq \varphi \leq \pi$$

On définit une base locale orthonormée  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$  de la façon suivante :

- $\vec{e}_r$  : vecteur unitaire porté par  $\overline{OM}$  et orienté de **O** vers **M**. Son origine se trouve sur le point **M**.
- $\vec{e}_\theta$  : vecteur unitaire perpendiculaire à  $\vec{e}_r$  et au plan contenant les points **O**, **m** et **M** (orienté dans le sens de  $\theta$  croissant).
- $\vec{e}_\varphi$  : vecteur unitaire tel que  $\vec{e}_\varphi = \vec{e}_r \wedge \vec{e}_\theta$ .

La position du point **M** en coordonnées sphériques est donnée par la relation :  $\overline{OM} = r \vec{e}_r$ .

## 2- Formules de passage entre systèmes

### a- Passage du système de coordonnées cylindriques au système de coordonnées cartésiennes

Soit un point  $M$  de coordonnées cylindriques  $(\rho, \theta, z)$ . On voudrait déterminer par le calcul, ses coordonnées cartésiennes  $(x', y', z')$  ainsi que leurs incertitudes  $\Delta x'$ ,  $\Delta y'$  et  $\Delta z'$ , en fonction de  $\rho$ ,  $\theta$  et  $z$ . On a :

$$\overrightarrow{OM} = \rho \vec{e}_\rho + z \vec{k}$$

$$\overrightarrow{OM} = x' \vec{i} + y' \vec{j} + z' \vec{k}$$

Après projection du vecteur unitaire  $\vec{e}_\rho$  sur le plan  $Oxy$  et identification des deux expressions de  $\overrightarrow{OM}$  on obtient :

$$x' = \rho \cos \theta \quad y' = \rho \sin \theta \quad z' = z \quad (1)$$

Par différentiation totale des coordonnées cartésiennes et majoration physique, les incertitudes absolues s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} \Delta x' &= |\cos \theta| \Delta \rho + \rho |\sin \theta| \Delta \theta \\ \Delta y' &= |\sin \theta| \Delta \rho + \rho |\cos \theta| \Delta \theta \\ \Delta z' &= \Delta z \end{aligned} \right\} (2)$$

### b- Passage du système de coordonnées sphériques au système de coordonnées cartésiennes

Il s'agit ici de calculer les coordonnées cartésiennes  $(x', y', z')$  d'un point  $M$  et leurs incertitudes  $\Delta x'$ ,  $\Delta y'$  et  $\Delta z'$ , en fonction de ses coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$ . On a :

$$\overrightarrow{OM} = r \vec{e}_r$$

$$\overrightarrow{OM} = x' \vec{i} + y' \vec{j} + z' \vec{k}$$

Après projection du vecteur unitaire  $\vec{e}_r$  sur les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  et identification des deux expressions de  $\overrightarrow{OM}$  on obtient :

$$x' = r \sin \varphi \cos \theta \quad y' = r \sin \varphi \sin \theta \quad z' = r \cos \varphi \quad (3)$$

Les incertitudes absolues s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} \Delta x' &= |\sin \varphi \cos \theta| \Delta r + r |\sin \varphi \sin \theta| \Delta \theta + r |\cos \varphi \cos \theta| \Delta \varphi \\ \Delta y' &= |\sin \varphi \sin \theta| \Delta r + r |\sin \varphi \cos \theta| \Delta \theta + r |\cos \varphi \sin \theta| \Delta \varphi \\ \Delta z' &= |\cos \varphi| \Delta r + r |\sin \varphi| \Delta \varphi \end{aligned} \right\} (4)$$

### III- MATERIEL

Le dispositif expérimental (figure 4) contient :

- Un disque en plexiglas horizontal fixe, de **40 cm** de diamètre, représentant le plan **Oxy** ; il est gradué de **0° à 360°**.
- Un demi-disque vertical de **40 cm** de diamètre, qui peut tourner autour d'un axe perpendiculaire au plan **Oxy** et passant par l'axe **Oz** ; il est gradué en degrés.

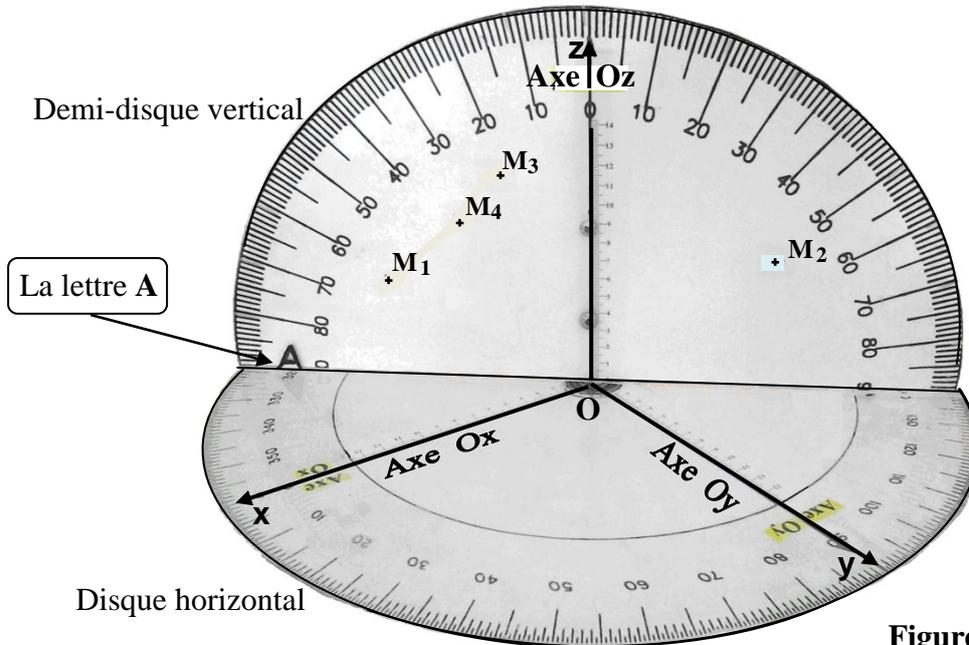


Figure 4

### IV- PARTIE PRATIQUE

⊛ Les angles  $(\widehat{Ox, OA})$  des points  $M_1, M_2, M_3,$  et  $M_4$  seront donnés dans la salle de TP.

⊛ Prendre les incertitudes suivantes :  $\Delta\theta = 2^\circ ; \Delta\phi = 1^\circ$

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta \rho = \Delta r = 2\text{mm.}$$

#### 1- Système de coordonnées cartésiennes

Dans cette partie, il faut mesurer les coordonnées cartésiennes du point  $M_1$  (figure 1). Pour cela, placer la lettre **A** du demi disque vertical (figure 4), devant l'angle zéro du disque horizontal (**OA** confondu avec **Ox**). A partir de cette position, tourner le demi disque vertical d'un angle  $(\widehat{Ox, OA})$ . Faire ensuite les projections nécessaires pour mesurer les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  du point  $M_1$ , puis porter les résultats dans le tableau ci-dessous.

Refaire la même chose pour le point  $M_2$  en prenant un autre angle  $(\widehat{Ox, OA})$ .

	$(\widehat{Ox, OA})(^\circ)$	x(cm)	$\Delta x(\text{cm})$	y(cm)	$\Delta y(\text{cm})$	z(cm)	$\Delta z(\text{cm})$
$M_1$							
$M_2$							

## 2- Système de coordonnées cylindriques

a- Mesurer les coordonnées cylindriques ( $\rho$ ,  $\theta$ ,  $z$ ) du point  $M_3$  et porter le résultat dans le tableau suivant :

	$(\widehat{Ox}, \widehat{OA})$ (°)	$\rho$ (cm)	$\Delta\rho$ (cm)	$\theta$ (degré)	$\Delta\theta$ (rad)	$z$ (cm)	$\Delta z$ (cm)
$M_3$							

b- A l'aide des formules de passage du système de coordonnées cylindriques au système de coordonnées cartésiennes (relations (1) et (2)), calculer ( $x'_3$ ,  $y'_3$ ,  $z'_3$ ), les coordonnées cartésiennes de  $M_3$  et remplir le tableau suivant :

	$x'_3$ (cm)	$\Delta x'_3$ (cm)	$y'_3$ (cm)	$\Delta y'_3$ (cm)	$z'_3$ (cm)	$\Delta z'_3$ (cm)
$M_3$						

**NB :** Pour le calcul des incertitudes  $\Delta x'_3$ ,  $\Delta y'_3$  et  $\Delta z'_3$ , exprimer  $\Delta\theta$  en radians et donner le détail de ces calculs, avec 2 chiffres après la virgule.

c- Mesurer directement les coordonnées cartésiennes de  $M_3$  et donner leurs incertitudes :

	$x_3$ (cm)	$\Delta x_3$ (cm)	$y_3$ (cm)	$\Delta y_3$ (cm)	$z_3$ (cm)	$\Delta z_3$ (cm)
$M_3$						

d- Comparer les valeurs  $x_3$  et  $x'_3$ ,  $y_3$  et  $y'_3$  puis  $z_3$  et  $z'_3$  en appliquant le théorème de comparaison (page 4) aux résultats obtenus dans les questions b et c. Conclure.

## 3- Système de coordonnées sphériques

a- Mesurer les coordonnées sphériques ( $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ) du point  $M_4$  et porter les résultats dans le tableau ci-dessous :

	$(\widehat{Ox}, \widehat{OA})$ (°)	$r$ (cm)	$\Delta r$ (cm)	$\theta$ (degré)	$\Delta\theta$ (rad)	$\varphi$ (degré)	$\Delta\varphi$ (rad)
$M_4$							

b- A l'aide des formules de passage du système sphérique au système cartésien (relations (3) et (4)), calculer les coordonnées cartésiennes du point  $M_4$  :

	$x'_4$ (cm)	$\Delta x'_4$ (cm)	$y'_4$ (cm)	$\Delta y'_4$ (cm)	$z'_4$ (cm)	$\Delta z'_4$ (cm)
$M_4$						

**NB :** Donner le résultat des calculs de  $\Delta x'_4$ ,  $\Delta y'_4$  et  $\Delta z'_4$  avec deux chiffres après la virgule, en exprimant  $\Delta\theta$  et  $\Delta\varphi$  en radians.

c- Mesurer directement les coordonnées cartésiennes de  $M_4$  et donner leurs incertitudes :

	$x_4$ (cm)	$\Delta x_4$ (cm)	$y_4$ (cm)	$\Delta y_4$ (cm)	$z_4$ (cm)	$\Delta z_4$ (cm)
$M_4$						

d- Comparer les valeurs  $x_4$  et  $x'_4$ ,  $y_4$  et  $y'_4$  puis  $z_4$  et  $z'_4$  en appliquant le théorème de comparaison aux résultats obtenus dans les questions b et c. Conclure.

# PENDULE A " g VARIABLE "

## I- BUT

Le but de cette manipulation est :

- la mesure de la période des oscillations d'un pendule simple et d'un pendule à " g variable " (pendule dont l'intensité de la composante effective de  $\vec{g}$  peut-être variée),
- la détermination de l'accélération de la pesanteur  $\mathbf{g}$  en un lieu donné.

## II- PARTIE THEORIQUE

### 1- Pendule simple

Considérons une masse  $\mathbf{m}$  suspendue à un fil inextensible ou à une tige, dont la masse est négligeable par rapport à  $\mathbf{m}$ , et soumise à l'accélération de la pesanteur  $\mathbf{g}$ . En écartant le pendule **légèrement** de sa position d'équilibre puis en le lâchant **sans vitesse initiale**, le centre de gravité de la masse  $\mathbf{m}$  sera alors animé d'un mouvement dont la trajectoire sera un arc de cercle centré sur l'axe de rotation qui passe par le point  $\mathbf{O}$  (figure 1).

Le système considéré étant généralement la masse  $\mathbf{m}$ , les forces qui lui sont appliquées sont le poids  $\vec{\mathbf{P}}$  et la tension du fil  $\vec{\mathbf{T}}_f$  (ou réaction de la tige sur la masse). Les frottements sont supposés négligeables. L'angle de rotation  $\theta$ , repéré par rapport à la position d'équilibre, est la variable la mieux adaptée à la description du mouvement.

On utilise les coordonnées polaires pour étudier le mouvement de rotation du centre de gravité du système. Soit  $\ell$ , la longueur du fil ou la distance de l'axe au centre de gravité de la masse.  $\ell$  étant constante, on a :  $\vec{\mathbf{OM}} = \ell \vec{\mathbf{e}}_r$ , et  $\vec{\gamma}_a(\mathbf{G}) = \ell \ddot{\theta} \vec{\mathbf{e}}_\theta - \ell \dot{\theta}^2 \vec{\mathbf{e}}_r$ .

Le Principe Fondamental de la Dynamique appliqué au point  $\mathbf{G}$  s'écrit :  $\mathbf{m} \vec{\gamma}_a(\mathbf{G}) = \vec{\mathbf{P}} + \vec{\mathbf{T}}_f$ .

Sa projection suivant l'axe passant par  $\vec{\mathbf{e}}_\theta$  donne :

$$\mathbf{m} \ell \ddot{\theta} + \mathbf{m} g \sin \theta = 0.$$

C'est l'équation du mouvement, qui s'écrit pour les petites oscillations ( $\sin \theta \approx \theta$ ) :

$$\ddot{\theta} + \frac{\mathbf{g}}{\ell} \theta = 0.$$

On reconnaît ainsi l'équation d'un oscillateur harmonique. La solution de cette équation est de la forme :  $\theta = \theta_m \sin(\omega t + \varphi)$ , avec  $\omega^2 = \mathbf{g} / \ell$ . Les constantes  $\theta_m$  et  $\varphi$  sont déterminées à partir des conditions initiales.

Ainsi, aux conditions initiales suivantes :

$$t = 0, \quad \theta|_{t=0} = \theta_0 \quad \text{et} \quad \left. \frac{d\theta}{dt} \right|_{t=0} = 0,$$

$$\text{la solution s'écrit :} \quad \theta = \theta_0 \sin(\omega t).$$

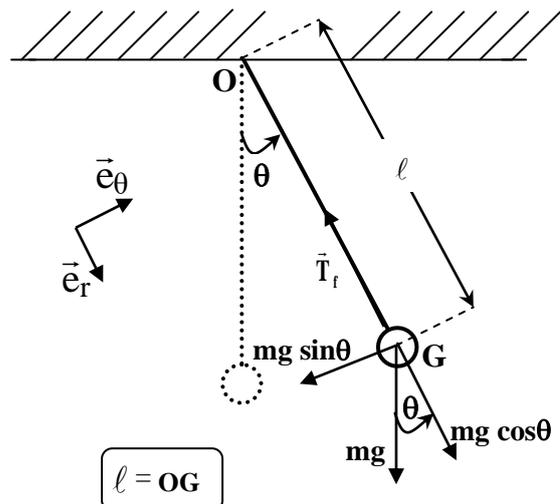


Figure 1 : Pendule simple

Sachant que  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , la période des oscillations est donnée par la relation :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad (1)$$

Notez en particulier que la période des oscillations est indépendante de la masse  $m$  et de  $\theta_m$ .

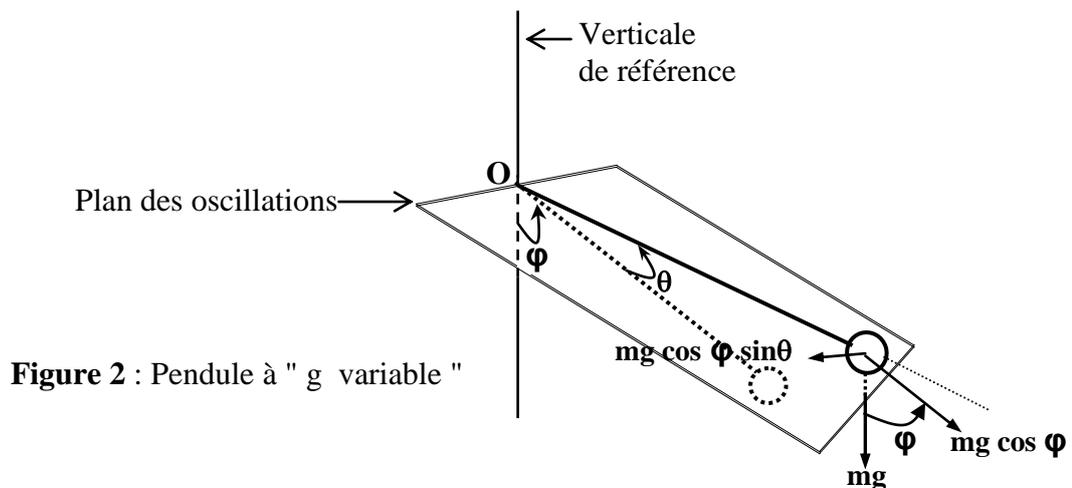
En mesurant la longueur  $\ell$  du pendule et sa période  $T$ , on peut déterminer, en utilisant la relation (1), l'accélération de la pesanteur  $g$  en un lieu donné.

## 2- Pendule à " g variable "

En tournant d'un angle  $\varphi$  le plan d'oscillation du pendule (figure 2), la composante de l'accélération de pesanteur  $g(\varphi)$  (qui est effective dans le plan d'oscillation) se trouve réduite à  $g(\varphi) = g \cos\varphi$  : ainsi seule la composante "  $m g \cos\varphi \sin\theta$  " travaille. La période des oscillations s'écrit dans ce cas :

$$T(\varphi) = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g \cos\varphi}} \quad (2)$$

En comparant les relations (1) et (2), on peut dire que  $g$  est apparemment variable en fonction de  $\varphi$ .



### Remarque importante :

La longueur  $\ell$  figurant dans les relations (1) et (2) est appelée *longueur synchrone* du pendule. La longueur mesurée entre le point  $O$  et le centre  $G$  de la masse  $m$  est appelée, elle, *longueur géométrique* du pendule ; elle sera désignée par  $L$ . Généralement, ces deux longueurs sont différentes. Néanmoins et dans certaines conditions, ces deux longueurs peuvent être considérées, en première approximation, égales. Notez en particulier que si la masse de la tige ne peut être négligée, le *centre de masse* du système {tige + masse  $m$ } devient plus près de l'axe de rotation, autrement dit la longueur  $\ell$  devient plus courte que  $L$ . Ici on considère que  $\ell = L$ .

### III- MATERIEL

Le dispositif expérimental est représenté ci-contre ; il se compose de (figure 3) :

- un pendule constitué d'une tige [1] et d'une masse mobile [2],
- un système utilisant une cellule photoélectrique [3] reliée à un chronomètre électrique [4] et installé à la position d'équilibre.

Le pendule est construit de manière à ce que le plan d'oscillation peut-être tourné progressivement de la verticale à une position horizontale. L'angle  $\varphi$  qui mesure cette déviation du plan d'oscillation par rapport à la verticale peut être lu sur une échelle graduée [5]. Dans le cas de la figure 3,  $\varphi \neq 0^\circ$ .

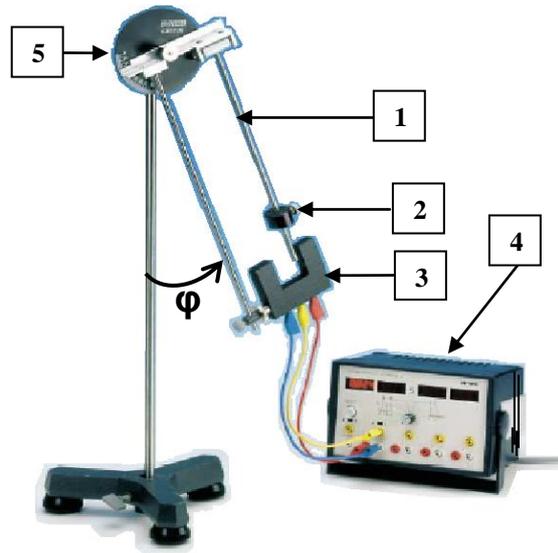


Figure 3 : Dispositif expérimental

### IV- PARTIE PRATIQUE

Remarques : - les valeurs de la longueur  $\ell$  du pendule seront données par votre enseignant ;

- prendre  $\Delta \ell = 0,2 \text{ cm}$ ,  $\Delta T = 0,001 \text{ s}$  et  $\Delta \varphi = 1^\circ$ .

#### 1- Mesure de l'accélération " g " à l'aide d'un pendule simple

Procéder de la façon suivante :

- Prendre un angle de déviation  $\varphi = 0^\circ$ , autrement dit un plan d'oscillation vertical.
- Prendre une longueur  $\ell$  du pendule (mesurée entre l'axe de rotation et le centre de gravité de la masse mobile  $m$ ).
- A partir de sa position d'équilibre, écarter légèrement (au maximum  $15^\circ$ ) le pendule puis le lâcher sans vitesse initiale.
- En actionnant le bouton " Reset " du chronomètre électronique, relever la période  $T$  des oscillations.

a- Sachant que  $\Delta(T^2) = 2 T \Delta T$ , remplir le tableau ci-dessous :

$\ell$ (cm)	$\Delta \ell$ (cm)	T (s)	$T^2$ ( $s^2$ )	$\Delta(T^2)$ ( $s^2$ )
[Tableau à remplir]				

b- Représenter graphiquement  $\ell$  en fonction de  $T^2$  sur un papier millimétré, sans oublier les rectangles d'incertitudes.

c- Calculer la pente moyenne  $p_{\text{moyenne}}$  et son incertitude  $\Delta p_{\text{moyenne}}$ .

d- Déduire l'accélération de la pesanteur " g " et son incertitude  $\Delta g$  à partir de cette pente et son incertitude.

## 2- Pendule à " g variable "

- a - Prendre une longueur  $\ell$  du pendule.
- b – Ecarter l'ensemble " tige fixe + cellule photoélectrique + pendule " d'un angle  $\varphi$ .
- c - Ecarter légèrement le pendule de sa position d'équilibre puis le lâcher sans vitesse initiale.
- d - Mesurer la période expérimentale des oscillations  $T_{\text{expérimentale}}$ .
- e - Calculer la période des oscillations  $T_{\text{calculée}}$  à partir de la relation (2). La valeur de  $g$  est celle obtenue dans la partie 1 question d.
- f - Remplir le tableau ci-dessous :

$\ell$ (cm)	$\varphi$ (°)	$\Delta \varphi$ (rad)	$T_{\text{expérimentale}}$ (s)	$\Delta T_{\text{expérimentale}}$ (s)	$T_{\text{calculée}}$ (s)	$\Delta T_{\text{calculée}}$ (s)

- g - Comparer les valeurs de  $T_{\text{expérimentale}}$  et  $T_{\text{calculée}}$  en utilisant le théorème de comparaison (voir page 4).

On donne  $\therefore \Delta T_{\text{calculée}} = \frac{T_{\text{calculée}}}{2} \left( \frac{\Delta \ell}{\ell} + \frac{\Delta g}{g} + |\text{tg}\varphi| \Delta \varphi \right)$

**Attention !!**

$\Delta \varphi$  doit être exprimée en radians

## LEXIQUE

## معجم

Abscisse .....	أفصول	Calorie .....	سعر
Absorber .....	إمتص	Calorimètre .....	مِسْعَر
Accélération de la pesanteur .....	تسارع الثقالة	Capacité calorifique .....	سَعَة حرارية
Accessoires .....	توابع	Caractéristique .....	مُمَيِّزة
Actionner .....	شغّل	Cavalier .....	خيال
Agitateur magnétique .....	محراك مغناطيسي	Cellule photoélectrique .....	خلية كهروضوئية
Aiguille .....	إبرة	Centre d'inertie .....	مركز القصور
Ajuster .....	عدّل	Centre optique .....	مركز بصري
Alimenter .....	زوّد	Centrer .....	وضع في المركز
Allongement .....	إطالة	Chaleur latente .....	حرارة كامنة
Allumer .....	أشعل	Chaleur massique .....	حرارة كتلية
Alternative (tension) .....	توتر متناوب	Chaleur spécifique .....	حرارة نوعية
Ampèremètre .....	أمبيرميتر	Charge .....	شحنة
Amplitude .....	وسع	Chauffer .....	سخّن
Angle .....	زاوية	Chiffre significatif .....	رقم ذو دلالة
Anneau .....	حلقة	Chronomètre .....	مقياس الوقت، ميقت
Annuler .....	أعدم	Circuit .....	دائرة
Appareil .....	جهاز	Circulaire .....	دائري
Approximation .....	تقريب	Classe .....	صنف
Arbitraire .....	اعتباطي	Code .....	رمز
Arc de cercle .....	قوس دائرة	Coefficient de raideur .....	مُعامل الصلابة
Argent .....	فضة	Coïncider .....	تطابق
Arrêt .....	توقف	Commande .....	تحكم
Arrondir (un nombre) .....	جَبَر (عددا)	Commenter .....	عَلَّق
Aspect .....	مظهر	Commutateur central .....	مُبدل مركزي
Association en parallèle .....	تركيب على التوازي	Comparer .....	قارن
Association en série .....	تركيب على التوالي	Composante .....	مُرَكِّبة
Axe optique .....	مِحور بصري	Composé .....	مُرَكَّب
Balance digitale .....	ميزان عددي	Compression .....	ضغط
Banc optique .....	نضد بصري	Compte-rendu .....	تقرير
Barreau magnétique .....	قطيب مغناطيسي	Concentration .....	تركيز
Base de projection .....	قاعدة الإسقاط، نِظْمَة	Conclure .....	استنتج
Base de temps .....	قاعدة الزمن	Condensateur .....	مكثف
Base locale .....	قاعدة محلية	Condenseur double .....	مكثف ضوء مزدوج
Base orthonormée .....	قاعدة متعامدة	Conditions initiales .....	الشروط الأولية
Binôme .....	زوج	Conducteur .....	مُوصِل
Boite .....	عُلية	Conduction .....	توصيل
Borne .....	مربط	Confirmer .....	أكّد
Bouton .....	زر	Confondu .....	متطابق
Branche (d'un circuit) .....	فرع	Connecter .....	ربط، لاقى بين
Branchement .....	إيصال	Constante .....	ثابتة
Bras orientable .....	ذراع قابل للتوجيه	Constructeur (d'un appareil) .....	الصانع
Brillance .....	لمعان	Continu (courant) .....	مستمر (تيار)
But .....	هدف	Convection (de la chaleur) .....	حَمَل (حراري)
Cadran .....	ميناء	Coordonnée .....	إحداثي
Calculer .....	حَسَب	Corps .....	جسم
Calibre .....	عيار	Correction .....	تصحيح

Côté	ضلع	Effet Joule	مفعول جول
Coulisser	انزلق، تزللق	Electrocinétiqne	كهرباء متحركة
Courant électrique	تيار كهربائي	Elément différentiel	عنصر تفاضلي
Courants fondamentaux	تيارات أساسية	Eliminer	حَذَفَ
Courbe	مُنحنى	Ellipse	إهليلج
Court-circuit	دائرة قصيرة	En fonction du temps	بدلالة الزمن
Couvercle	غطاء	Enceinte adiabatique	كنظيمة
Croissant	تزايدى	Encombrement	زَحْمَة
Cuivre	نحاس	Energie thermique	طاقة حرارية
Cuve	حَوْض، وعاء	Entier relatif	صحيح نسبي
Décharge	تفريغ	Entrée	مدخل
Déduire	استنتج	Epaisseur	سُمْك
Déformation	تشوه	Equation différentielle	معادلة تفاضلية
Degré d'exactitude	درجة الضبط	Equation du second ordre	معادلة من الدرجة الثانية
Démarche	منهج	Equilibre mécanique	توازن ميكانيكي
Déphasage	اختلاف (فرق في) الطُّور	Equilibre thermique	توازن حراري
Déplacer	نَقَلَ	Equivalence	تكافؤ
Dérivée partielle	مشتقة جزئية	Equivalent	مكافئ
Description	وصف	Erreur de parallaxe	خطأ اختلاف الموضع
Détérioration	إتلاف	Espace	فضاء
Déterminer	حدَّدَ	Etape	مرحلة
Déviation	انحراف	Etat d'équilibre	حالة التوازن
Diagramme	مخطط	Etat physique	حالة فيزيائية
Diamètre	قُطر	Eteindre	أطفأ
Diapositive	صورة شفافة	Etoile	نجم
Différence de potentiel	فرق الجهد	Etrier de serrage	ركاب للشد
Différentiation	مفاضلة	Evolution de la température	تطور الحرارة
Différentielle partielle	تفاضل جزئي	Expérience	تجربة
Différentielle totale	تفاضل كلي	Explicite	صريح
Digital	رقمي	Expression	صيغة
Dimension géométrique	بُعد هندسي	Extérieur	خارج
Dioptre	كاسر	Face rugueuse	وجه أحرش
Direction	اتجاه	Faisceau	حُزْمَة
Dispositif expérimental	عدة (تجهيزة) تجريبية	Fente	شَق
Disque	قرص	Figure	شكل
Distance focale	مسافة بؤرية	Fil de connexion	سلك الربط
Distiller	قطر	Finesse	دقة
Division	تدرية	Fluide	مائع
Donnée	مُعطى	Focométrie	قياس بصري
Double trace	أثر مزدوج	Fonction	دالة
Droite	مستقيم	Fonction linéaire	دالة خطية
Durée	مدة	Force de pression	قوة الضغط
Dynamique	ديناميكي	Force électromotrice	قوة كهَر مُحرِّكة
Ebullition	غليان	Formule de passage	صيغة المرور، وسيطة
Ecarter	أبعد	Formuler les équations	صاغ المعادلات
Echange thermique	تبادل حراري	Foyer image	البؤرة الصورة
Echanger	بادل، تبادل	Foyer objet	البؤرة الشيء
Echantillon	عَيِّنَة	Fréquence	تردُّد
Echelle	سُلَّم	Fréquencemètre	مقياس التردُّد
Eclairement	إضاءة	Frottement	احتكاك
Ecran	شاشة	Fusion	انصهار
Effet de... sur..	تأثير ... على	Gaz parfait	غاز كامل

Générateur basse fréquence ..... مُؤَلِّد ذو تردد منخفض  
 Générateur de courant continu ..... مولد التيار المستمر  
 Géométrique ..... هندسي  
 Graduation principale ..... تدريجة رئيسية  
 Grandissement ..... تكبير  
 Grandeur thermique ..... مقدار حراري  
 Graphe ..... مبيان  
 Halogène ..... هالوجين  
 Homogène ..... متجانس  
 Horizontal ..... أفقي  
 Illustrer ..... وضح  
 Image réelle ..... صورة حقيقية  
 Image virtuelle ..... صورة وهمية  
 Incertitude absolue ..... ارتياب مطلق  
 Incertitude accidentelle ..... ارتياب عَرَضي  
 Incertitude relative ..... ارتياب نسبي  
 Incertitude systématique ..... ارتياب تصنيفي  
 Incident ..... وارد  
 Indépendant ..... مستقل  
 Indice ..... مُعامل  
 Inextensible (fil) ..... غير قابل للتمدد  
 Instant moyen ..... لحظة متوسطة  
 Instantané ..... لحظي  
 Instrument ..... أداة، جهاز  
 Intégration ..... مُكاملة  
 Intensité ..... شدة  
 Intermédiaire ..... وسيط  
 Interprétation ..... تفسير  
 Interrupteur ..... قاطع التيار  
 Intersection ..... تقاطع  
 Intervalle ..... مجال، فترة  
 Isolant ..... عازل  
 Isoler thermiquement ..... عزل حراريا  
 Joule ..... جول  
 Lâcher ..... أرخى  
 Lame à faces parallèles ..... صفيحة متوازية الوجهين  
 Lame de verre ..... صفيحة زجاجية  
 Lampe ..... مصباح  
 Lentille convergente ..... عدسة مجمعة  
 Lentille divergente ..... عدسة مفرقة  
 Lentille mince ..... عدسة رقيقة  
 Limite ..... نهاية  
 Linéaire ..... خطي  
 L'œil nu ..... العين المجردة  
 Logarithme ..... لوغاريتم  
 Loi d'Ohm ..... قانون أوم  
 Longueur ..... طول  
 Luminosité ..... إضاءة  
 Maille ..... حَلْق  
 Majoration physique ..... إكبار فيزيائي  
 Manipulation ..... مناولة  
 Manomètre ..... مانومتر

Maquette ..... حامل المكونات الكهربائية  
 Masse ..... كتلة، هيكل كاشف التذبذب  
 Matériel ..... مُعدّات  
 Matière ..... مادة  
 Maximum ..... أقصى  
 Mesure algébrique ..... قياس جبري  
 Méthode des logarithmes ..... منهج (طريقة) اللوغاريتمات  
 Méthode électrique ..... الطريقة الكهربائية  
 Mettre en marche ..... تشغيل  
 Microscope ..... مجهر  
 Milieu extérieur ..... المحيط الخارجي  
 Minimum ..... أدنى  
 Miroir ..... مرآة  
 Mode de transfert d'énergie ..... كيفية انتقال الطاقة  
 Modèle ..... نموذج  
 Module ..... معيار  
 Mole ..... مول  
 Montage amont ..... تركيب عالي  
 Montage aval ..... تركيب سافل  
 Mouvement sinusoïdal ..... حركة جَيِّبِيَّة  
 Moyenne ..... معدل  
 Nature du phénomène ..... طبيعة الظاهرة  
 Négatif ..... سالب  
 Négligeable ..... قابل للإهمال، مهمل  
 Nette ..... واضحة  
 Nœud ..... عُقدة  
 Normale (la) ..... منظمي  
 Objectif ..... هدف، نظام شيني  
 Objet réel ..... شيء حقيقي  
 Observer ..... لاحظ  
 Oculaire ..... نظام عيني  
 Onde électromagnétique ..... موجة كهرومغناطيسية  
 Opaque ..... معتم، غير شفاف  
 Opérateur ..... مجرب  
 Opération ..... عملية  
 Optique ..... بصري  
 Ordonnée ..... أُرْ توب  
 Ordre de grandeur ..... رتبة قدر  
 Orienté ..... موجه  
 Origine ..... أصل  
 Orthonormé ..... متعامد ممنظم  
 Oscillateur harmonique ..... مذبذب توافقي  
 Osciller ..... تذبذب  
 Oscilloscope ..... كاشف التذبذب  
 Paillasse ..... مائدة المختبر  
 Papier calque ..... أنسوخ  
 Papier millimétré ..... ورق ميليمتري  
 Parallaxe ..... اختلاف الموضع  
 Parallèle (en) ..... على التوازي  
 Paramètre ..... متغير  
 Paroi ..... جدار  
 Passage ..... مرور

Pâte thermo-conductrice ..... عجّين موصل للحرارة  
 Pendule simple ..... نّوأس بسيط  
 Pente ..... ميل، منحدر  
 Percer ..... ثقب  
 Période ..... دّور  
 Perpendiculaire ..... عمودي، متعامد  
 Pertes calorifiques ..... ضياع سعري (حراري)  
 Pesanteur ..... ثقلية  
 Peser ..... وزن  
 Phase liquide ..... طّور سائل  
 Phénomène ..... ظاهرة  
 Pivot ..... جذر وتدي  
 Plan ..... مستوى  
 Plaque en plastique ..... صفيحة من اللدن  
 Plexiglas ..... زجاج الوقاية، بليكسيكلاس  
 Point critique ..... نقطة حرجة  
 Point matériel ..... نقطة مادية  
 Point triple ..... نقطة ثلاثية  
 Points conjugués ..... نقط متوافقة  
 Polaire ..... قُطبي  
 Pôle ..... قطب  
 Polycopié ..... مطبوع  
 Positif ..... موجّب  
 Position ..... موضع  
 Potentiel ..... جهد  
 Pourcentage ..... نسبة  
 Pratique ..... تطبيقي  
 Précédent ..... سابق  
 Précision ..... دقة  
 Premier principe de la ..... أول مبادئ الديناميك الحرارية  
 thermodynamique  
 Pression ..... ضغط  
 Principe fondamental de ..... العلاقة الأساسية للديناميك  
 la dynamique  
 Prise (de courant) ..... مأخذ التيار  
 Prisme ..... مّوشور  
 Produit ..... مادة، جُداء  
 Projecteur de diapositives ..... مسلاط  
 Projection orthogonale ..... إسقاط متعامد (عمودي)  
 Proportionnalité ..... تناسب  
 Propriété ..... خاصية  
 Puce ..... برغوثة  
 Pulsation ..... نبض  
 Pur ..... خالص  
 Quantité de chaleur ..... كمية الحرارة  
 Quotient ..... خارج  
 Raccordement ..... تدريك  
 Raideur (coefficient de) ..... صلابة  
 Rappel ..... ارتداد، تكبير  
 Rapport ..... نسبة  
 Rayon de courbure ..... شعاع الانحناء  
 Rayon lumineux ..... شعاع ضوئي

Rayon vecteur ..... شعاع المتجهة  
 Rayonnement thermique ..... إشعاع حراري  
 Réaction ..... رد الفعل  
 Réalisation du montage ..... إنجاز التركيب  
 Récipient cylindrique ..... إناء أسطواني  
 Rectangle d'incertitude ..... مستطيل الإرتياب  
 Référence ..... مرجع  
 Réflexion ..... انعكاس  
 Réfraction ..... انكسار  
 Régler ..... ضبط  
 Relation de conjugaison ..... علاقة التوافق  
 Relever ..... استخراج  
 Remarque ..... ملاحظة  
 Renversée ..... مقلوبة  
 Repère ..... مَعْلَم، إشارة أو علامة  
 Repérer ..... مَعْلَم  
 Représentation graphique ..... تمثيل مبياني  
 Réseau ..... شبكة  
 Résistance équivalente ..... مقاومة مكافئة  
 Résistance interne ..... مقاومة داخلية  
 Résistivité ..... مُقاومِيّة  
 Résoudre ..... حل  
 Ressort ..... نابض  
 Résultat ..... نتيجة  
 Rhéostat ..... معدلة  
 Rotation ..... دّوران  
 Saturé ..... مُشبع  
 Schéma ..... تبيانة  
 Second membre ..... طرف ثان  
 Second ordre ..... درجة ثانية  
 Section ..... مَقطع  
 Segment ..... قطعة  
 Sélecteur ..... منتخب  
 Sélectionner ..... انتخب  
 Sens ..... منحنى  
 Sensibilité ..... حساسية  
 Séparation ..... تفريق  
 Série (en) ..... على التوالي  
 Signification physique ..... دلالة فيزيائية  
 Sinusoïde ..... مُنحنى جيبي  
 Solution ..... حل  
 Sophistiqué ..... متطور  
 Source lumineuse ..... مَنبع ضوئي  
 Spot ..... نقطة ضوئية  
 Statique ..... ساكن  
 Successif ..... مُتتالي  
 Support ..... حامل  
 Supposer ..... افتراض  
 Surface ..... سطح، مساحة  
 Surface traitée ..... سطح معالج  
 Suspendre ..... علّق  
 Symbole ..... رمز

Synchrone	متزامن، متوافق
Système cartésien	مَنْظَم ديكارتي
Système cylindrique	مَنْظَم أسطواني
Système de coordonnées	نظام الإحداثيات
Système international	النظام الدولي
Système sphérique	نظام كروي
Tableau	جدول
Tangente	مماس
Température	درجة الحرارة
Temps	الوقت، الزمن
Tension alternative sinusoïdale	توتر متناوب جَيْبي
Tension du fil	توتر الخيط
Tension efficace	توتر فعال
Terme	حد، مصطلح
Théorème	مُبْرَهنة
Théorie	نظرية
Thermodynamique	علم الديناميكا الحرارية
Thermomètre	محرار
Tige	قَضيب
Total	مجموع، كلي
Tours / min	دورة في الدقيقة
Traçage des courbes	تخطيط المنحنيات
Tracer	خط
Trajectoire	مَسار
Trajet	مَسِير
Transformation élémentaire	تحول أولي
Translation	إزاحة
Transparent	شَفَّاف
Travail	شغل

Travaux pratiques	أشغال تطبيقية
Triangle	مثلث
Tube	أنبوب
Type	نوع
Unité	وَحْدَة
Usure	تآكل
Valeur absolue	قيمة مطلقة
Valeur en eau	سعة حرارية
Valeur maximale	قيمة قصوى
Valeurs croissantes	قيم تزايدية
Vapeur	بخار
Vaporisation	تبخير
Variable	متغير
Variation	تَغْيُر
Varier	غَيَّر
Vase calorimétrique	إناء مسعري
Vecteur unitaire	متجهة واحدة
Vérification	تحقق
Verre dépoli	زجاج خشن
Vertical	رأسي
Vis	بُرْعِي
Visible	ظاهر، مرئي
Visualisation	معاينة
Vitesse de balayage	سرعة الكَسْح
Vitesse de rotation	سرعة الدوران
Vitesse initiale	سرعة بدئية
Voie	طريق، مسلك
Voltmètre	فولطمتر
Zone	منطقة