

TP

S1

Calorimétrie Pendule simple



جامعة الحسن الثاني - الدار البيضاء
UNIVERSITE HASSAN II - CASABLANCA

UNIVERSITE HASSAN II CASABLANCA

FACULTE DES SCIENCES AIN CHOCK

CASABLANCA



Travaux Pratiques des modules

- PH101 (Mécanique 1, Thermodynamique)
- PH 1SV (Mécanique 1, Thermodynamique)



Responsable du module PH101 : A. Boulezhar

Responsable du module PH1SV : D. Saifaoui

Préambule

Avant de se présenter aux travaux pratiques, nous vous conseillons de lire attentivement le polycopié, de relever les points intéressants et, éventuellement, d'effectuer une petite recherche à la bibliothèque pour élargir vos connaissances sur le sujet.

Le jour "J", n'oubliez pas de vous munir du matériel nécessaire à la bonne marche de votre TP à savoir les feuilles même de brouillon, les papiers millimétrés, les stylos, un crayon, une gomme, une calculatrice scientifique etc...

Les discussions pendant la séance de TP ne sont pas tolérées et les sorties sont interdites.

La présence est obligatoire et si vous enregistrez plus de deux absences non justifiées, vous serez privés de passer vos examens.

Le matériel que nous mettons à votre disposition est cher et surtout fragile, manipulez-le avec attention.

Lorsque vous manipulez du matériel électrique, commencez par faire le montage sans alimentation et faites-le vérifier par votre enseignant avant de procéder aux mesures (même si vous êtes sûr de vous).

La séance de TP dure 3 heures, pour cela, il faut vous habituer à gérer votre temps pour pouvoir faire le montage, remplir les tableaux, tracer les courbes avec leurs rectangles d'incertitudes, donner les résultats avec leurs incertitudes et une conclusion sur les résultats obtenus et sur la manipulation en général.

Le compte rendu est à remettre obligatoirement à la fin de chaque séance à l'enseignant qui a assuré le TP avec vous.

N'oubliez pas de ranger votre poste dans le cas de la manipulation du ressort.

Les 4 manipulations du TP, sont réparties dans les trois salles à raison de huit tables de TP par salle. Vous ferez donc une permutation circulaire dans la même salle pour effectuer les 4 travaux pratiques.

SOMMAIRE

✓ Mesures de grandeurs physiques

✓ Les appareils

✓ Notions d'erreurs



Manipulations :

✓ Calorimétrie 1 : Mesure de L

~~Calorimétrie 2 : Mesure de L~~

~~Calorimétrie 3 : Mesure de L~~

✓ Calcul de g en utilisant un pendule simple

Mesures de grandeurs physiques

Objectif

Ce chapitre est consacré à l'aspect théorique de la mesure. A chaque mesure, le résultat est lié à la nature de l'élément mesuré, aux conditions de mesure, à l'unité choisie pour exprimer cette mesure.

I. Grandeurs physiques

1.1-Définitions

Si on veut comparer deux événements, il faut qu'ils soient de même nature. Si l'on veut comparer deux mesures il faut qu'il en soit de même.

En fait lorsque l'on exécute une mesure, on affecte une valeur numérique à une entité physique dont on a choisi une des propriétés comme unité.

Une grandeur physique est caractérisée par :

- la nature de l'élément mesuré,
- sa valeur numérique,
- l'unité choisie.



Si on exprime une grandeur physique G par l'équation suivante : $G = g [G]$

Où G symbolise la grandeur physique, g symbolise la valeur numérique et $[G]$ symbolise l'unité.

Une grandeur physique peut être exprimée par plusieurs unités, ses caractéristiques ne sont pas pour autant modifiées. Il suffit pour s'en convaincre de se rapporter aux mesures de longueur.

On peut dire qu'une table mesure un mètre de long, elle mesure également 100 cm.

De la même façon, on peut dire qu'un volume d'eau pèse une tonne, ou mesure 1 m^3 , on n'a pas modifié la nature de l'élément mesuré, on a simplement changé l'unité.

1.2-Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle est une méthode très efficace pour lever un bon nombre d'incertitude lors de calculs ou mesures.

On reprend la formule exprimant la grandeur physique : $G = g [G]$

Cette fonction dépend de deux autres grandeurs : $A = a [A]$
 $B = b [B]$

Si on suppose que G est de la forme A / B , on peut donc établir : $G = a [A] / b [B] = a / b [A] / [B]$

Et poser : $g = a / b$

Les grandeurs physiques A et B peuvent être exprimées avec d'autres unités. Dans ce cas, il faut écrire A et B sous la forme suivante : $A = a' [A']$ et $B = b' [B']$
 G, la grandeur physique reste inchangée. De ce fait on peut écrire : $G = g' [G']$, avec $g' = a' / b'$

Le fait d'écrire ces liens mathématiques entre les unités et leurs subdivisions nous permet d'aborder l'analyse dimensionnelle.

Cela signifie : vérifier la cohérence d'une expression en regardant si les unités mises en œuvre sont de même nature.

Exemple : Dans un problème, vous devez calculer une surface. Après un long calcul, vous obtenez la formule suivante : $S = T \cdot A \cdot B$

où : T est un temps, il s'exprime en seconde (s)
 A une longueur, elle s'exprime en mètre (m)
 B une largeur, elle s'exprime en mètre (m)

S est étant une surface, qui s'exprime en m^2 . Pourtant si on en juge d'après la formule, cette surface aurait pour unité $[s \cdot m^2]$, soit des secondes multipliées par des mètres carrés.
 Résultat faux !

L'exemple est simple, mais illustre bien l'intérêt de l'analyse dimensionnelle. Elle permet de vérifier la cohérence des résultats. Cette méthode ne permet pas de savoir si l'application numérique est juste !

Dans certain cas, l'analyse dimensionnelle des formules conduit à trouver des résultats sans dimension, c-à-d que toutes les unités se compensent les une par rapport aux autres.

Les cinq unités et symboles dimensionnels utilisés dans l'analyse dimensionnelle sont :

La longueur	L	mètre (m)
La masse	M	Kilogramme (kg)
Le temps	T	seconde (s)
L'intensité	I	Ampère (A)
La température	θ	Kelvin (K)



Exemple : l'accélération, c'est une distance divisée par un temps au carré, cela s'exprime d'un point de vue dimensionnel par :

$$\Gamma = L / T^2$$

et d'un point de vue unité par :

$$[\Gamma] = [m / s^2]$$

L'équation aux dimensions représente un lien entre les unités et n'affecte pas obligatoirement une unité à une grandeur physique. Cela détermine la manière du changement d'unité mais pas sa nature.

En projetant (1) sur les axes associés à la base de Fresnel, on obtient les relations:

$$m l (d^2\theta / dt^2) = -g \sin \theta \quad (4)$$

$$m l (d^2\theta / dt^2) = T - m g \cos \theta \quad (5)$$

L'équation (4) représente l'équation différentielle du mouvement du système, sa résolution permet de déterminer l'équation horaire du mouvement $\theta(t)$. L'équation (5) donne l'expression de la tension du fil T_f .

Dans le cas des oscillations de faible amplitude ($\theta < 15^\circ$), on peut faire l'approximation $\sin(\theta) \approx \theta$, l'équation (4) s'écrit :

$$d^2\theta/dt^2 + g \theta / l = 0 \quad (6)$$

$$d^2\theta/dt^2 + \omega^2 \theta = 0 \quad (7)$$

$$\text{avec: } \omega^2 = g / l$$

L'équation (7) est une équation différentielle du second ordre dont la solution est de la forme :

$$\theta = \theta_m \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

où les constantes θ_m et ϕ sont déterminées à partir des conditions initiales:

Dans le cas des oscillations de faibles amplitudes la période T est:

$$T = 2 \pi / \omega = 2 \pi (l / g)^{1/2} \quad (9)$$

Dans un premier temps nous allons examiner la validité de cette approximation dans les limites de précision de nos appareils de mesures, ensuite nous allons déterminer g graphiquement en utilisant la formule (9).

Enfin nous verrons avec quelle précision nous pourrions calculer la longueur l d'un pendule simple en mesurant sa période.



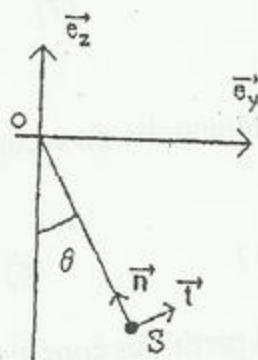
PENDULE SIMPLE

Rappels théoriques :

1- Définition du Pendule simple :

Le système est constitué d'un fil inextensible, de longueur l , de masse négligeable, au bout duquel est attaché une sphère S de faible diamètre et de grande densité, la sphère étant assimilée à un point matériel, l'autre extrémité du fil est fixé au point O .

2- étude du mouvement:



Le pendule simple écarté de sa position d'équilibre verticale ($\theta_i = 0$) d'un angle θ et abandonné à lui même se met à osciller autour de cette position d'équilibre. A chaque instant la position de S est repérée par ses coordonnées polaires (l, θ) . Le mouvement a lieu dans le plan (O, e_y, e_z) , t et n sont deux vecteurs unitaires de la base de Fresnel.

t vecteur unitaire tangent à la trajectoire.

n vecteur unitaire normal à t dirigé vers le centre O .

Le principe fondamental de la dynamique appliqué au point matériel S s'écrit:

$$m \vec{g} + \vec{T}_f = m \vec{\gamma} \quad (1)$$

Dans la base de Fresnel, l'accélération peut être décomposée en la somme des accélérations normale et tangentielle.

$$\vec{\gamma} = (dv/dt) \vec{t} + (v^2/l) \vec{n} \quad (2)$$

v : module de la vitesse.

l : rayon de courbure.

la particule décrit dans son mouvement autour de O une trajectoire circulaire.

$$V = l (d\theta/dt) \quad (3)$$

II. Système international

Lors de la onzième conférence internationale des poids et mesures, le référentiel des mesures fut défini par :

- l'unité de base
 - les unités dérivées
 - les unités complémentaires
- de façon à obtenir un ensemble cohérent.

Les unités dérivées sont obtenues par multiplication ou division des unités de base, sans autre facteur que 1.

Exemple : une pression, est exprimée par $1 \text{ Nm}^{-2} = 1 \text{ m}^{-1} \text{ kg s}^{-2}$

On cherche à rendre le système international indépendant de l'endroit où il se trouve. Le kilogramme n'a pas d'unité dérivée car on n'a pas trouvé une loi physique qui permette de le remplacer avec exactitude.

2.1-Unité de base

Il y a une différence entre :
la définition des unités et l'utilisation courante qu'on en fait.

Une mesure domestique s'effectue généralement au millième de l'unité de base,

- millimètre mm
- millilitre ml
- milliseconde ms

Une mesure industrielle a une précision de l'ordre du micron,

- micro mètre μm
- micro ampère μA
- micro seconde μs

Dans les laboratoires, dans la recherche en générale, dans le domaine de l'infiniment petit comme celui de l'infiniment grand, les précisions exigées sont beaucoup plus importantes. De ce fait, la définition des unités doit être très précise et indépendante.

Définition de la seconde : la seconde exprime la notion de temps, c'est une durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hypers fins de l'état fondamental du Cesium 133. Ce type de mesure est possible et nécessaire grâce à l'horloge atomique qui permet des mesures avec une incertitude de l'ordre de 10^{-13} .

Définition du mètre : le mètre exprime la notion de longueur. Jusqu'en 1960, la référence du mètre était une règle de platine conservée à température constante. C'était l'étalon.

Depuis la définition du mètre est donnée par la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299792458$ ème de seconde.

La vitesse de la lumière étant donnée par : $c = 299792458 \text{ [m/s]}$



On cherche à lier les unités à l'atome car, lorsque l'étalon est lié à l'atome, sa définition est vraie en tous points du globe.

Définition du kilogramme : le kilogramme exprime une notion de masse, il n'est pas rattaché à une unité atomique. Il est représenté par un étalon unique déposé au pavillon de Breteuil. Pour générer des étalons secondaires, on utilise des balances qui comparent 1kg à 1µg près.

Définition de l'Ampère : l'Ampère exprime une notion d'intensité de courant électrique. Sa définition est très théorique. Un Ampère c'est en fait le courant qui circulerait dans deux conducteurs rectilignes infiniment longs et séparés d'un mètre dans le vide et qui produirait une force de $2 \cdot 10^{-7} \text{ Nm}^{-1}$.

On fixe la permittivité du vide à : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$, exact par définition.

Définition du Kelvin : le Kelvin exprime une notion de température. Il est égal à 1/273,6 de la température thermodynamique de point triple de l'eau. Pour des raisons historiques on utilise le degré celsius.

Rappel : le point triple de l'eau est atteint lorsque l'eau est mise sous forme gazeuse, liquide et solide. Le point triple de l'eau est $0,01^\circ\text{C}$

$$T [^\circ\text{C}] = t[\text{k}] - 273,15$$

Définition du Candela : le Candela exprime une notion d'intensité lumineuse. C'est l'intensité lumineuse dans une direction donnée d'un rayonnement monochromatique de fréquence $N = 540 \cdot 10^{12}$ et dont l'intensité énergétique est : 1/683 watt par stéradian.

Définition de la mole : la mole exprime une notion de quantité de matière, contenant autant d'entités élémentaire qu'il y a d'atomes dans 12 grammes de carbone ^{12}C .

2.2-Unité de supplémentaires

L'angle plan : le radian (rad)

L'angle solide : le stéradian (sr).



Tableaux des unités du Système International (S.I)

Grandeur	Nom	Symbole
Longueur.....	Mètre.....	m
Masse.....	Kilogramme.....	kg
Temps.....	Seconde.....	s
Intensité de courant électrique....	Ampère.....	A
Température thermodynamique..	Kelvin	K
Intensité lumineuse.....	Candela.....	Cd
Quantité de matière	Mole.....	mol

unités SI dérivées ayant des noms spéciaux

Grandeur	Nom	Symbole	Expression en d'autres unités SI	Expression en unités SI de base
Fréquence.....	Hertz	Hz		s^{-1}
Force.....	Newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Pression.....	Pascal	Pa	N/m ²	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Energie, travail, quantité de chaleur.....	Joule	J	N . m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Puissance, flux énergétique.....	Watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Quantité d'électricité, charge électrique.....	Coulomb	C	A . s	s . A
Tension électrique, potentiel électrique.....	Volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Capacité électrique.....	Farad	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Résistance électrique.....	Ohm	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Conductance.....	Siemens	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Flux d'induction magnétique.....	Weber	Wb	V . s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Induction magnétique.....	Tesla	T	Wb/ m ²	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Inductance.....	Henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Flux lumineux.....	Lumen	Lm		cd . sr
Eclairement lumineux....	lux	lx		$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$

unités SI supplémentaires

Grandeur	Nom	Symbole
L'angle plan.....	Radian	Rad
L'angle solide.....	Stéradian	sr

Préfixes SI

Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	Préfixe	Symbole
10^{18}	Exa	E	10^{-1}	Déci	d
10^{15}	Peta	P	10^{-2}	Centi	c
10^{12}	Téra	T	10^{-3}	Milli	m
10^9	Giga	G	10^{-6}	Micro	μ
10^6	Méga	M	10^{-9}	Nano	n
10^3	Kilo	k	10^{-12}	Pico	p
10^2	Hecto	H	10^{-15}	Femto	f
10^1	déca	da	10^{-17}	atto	a

Unités en usage avec le système international

nom	symbole	Valeur en unité SI
Minute.....	min	1 min = 60 s
Heure.....	h	1 h = 60 min = 3600 s
Jour.....	d	1 d = 24 h = 86400 s
Degré.....	°	1° = $(\pi/180)$ rad
Minute.....	'	1' = $(1/60)^\circ = (\pi/10800)$ rad
Seconde.....	"	1" = $(1/60)' = (\pi/648000)$ rad
Litre.....	l	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
Tonne.....	t	1 t = 10 ³ kg = 1 Mg



Exemples unités SI dérivées

Grandeur	Nom	Symbole	Expression en unités SI de base
Mécanique			
Superficie.....	Mètre carré	m^2	
Volume.....	Mètre cube	m^3	
Vitesse.....	Mètre par seconde	m/s	
Vitesse angulaire.....	Radian par seconde	rad/s	
Accélération.....	Mètre par seconde carré	m/s^2	
Accélération angulaire....	Radian par seconde carré	rad/s^2	
Masse volumique.....	Kilogramme par m^3	kg/m^3	
Moment d'une force.....	Mètre Newton	$N.m$	$m^2.kg.s^{-2}$
Electricité			
Densité de courant.....	Ampère par mètre carré	A/m^2	
Champ magnétique.....	Ampère par mètre	A/m	
Champ électrique.....	Volt par mètre	V/m	$m.kg.s^{-3}.A^{-1}$
Charge volumique.....	coulomb par mètre cube	C/m^3	$m^{-3}.s.A$
Permittivité.....	farad par mètre	F/m	$m^{-3}.kg^{-1}.s^4.A^2$
Perméabilité.....	henry par mètre	H/m	$m.kg.s^{-2}.A^{-1}$
Thermodynamique, Chimie			
Volume molaire.....	mètre cube par mole	m^3/mol	
Masse molaire.....	kilogramme par mole	kg/mol	
Concentration molaire.....	mole par mètre cube	mol/m^3	
Capacité thermique, entropie.....	joule par kelvin	J/k	$m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}$
Chaleur massique, entropie massique.....	joule par kilo kelvin	$J/(kg.k)$	$m^2.s^{-2}.K^{-1}$
Energie massique.....	joule par kilogramme	J/kg	$m^2.s^{-2}$
Conductivité thermique....	watt par mètre kelvin	$W/(m.k)$	$m.kg.s^{-3}.K^{-1}$
Energie volumique.....	joule par mètre cube	J/m^3	$m^{-1}.kg.s^{-2}$
Radiométrie, Photométrie			
Luminance.....	candela par mètre carré	Cd/m^2	
Intensité énergétique.....	watt par stéradian	W/sr	$m^2.kg.s^{-3}.sr^{-1}$
Luminance énergétique....	watt par m^2 stéradian	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	$kg.s^{-3}.sr^{-1}$
Eclairement énergétique...	watt par m^2	W/m^2	$kg.s^{-3}$

III. Le procédé de mesure

3.1- principe

Les états physiques ne sont pas directement accessibles à la mesure. On utilise parfois des effets secondaires :

- échauffement d'une résistance
- l'effet magnétique dans le cas du galvanomètre

La mesure peut également être fonction de l'état d'équilibre d'un corps. Cas d'une mesure statique ou du cas de paramètres qui évoluent dans le temps, ce sont les mesures dynamiques.

3.2- Qualificatifs

Un appareil de mesure est un système qui fait correspondre d'une manière univoque, un phénomène physique à un état physique que l'on sait observer.

Le marché des appareils de mesures est très ouvert. Il faut, en fonction de la mesure à faire choisir l'appareil adéquat. Les qualités qui permettent de classer les appareils entre eux sont :

- La fidélité : un appareil est fidèle lorsque ses indications ne dépendent que de la grandeur à mesurer. Grandeur d'influence : vibration, écart de température...
- La justesse : c'est la capacité d'un appareil à fournir la valeur vraie, même si l'on ne sait pas si c'est la bonne. Un appareil est d'autant plus juste qu'il se rapproche de la valeur vraie.
- La rapidité : l'aptitude qu'a un appareil à suivre des phénomènes physiques (bande passante)
- La linéarité : c'est la capacité d'un appareil à suivre une réponse uniforme. C-à-d. que les données d'entrée et de sortie sont liées par une fonction linéaire $y = ax + b$.

3.3- Les erreurs

Un phénomène physique est caractérisé par sa valeur vraie. C'est cette valeur que l'on souhaite approcher lorsque l'on effectue une mesure.

Si on mesure n fois une grandeur (dans les mêmes conditions), on obtient n résultats. Il y a dispersion des résultats de mesure.

Si on note G la valeur vraie du phénomène observé, le résultat de la i ème mesure sera noté : G_i . Le résultat de cette i ème mesure peut être mis sous la forme :

$$G_i = G + \Delta G$$

Où ΔG est l'erreur absolue, appelée aussi erreur de mesurage.

On appelle $\Delta G/G$ l'erreur relative.

Cette erreur absolue peut être également décomposée de la façon suivante :

$\Delta G = \varepsilon + c$, où c est la partie aléatoire de l'erreur, et ε la partie systématique de l'erreur. Donc

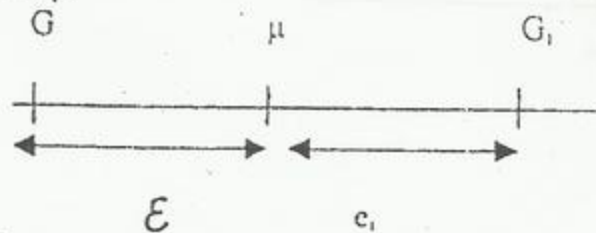
$$G_i = G + \varepsilon + e_i$$

On considère que la moyenne des e_i est nulle.

On notera μ l'espérance mathématique de la mesure, c-à-d. la moyenne d'un très grand nombre de mesures faites dans les mêmes conditions.

3.3.1- Les erreurs aléatoires

La valeur absolue des erreurs aléatoires varie de façon imprévisible. Elle est responsable de la dispersion autour de μ .



On distingue également :

La répétabilité : c'est l'étroitesse de l'accord entre des résultats successifs.

Si on réunit les conditions suivantes :

- même méthode
- même instrument
- même lieu
- même opérateur
- mêmes conditions ambiantes
- faible écart de temps



Plus les résultats sont proches, meilleure est la répétabilité.

La reproductibilité : étroitesse des résultats en faisant varier les paramètres précédents.

3.3.2- Les erreurs systématiques

En général μ et G sont différents, car il y a des erreurs systématiques.

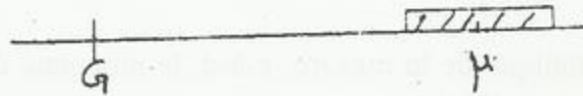
Ce sont des erreurs faites lors de plusieurs mesures effectuées dans les mêmes conditions. Elles restent constantes en valeur et en signes où elles varient selon une loi que l'on connaît quand les conditions extérieures varient.

$\varepsilon = G - \mu$; est en fait le biais qui caractérise la justesse du procédé.

La justesse est l'étroitesse de l'accord entre la valeur vraie de la grandeur physique invariable et la valeur qui serait obtenue en prenant la moyenne des résultats d'un très grand nombre de mesures.

- Incertitude d'un résultat de mesure

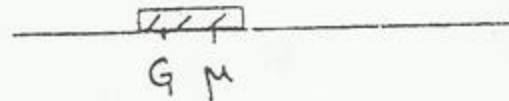
Un procédé fidèle mais sans justesse.



Un procédé juste mais pas fidèle.



Un procédé juste et fidèle.



- Les origines

- Les instruments de mesure

- étalonnage
- finesse
- linéarité
- inadapté à la mesure



- Le principe et la méthode

- Erreur due à la grandeur elle-même (mesure de température avec un pyromètre)

- Erreur due à l'environnement

- Erreur due à l'observateur

- Transcription du résultat
- Décodage
- Arrondi
- Quantification

- Mise en évidence

Il faut procéder à une analyse physique de l'expérience propre à chaque mesure.

- mesure d'une grandeur connue
- mesure de la grandeur avec un autre instrument
- mesure de la même grandeur par une autre méthode

Exemple : estimation d'un volume :

- mesure des cotes
- poussée d'archimède

Les deux méthodes sont différentes, on peut mesurer un biais.

- mesure en faisant varier les conditions opératoires
- comparaison entre laboratoires

Les appareils

Objectif

Certains éléments physiques fournissent l'énergie nécessaire à leur mesure, d'autres non. Dans ce chapitre, nous allons découvrir les principaux appareils rencontrés dans un laboratoire.

Ce chapitre n'a pas la prétention de vous informer sur tous les appareils existants, mais plutôt présenter les principes de base des appareils.

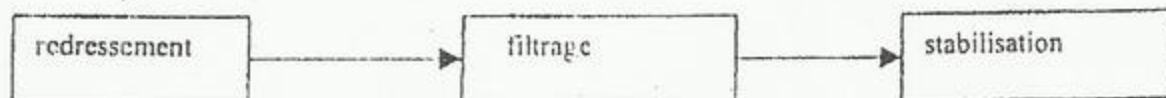
1. Les alimentations stabilisées

1.1 Généralités

Il faut souvent disposer d'une source d'énergie indépendante pour alimenter les montages. Ce type d'appareil aura pour rôle de fournir une ou plusieurs tensions continues fixes ou variables.

2.2 Principe de fonctionnement

Le réseau de la RAD, 220 volts, 50 Hertz, est la source de la tension la plus répandue et la plus accessible, que ce soit dans un laboratoire ou dans l'industrie. C'est donc ce type de tension qu'il faut traiter pour obtenir une tension continue stabilisée. On aura donc le synoptique suivant:



- le redressement

- Il peut être de deux types: mono alternance, ou double alternance. Si l'on veut éviter un taux d'ondulation trop élevé, on privilégiera l'emploi d'un redresseur double alternance car il permet:
 - de diviser par deux l'intensité instantanée à supporter par le redresseur
 - de doubler la fréquence d'ondulation, facilitant ainsi le filtrage
 - d'augmenter la tension continue.

Les différents schémas :

- les transformateurs à point milieu
- Le pont de Graëtz
- L'alimentation symétrique



- Correction des erreurs systématiques

Soit x' la valeur vraie de mesure et x la valeur corrigée, la correction suit la loi suivante :

$$C = x - x'$$

La correction est en fait une estimation de l'erreur systématique.

On peut également établir un facteur de correction k tel que :

$$x = kx'$$

Cette correction doit, dans la mesure du possible, tenir compte de :

- la correction à appliquer à l'étalonnage
- l'influence des phénomènes extérieurs
- interpolation entre les points d'étalonnage

La méthode de substitution :

Elle consiste à utiliser dans des conditions identiques, la grandeur à déterminer en substituant à la grandeur initiale une autre grandeur, connue avec précision. On supprime ainsi, une grande part des erreurs systématiques.



- Le filtrage

Les filtres utilisés sont des filtres passe bas, ils doivent laisser passer le courant continu et arrêter les composantes alternatives dès le 50 Hz.

Il existe quatre schémas principaux:

- Le filtre LC
- Le filtre RC
- Les filtres en π , avec C en tête. Le condensateur en tête contribue à la diminution du taux d'ondulation.
- Les filtres en π , avec L en tête sont utilisés lorsque l'on veut assurer des débits importants.

- La stabilisation

La stabilisation du secteur peut être assurée par l'emploi de transformateur à fer-saturé (cas de puissance élevée), transformateur à ferro-résonance (diminue la variation du secteur), le régulateur (allie les deux fonctions précédentes et garantit une stabilisation de la tension de sortie à $\pm 1\%$, pour une variation de $\pm 15\%$ du secteur).

La stabilisation de la tension continue de sortie peut être assurée dans le principe par une Zener. Généralement on utilise une stabilisation par transistors montés en série ou en parallèle.

2. Générateurs de fonctions

Les alimentations stabilisées permettent de fournir une tension continue pour alimenter les montages. Lorsque l'on teste un montage, on regarde quelle est sa réponse lorsqu'on l'attaque avec différentes formes de tensions et à différentes fréquences.

Les différentes formes sont :

- signaux sinusoïdaux
- signaux rectangulaires
- signaux triangulaires

2.1- Principes

• Génération de signaux rectangulaire

Il existe plusieurs façons d'obtenir des signaux rectangulaires. Lorsque la puissance nécessaire est importante, on utilise des systèmes à découpages. Ce sont des thyristors ou des triacs qui découpent une source continue, donnant ainsi des signaux rectangulaires à rapports cycliques variables.

Le moyen le plus classique reste l'utilisation de multivibrateurs astables, bistables, monostables. Ce principe est basé sur l'exploitation d'une constante de temps $\tau = RC$. Cette constante de temps correspond au temps nécessaire pour décharger le condensateur dans un circuit résistif au $2/3$ de sa valeur initiale ou charger le circuit au $2/3$ de sa valeur finale.



• Génération de signaux en dents de scie

On obtient ces signaux par intégration d'un signal rectangulaire ou par un système relaxé. Ces signaux doivent avoir une bonne linéarité, une bonne stabilité en fréquence et une bonne stabilité en amplitude.

Pour obtenir une rampe à partir d'un signal rectangulaire on utilise le principe de l'intégrateur de Miller, dans le cas d'une intégration. On peut également utiliser des systèmes à thyristors ou UJT variant entre une valeur min et max dans le cas d'un système relaxé.

• Génération d'un signal sinusoïdal

On obtient un signal sinusoïdal de fréquence variable soit en partant d'un oscillateur, soit en partant d'un signal carré qu'on filtre de façon à éliminer certaines fréquences et ainsi obtenir un sinus de synthèse. On arrive à distinguer un sinus de synthèse d'un sinus obtenu avec un oscillateur lorsque l'on visualise le signal sur un oscilloscope. Dans le cas d'un sinus de synthèse le haut de l'arche est légèrement pointu.

En général ; ce type d'appareil est équipé d'un commutateur pour sélectionner le type de signal souhaité, d'un réglage de l'amplitude du signal, d'un vernier et un commutateur pour sélectionner et régler la fréquence, et d'une source de tension continue pour générer un offset que l'on superpose au signal pour régler sa valeur moyenne.

3. Les appareils à aiguille

3.1 Le galvanomètre

La mesure, c'est le fait de vouloir faire correspondre une valeur numérique à une situation physique. Pour mesurer ce phénomène physique, il faut utiliser un "transducteur" qui fasse correspondre à l'évolution du phénomène une information évoluant de façon connue et caractéristique. Ces évolutions peuvent être diverses, dilatation d'un corps soumis à une variation de température, modification de son élasticité,...

Lorsque le courant électrique passe dans un conducteur, deux phénomènes principaux se produisent:

- Le dégagement de chaleur
- La modification de son environnement magnétique

La notion de chaleur est difficilement interprétable par l'homme. Chacun en a une perception personnelle et ne peut pas être pris comme référentiel. Lorsque l'on souhaite constater de faibles puissances, l'interprétation devient impossible.

L'échauffement n'est donc pas un bon transducteur direct du courant électrique. Les appareils de mesure à thermo-couple utilisent l'incidence de l'effet joule. Ce sont généralement des appareils très précis qui nécessitent de grandes précautions d'emploi et qui supportent mal les surcharges même brèves.

SMIA 2

Dans certaines conditions, le courant a une influence direct sur l'environnement électromagnétique. On peut donc imaginer qu'un système puisse réagir aux faibles variations d'un courant auquel il est soumis.

Ces appareils appartiennent à la famille des appareils magnéto-électriques. Le principe de base de ces appareils se retrouve dans le galvanomètre également appelés appareils à cadres mobiles

Un système à cadre mobile est en fait un système axial. L'ensemble mobile est placé dans un champ magnétique créé par deux aimants. L'action des lignes de forces sur le cadre mobile est modifiée lors du passage du courant, de fait la position de l'aiguille est modifiée.

Pour une faible variation du courant on obtient une déviation totale de l'aiguille. Le galvanomètre est donc un appareil très sensible. Il est très utilisé dans les systèmes de pont où l'équilibre entre les branches est recherché.

3.2 L'ampèremètre

Dès lors que l'utilisation du galvanomètre est admise pour mesurer des courants de faible amplitude, il faut que ce système soit utilisable quelque soit le courant circulant dans le circuit, tout en conservant la même sensibilité.

L'ampèremètre est un galvanomètre shunté* par des résistances convenablement choisies, très faibles par rapport aux résistances interne et critique du galvanomètre.

Les shunts étant calibrés et commutables pas par pas, cela signifie que, soit la valeur intrinsèque du calibre, soit sa valeur associée, c.-à-d. celle obtenue par regroupement de shunts de base, est variable selon la position du commutateur.

Le choix des calibres est fait de façon à avoir un recouvrement des gammes.



3.3 Le voltmètre

Il est évident que le galvanomètre peut mesurer des tensions. En effet, au lieu de graduer le galvanomètre en ampère, il suffit de le graduer en volts en utilisant la loi d'ohm : $U = RI$

Si R , résistance du cadre mobile, est de $2 \text{ k}\Omega$, et si I le courant maximal admissible dans le galva est de $100 \mu\text{A}$, la déviation pleine échelle sera :

$$210^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,2 \text{ V pleine déviation.}$$

Pour mesurer des tensions plus élevées, il suffit de monter en série avec le galvanomètre des résistances pour faire chuter la tension de la valeur excédentaire.

Comme pour l'ampèremètre, l'association de plusieurs shunts permet la réalisation de calibres.

Il est important de noter que la meilleure précision de lecture est obtenue lorsque la déviation du cadran mobile place l'aiguille, dans le 3^{ème} tiers du cadran. Dans cette position, le rapport entre le nombre de divisions lues et le nombre de divisions pleine échelle est le meilleur. Il faudra donc ajuster le choix du calibre pour être dans cette situation.

3.4 L'Ohmmètre

L'ohmmètre est un appareil destiné à mesurer un circuit résistif. Pour le réaliser on utilise les caractéristiques du voltmètre de tension continue. L'ohmmètre dispose d'une tension continue stable. On va insérer en série avec le galvanomètre et ses calibres, le circuit à mesurer. Comme avant de faire la manipulation on a étalonné l'ohmmètre, l'insertion d'une résistance dans le circuit de mesure modifiera la position de l'aiguille, on fait une lecture directe de la résistance.

En fait lorsqu'on calibre, on règle un potentiomètre de façon à avoir aux bornes du galvanomètre $V = 0,2 \text{ V}$ indispensable à la déviation maximale de l'aiguille. Lorsque l'on introduit une résistance dans le circuit, la tension aux bornes du galvanomètre chute, l'aiguille dévie jusqu'à indiquer la valeur de la résistance mesurée, image du courant traversant le circuit.

3.5- Le contrôleur universel

Le contrôleur universel regroupe les fonctions du voltmètre, de l'ampèremètre et de l'ohmmètre dans un même boîtier.

4. Les multimètres numériques

Généralités

Les multimètres numériques sont des appareils qui affichent directement la valeur mesurée sur un afficheur. Selon la précision de l'appareil, il y a plus ou moins de digits significatifs. Ce type d'appareil est basé sur deux principes.

Principes de base

- Le principe de compensation : on compare la tension à mesurer à une tension constituée pas à pas. L'opération s'arrête dès que le niveau de la tension à mesurer est identique au niveau de la tension de référence. Le nombre de pas définit la tension mesurée.
- Le principe de conversion : la tension est convertie en train d'impulsion dont la fréquence est proportionnelle à l'amplitude de la tension à mesurer. On mesure ensuite cette fréquence à l'aide d'un compteur.

5. les oscilloscopes

5.1 Les oscilloscopes analogiques

- Généralités

Les phénomènes physiques sont transformables en grandeurs électriques grâce aux capteurs, rendant ainsi accessible la quantification de phénomènes comme la température, l'énergie



La synchronisation

La synchronisation permet d'obtenir sur l'écran une courbe stable, image d'un signal périodique. On obtient une courbe stable lorsqu'à chaque balayage le spot décrit exactement la même trajectoire.

Pour obtenir une courbe stable, le balayage de l'écran doit toujours démarrer au même point de la courbe.

Pour éviter ce type de problème, il existe deux modes de déclenchement. Le mode AUTO, la trace démarrera quelque soit la position du signal, et le mode DECLENCHE, la trace démarrera toujours au même moment.

Il existe deux mode de fonctionnement AC et DC, dans le premier cas on élimine la composante continue de façon à visualiser un signal sans offset, dans l'autre cas on maintient la composante continue, on observe ainsi la totalité du signal.

Mise en œuvre d'un oscilloscope



1. mise sous tension
2. attendre que la trace apparaisse
 - si elle apparaît: régler sa netteté et sa brillance
 - si elle n'apparaît pas: se mettre en mode AUTO, agir sur la netteté et sur la brillance. Si elle n'apparaît pas toujours, agir sur le potentiomètre de position verticale de la trace.
3. Régler la position zéro verticale de la trace
4. choisir le mode de fonctionnement AC ou DC
5. si la courbe est instable, modifier le mode de déclenchement
6. régler la base de temps pour obtenir deux à trois périodes à l'écran
7. revenir sur les réglages précédents pour affiner la visualisation de la courbe

5. 2 Les oscilloscopes numériques

La base d'un appareil à échantillonnage c'est de prélever des informations du phénomène physique observé. Dans le cas d'un oscilloscope numérique, il faudra reconstituer sur un écran une image continue du signal prélevé. Le gros avantage de procéder ainsi c'est que cet ensemble d'informations numérisées peut être stocké, traité et l'image du phénomène reconstitué et maintenue à l'écran alors que l'événement caractéristique a disparu.

L'échantillonnage d'un signal, c-à-d. le fait de prélever à intervalles réguliers ou non des informations sur le signal, ne peut pas se faire n'importe comment. Le théorème de Shanon précise les conditions d'échantillonnage.

Le domaine d'application de ce type d'appareil est l'étude de phénomènes rapides, uniques, ou à faible fréquence de répétition, là où les oscilloscopes classiques ne peuvent être utilisés car ils ne conviennent que pour les phénomènes répétitifs, et/ou les enregistreurs mécaniques sont à exclure à cause de leur inertie.

lumineuse, vitesse et vibrations... Si on souhaite observer les évolutions dans le temps de ces phénomènes, le contrôleur universel ne suffit plus.

Reste alors les enregistrements à bande. Ils sont réservés aux phénomènes lents car leur inertie les empêche de représenter fidèlement sur papier l'évolution rapide et périodique des paramètres à mesurer. Un appareil manque à la panoplie du technicien : l'oscilloscope. Il permet d'analyser les phénomènes électriques (forme, fréquences...) mais aussi de les mesurer avec précision.

- Fonction

L'oscilloscope permet de visualiser dans un espace à deux dimensions les grandeurs électriques.

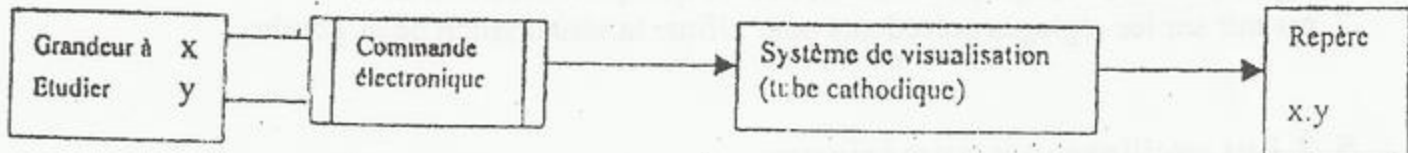
On peut visualiser une fonction U_1 en fonction d'une autre U_2 : $U_1 = f(U_2)$ ou visualiser l'évolution de ces grandeurs en fonction du temps.

Les axes de l'oscilloscope sont calibrés, ils permettent des mesures quantitatives. Ils possèdent outre différents calibres, ce qui permet de s'intéresser plus particulièrement à certains détails en dilatant l'échelle.



- organisation générale

Synoptique



Commande électrique : elle adapte les grandeurs d'entrée au système de déviation des axes X et Y du tube cathodique. Elle gère également la base de temps, qui permet de visualiser une grandeur en fonction du temps.

Commande de visualisation : c'est un tube cathodique, il comporte un canon à électrons émettant un rayon d'électrons venant frapper un écran enduit d'une matière fluorescente. Le rayon peut être envoyé dans les deux axes.

Les deux entrées verticale et horizontale sont constituées d'une atténuation réglable et d'un amplificateur.

La base de temps comprend un générateur de rampe de tension et un système de synchronisation (ou déclenchement).

Un générateur de rampe de tension permet d'appliquer une tension sur les plaques verticales pour obtenir une déviation du spot de gauche à droite.

Une tension continue variable, appliquée sur les plaques horizontales permet d'assurer la position sur l'axe vertical.

6. Les fréquencemètres

6.1 Les oscilloscopes

Lorsque l'on souhaite avoir une idée approximative de la valeur d'une fréquence, on peut utiliser un oscilloscope. Il suffit pour cela:

- de visualiser le signal sur l'écran
- de relever la base de temps employée
- de compter le nombre de divisions de l'axe horizontal pour une période du signal analysé.
- De faire la multiplication pour trouver T

On détermine la fréquence par la loi: $f = 1/T$

6.2 Le fréquencemètre numérique

Le fréquencemètre numérique est basé sur le comptage d'événements. Il existe deux grands principes: ouverture d'une porte, comptage d'impulsions, détermination de la fréquence en fonction de la situation du signal

L'autre moyen est de se baser sur le signal. Pendant une période ou une demi-période, on compte le nombre d'impulsions. Comme on connaît la base de temps employée pour générer les impulsions on sait déterminer la fréquence du signal.

En fait, le fréquencemètre est généralement multi-fonctions. On trouve généralement disponibles les fonctions suivantes:

- mesure de fréquences
- compteur d'impulsions
- mesure d'intervalles
- mesure de largeur d'impulsion
- mesure de phase entre deux signaux



Notions d'erreurs

Généralités

La lecture faite sur un appareil de mesure ne représente que de façon approximative la vraie valeur de l'élément mesuré.

Les écarts sont dus à :

- La consommation des appareils
- L'imperfection des appareils
- L'observateur

On distingue donc :

- Les erreurs systématiques
- Les erreurs instrumentales
- Les erreurs de lecture

On exprime l'erreur, quelque soit son origine par deux termes :

- Erreur absolue : ΔG
- Erreur relative : $\Delta G/G$

L'erreur relative s'exprime en %.

Lorsque l'on corrige le résultat de mesure, l'erreur n'est plus à prendre en compte.

Erreur instrumentale

1) Erreur absolue

La classe d'un appareil est issue de l'erreur instrumentale. L'erreur absolue d'un appareil de classe 0,2 dont le calibre comporte 150 divisions s'exprime de la façon suivante :

$$\epsilon = (0,2 / 100) \cdot 150 = 0,3$$

2) Erreur relative

Si on exprime l'erreur relative, on va rapporter la classe de l'appareil à la lecture faite.

L'erreur absolue est constante, mais pas l'erreur relative. Si on fait une lecture au tiers de l'échelle, soit 50 divisions :

$$\epsilon_r = 0,3 / 50 = \text{Erreur absolue} / \text{lecture faite}$$

En fait lorsque l'on fait des lectures en début d'échelle, l'erreur est plus importante qu'en fin d'échelle. Une lecture faite dans les 2/3 de l'échelle est une mesure dont l'erreur instrumentale relative est acceptable. On a donc intérêt à avoir des appareils avec plusieurs calibres dont les gammes sont bien réparties.

Exemple : lorsque l'on est sur le calibre 100 d'un voltmètre à aiguille, si son aiguille se situe dans le premier tiers, on aura intérêt à changer de calibre et prendre le calibre 30.



Erreur de lecture

L'erreur de lecture est généralement effectuée sur des appareils à aiguille (ou gradués). Les appareils numériques donnant une indication directe. (Il subsiste tout de même avec ce type d'appareil l'erreur sur ces derniers digits significatifs).

L'erreur de lecture commise sur les appareils à aiguille est généralement due à :

- l'acuité visuelle de l'observateur
- la qualité de la graduation

Les constructeurs s'arrangent pour que dans des conditions normales d'emploi, l'erreur de lecture soit petite devant l'erreur instrumentale. Une des techniques employées consiste à mettre un miroir sur le cadran de façon à minimiser l'erreur de parallaxe.

L'erreur absolue de lecture sur un instrument gradué est généralement la moitié de la plus petite graduation.

Exemple: pour une règle graduée en cm, dont la plus petite division est 1 mm ; $\Delta l = 0,5 \text{ mm}$

Calcul d'erreur

Si on a une seule grandeur à mesurer, on somme les différentes erreurs exposées ci dessus.

$$\Delta U = \Delta U(\text{systematique}) + \Delta U(\text{instrumentale}) + \Delta U(\text{lecture})$$

$$\Delta U / U = \Delta U / U(\text{systematique}) + \Delta U / U(\text{instrumentale}) + \Delta U / U(\text{lecture})$$

Lorsque la grandeur U dépend de plusieurs variables mesurées, on est amené à effectuer des calculs pour déterminer sa valeur. Dans ce cas, il faut calculer la répercussion des erreurs commises sur chacun des facteurs de la grandeur recherchée.

Pour établir la relation qui relie ces éléments, on fait appel au calcul différentiel.

Exemples de calcul d'incertitude

Souvent la grandeur physique G est fonction de plusieurs variables :

$G = f(A, B, C)$ où A, B, C sont des grandeurs physiques mesurées ou données, que nous savons évaluer.

Pour calculer l'incertitude absolue de G , cherchons d'abord la différentielle totale et exacte dG :

$$dG = (\partial f / \partial A) \cdot dA + (\partial f / \partial B) \cdot dB + (\partial f / \partial C) \cdot dC$$

où $\partial f / \partial A$ est la dérivée partielle de $f(A, B, C)$ par rapport à A ...

L'incertitude absolue de G est :

$$\Delta G = |\partial f / \partial A| \Delta A + |\partial f / \partial B| \Delta B + |\partial f / \partial C| \Delta C$$



Exemple : $R = V/I = f(V, I)$

$$dR = (\partial f / \partial V) \cdot dV + (\partial f / \partial I) \cdot dI = (dV \cdot V \cdot dI) / I^2$$

$$= dV/I - (V/I^2) dI$$

$$\Delta R = 1/I \Delta V + (V/I^2) \Delta I$$

$$\Delta R/R = \Delta V/V + \Delta I/I$$

Cas particuliers

- f sous forme d'une somme ou d'une différence :

$$G = f(X, Y, Z) = aX + bY + cZ$$

$$dG = a \cdot dX + b \cdot dY + c \cdot dZ$$

$$\Delta G = a \cdot \Delta X + b \cdot \Delta Y + c \cdot \Delta Z$$

a, b, c sont des constantes positives pour simplifier, si non prendre la valeur absolue.

- f sous forme d'un produit ou d'un rapport

$$G = a \cdot X^b \cdot Y^c$$

Pour faciliter les calculs, on applique d'abord le logarithme à cette fonction :

$$\log(G) = \log(a) + b \cdot \log(X) + c \cdot \log(Y)$$

$$d(\log(G)) = dG/G = b \cdot dX/X + c \cdot dY/Y$$

$$\Delta G/G = b \cdot \Delta X/X + c \cdot \Delta Y/Y$$

Expression du résultat

Les calculs numériques sont effectués avec un nombre de chiffres (après la virgule) suffisant pour éviter les erreurs d'arrondi. Il ne faut garder que deux chiffres significatifs.

Exemple : $G = 1,2534$ et $\Delta G = 0,0785$

On peut se contenter de $G = 1,25$ et $\Delta G = 0,08$

On a alors $G = (1,25 \pm 0,08)$ [unité]

Ou encore $G = (125 \pm 8) \cdot 10^{-2}$ [unité]

Un zéro peut être significatif :

Exemple : $G = (151,0 \pm 0,3)$

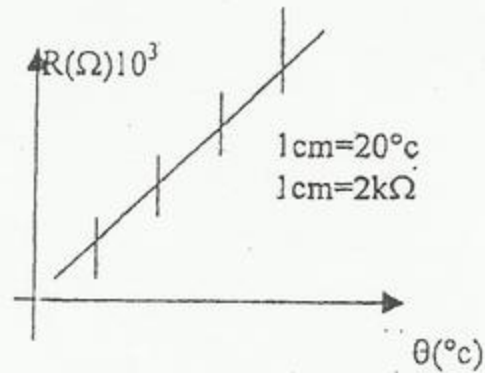
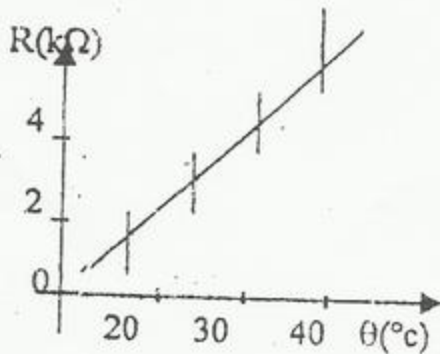
Il serait incorrect d'écrire : $G = (151 \pm 0,3)$



- Il faut porter tous les renseignements utiles sur le graphe:
 - Grandeurs, unités et graduations sur les axes
 - Objet de la mesure et éventuellement paramètres expérimentaux ou numéro du graphe.
 - Votre nom si la feuille est volante.

Grandeurs représentées, unités et graduations

Celles-ci peuvent être indiquées de différentes façons, comme l'illustre l'exemple suivant de la variation d'une résistance R avec la température θ .



Il est souvent utile d'indiquer sur un carreau à part l'échelle, c'est-à-dire ce que représente 1 cm en abscisse et en ordonnée. Ceci aide à tracer les points et, ultérieurement, à exploiter le graphe (interpolations, calcul de pente, etc ...)

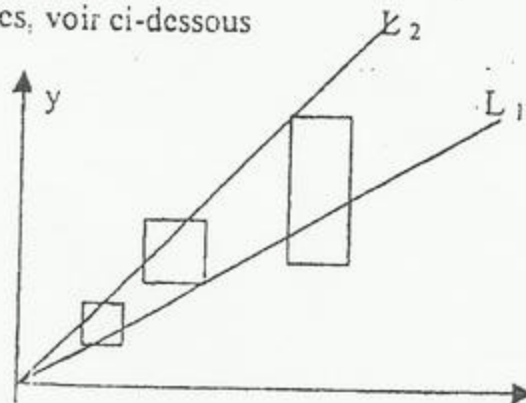
INCERTITUDES

1^{er} cas: L'incertitude porte sur l'une des grandeurs seulement, R dans l'exemple précédent, l'autre grandeur, θ , étant déterminée assez précisément: $\Delta\theta = 0$. L'incertitude est alors représentée par un segment vertical de longueur $2\Delta R$ appelé barre d'erreur.

2^{ème} cas: L'incertitude porte sur les deux grandeurs, θ et R dans l'exemple. On peut:

- soit prolonger les deux branches de la croix;
- soit construire un rectangle d'incertitude, de côtés $2\Delta x$ et $2\Delta y$

Le graphe doit traverser tous les rectangles d'incertitudes, voir ci-dessous



Cas d'une fonction linéaire : figure 5

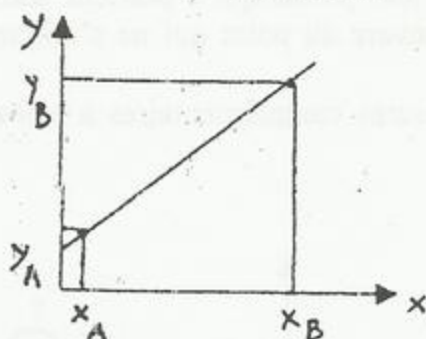
Un cas particulier important est celui où l'on sait d'avance que le graphe est une droite. L'ensemble des droites possibles occupe alors une zone d'incertitude délimitée par deux lignes brisées L_1 et L_2 . Pour construire cette zone, on peut se représenter les rectangles d'incertitudes (ou les barres d'erreur) comme des anneaux et le graphe comme une baguette qui doit traverser tous les anneaux. On remarquera que la zone d'incertitude ne recouvre pas entièrement tous les rectangles d'incertitudes : l'incertitude sur certains points expérimentaux est donc réduite.

Rappel sur le calcul de la pente d'une droite

Nous choisirons deux points A et B sur la droite $y = T(x)$, on calculera la pente de cette droite à partir de la relation :

$$P = (y_B - y_A) / (x_B - x_A)$$

L'équation de la droite est : $y = y_A + p(x - x_A)$



On choisira les deux points A et B sur la droite jusqu'aux bords de la feuille. Il est commode, pour avoir une bonne précision, de prendre pour $(x_B - x_A)$ un nombre entier.

Ce calcul concerne aussi bien la droite moyenne que les droites extrêmes (L_1 et L_2). Dans tous les cas, A et B doivent être des points de la droite tracée et non des points expérimentaux pris du tableau de mesures.

Si $P_{\max}$ et $P_{\min}$ sont les pentes des droites extrêmes, L_1 et L_2 , l'expression finale de la pente sera

$$p \pm \Delta p$$

avec

$$p = (P_{\max} + P_{\min}) / 2$$

et

$$\Delta p = (P_{\max} - P_{\min}) / 2$$

SMIA2

Par contre parfois il n'est pas significatif comme : $G = (31600 \pm 1100)$; on écrit plutôt : $G = (31,60 \pm 1,1) \cdot 10^2$

Remarque : On doit noter qu'une valeur numérique comporte explicitement ou non une indication sur sa précision.

Exemple : $R = 12,7\Omega$ signifie qu'il y a une incertitude absolue de $0,1\Omega$ sur R c-à-d d'une unité sur la dernière décimale.

TRACE DE GRAPHE

RECOMMANDATIONS GENERALES

Un graphe n'est pas seulement un mode de présentation des résultats, mais un moyen de détecter les mesures erronées en remarquant le ou les points qui s'écartent anormalement du graphe, comme sur la figure 1 ; il faut refaire la mesure du point qui ne s'aligne pas avec les autres.

C'est aussi un guide pour le choix des mesures complémentaires à effectuer quand le graphe n'a pas de forme simple. (fig. 2)

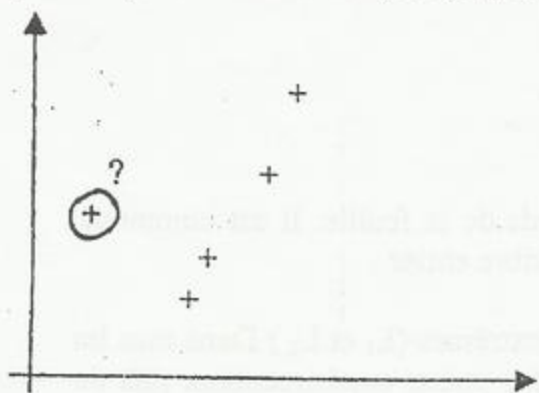


figure 1

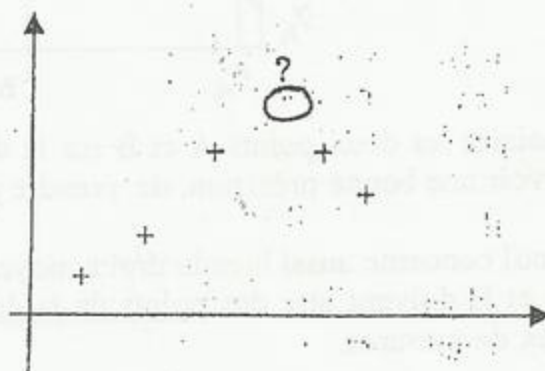


figure 2

- Il faut choisir les échelles (utiliser toute la feuille du papier millimétré ou semi-log) et les origines sur chaque axe de façon à bien placer le graphe sur la feuille de papier millimétré, comme le montre la figure 3.
- Il faut représenter les mesures expérimentales non pas par des points, trop peu visibles, difficiles à positionner et de forme souvent incertaine, mais par des croix de branches parallèles aux axes, de façon à bien faire apparaître l'abscisse et l'ordonnée.

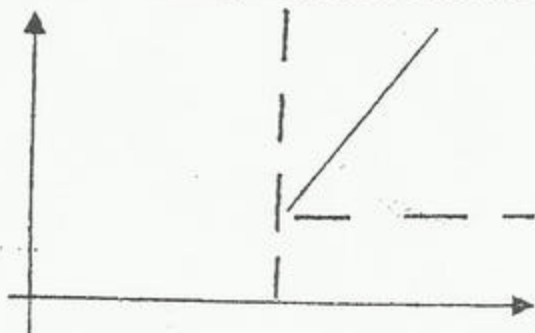


Figure 3

SMIA 2

B- Manipulation

1) Matériels utilisés

On dispose :

- d'un calorimètre muni d'un couvercle, d'un agitateur et d'un thermomètre.
- d'une balance de précision située au fond de la salle de T.P.
- d'un chronomètre.

2) Manipulation proprement dite

- Déterminer la masse de l'ensemble calorimétrique (calorimètre + agitateur + thermomètre) à vide par pesée à la balance.
- Remplir le vase calorimétrique d'une masse M d'eau du robinet (environ 400g).
- Déterminer précisément cette masse d'eau par pesée à la balance.
- Noter toutes les minutes et pendant 5 minutes la température de l'eau dans le calorimètre en agitant régulièrement. Cette température θ_i doit être sensiblement constante. Si elle variait avec le temps, attendre qu'elle se stabilise.
- Introduire la glace sèche à $^{\circ}\text{C}$ dans le calorimètre le plus rapidement possible et en une seule fois (une bonne poignée de glace). Refermer le calorimètre et agiter pendant toute la fusion, régulièrement et doucement. Relever la température toutes les 15 secondes pendant la fusion puis toutes les 30 secondes après la fusion, ceci pendant 2 minutes.
- Une fois le relevé des températures terminé, peser l'ensemble calorimétrique à la balance et par différence avec la dernière pesée, en déduire la masse M' de glace qui a été introduite.

3) Calculs et résultats

Présenter le relevé de température dans un tableau et tracer la courbe $\theta(^{\circ}\text{C}) = f(\text{temps en minute})$. Faire apparaître clairement sur ce graphe les températures θ_i et θ_f .

Calculer L sachant que pour le calorimètre utilisé, $\mu = (34 \pm 3)\text{g}$.

D'après le matériel utilisé, donner les incertitudes absolues sur : M , θ_i , θ_f . Calculer ΔL en négligeant ΔC .

On aura soin de donner toutes les justifications utiles.



CALORIMETRIE 1

Mesure de la chaleur latente de fusion de la glace

La calorimétrie est la mesure des quantités de chaleur.

Le but de cette manipulation est de déterminer, la chaleur latente de fusion de la glace.

A Théorie

1) Définitions

La chaleur latente de changement d'état est la chaleur dégagée ou absorbée à température constante, au cours d'un changement d'état.

La chaleur latente de fusion de la glace est donc la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 gramme de glace prise à 0°C pour la transformer en 1 gramme d'eau à la même température.

2) Equation calorimétrique

La méthode utilisée est la méthode des mélanges :

Le corps à étudier (ici, la glace) de masse M' est pris à une température connue (ici, 0°C) et est plongé dans une masse M d'eau contenue dans un calorimètre et dont la température initiale est θ_i . La température de l'ensemble s'abaisse alors jusqu'à une valeur θ_f qui est obtenue lorsque toute la glace est fondue. Si l'on néglige les fuites thermiques qui existent entre le calorimètre et le milieu ambiant, on peut écrire que la quantité de chaleur absorbée par la glace pour passer de l'état solide à l'état liquide et pour élever sa température de 0°C à θ_f est égale à la quantité de chaleur cédée par l'eau et le calorimètre quand la température s'abaisse de θ_i à θ_f .

D'où l'équation calorimétrique :

$$M'L + M'C(\theta_f - 0) = (M + \mu) c(\theta_i - \theta_f)$$

avec :

L : chaleur latente massique de fusion de la glace

M : masse d'eau contenue dans le calorimètre.

M' : masse de glace introduite dans le calorimètre

μ : équivalent en eau de l'ensemble calorimétrique (calorimètre + agitateur + thermomètre) ; c'est la quantité d'eau correspondant à l'élévation de 1° de la température de l'ensemble calorimétrique.

C : chaleur spécifique de l'eau, ou quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température de 1 gramme d'eau. $C = 1 \text{ cal/gC}^\circ$.

$\theta_{i,f}$: température initiale et finale de l'eau.

A partir de l'équation précédente, préciser à quoi correspond chacun des termes : $M'L$; $M'C(\theta_f - 0)$; $(M + \mu)C(\theta_i - \theta_f)$.

L'expression de L est :
$$L = \frac{(M + \mu)C(\theta_i - \theta_f)}{M'} - C\theta_f$$

Quelle est l'unité de L ?

Donner l'expression littérale de ΔL .

Calorimétrie 1: Mesure de L

	Date
	Section
	Groupe
	Note

1) Quel est le but de la manipulation ?

Le but de la manipulation est de déterminer la chaleur latente de fusion de la glace.

2) Donner l'unité de L :

Donc : $L = \frac{(M+\mu)C(\theta_i - \theta_f) - C\theta_f}{M}$ alors : $[L] = \frac{([g] + [g])(\frac{[cal]}{[g][K]})([K]) - (\frac{[cal]}{[g][K]})([K])}{[g]}$

Donc : $[L] = \frac{2[g][cal]}{[g][g]} - \frac{[cal]}{[g]} = \frac{[cal]}{[g]}$, alors l'unité de L est : cal/g

3) Donner l'équation calorimétrique du mélange :

L'équation calorimétrique du mélange est : $M'L + M'C(\theta_f - 0) = (M+\mu)C(\theta_i - \theta_f)$

4) Définir les termes suivants :

> M'L :

Quantité de la chaleur absorbée par M' glace pour passer de l'état solide à l'état liquide.

> M'C(θ_f - 0) :

Quantité de chaleur absorbée par le liquide pour passer de 0°C à θ_f.

> (M+μ)C(θ_i - θ_f) :

Quantité de chaleur fournie par le calorimètre de la masse M d'eau.

5) Etablir l'expression littérale de ΔL ?

$$\Delta L = \left| \frac{C(\theta_i - \theta_f)}{M'} \right| \Delta M + \left| \frac{C(\theta_i - \theta_f)}{M'} \right| \Delta \mu + \left| \frac{(M+\mu)(\theta_i - \theta_f) - \theta_f}{M'} \right| \Delta C + \left| \frac{C(M+\mu)}{M'} \right| \Delta \theta_i + \left| \frac{-C(M+\mu)}{M'} - C \right| \Delta \theta_f + \left| \frac{-(M+\mu)C(\theta_i - \theta_f)}{(M')^2} \right| \Delta M'$$

6) Sachant que les grandeurs physiques intervenant dans la mesure de L sont :

M = 435 g; M' = 60 g; θ_i = 15°C; θ_f = 6°C; C = 1 cal/g.°C; ΔC = 0; ΔM = 0,1g; ΔM' = 0,2g; Δθ = 0,1°C, calculer l'incertitude absolue sur L puis donner la précision sur L en % ?
Conclure.

B- MANIPULATION :

Les deux corps à étudier sont l'eau du robinet et la glace sèche.

- Peser le calorimètre avec ses accessoires, soit m leur masse,
- Verser dans le calorimètre une quantité d'eau de masse M (M doit être de l'ordre de 400 g)

- Attendre que la température θ_i soit stable pour relever sa valeur.
- Introduire une quantité de glace sèche de masse M' dans le calorimètre et remettre aussitôt le couvercle.
- Agiter doucement et régulièrement pendant toute la fusion de la glace. Pour cela, remplir le tableau suivant:

t(s)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
θ (°C)									

Tracer la courbe $\theta = f(t)$.

- Noter la température d'équilibre thermique θ_f correspondant au palier de changement d'état à partir de la courbe.
- Peser l'ensemble calorimétrique ($M + m + M'$). En déduire la valeur de M' .

• Remplir le tableau en précisant les unités ; on prendra $\Delta C = 0 \text{ cal/g/}^\circ\text{C}$:

M (g)	ΔM	M' (g)	$\Delta M'$	μ_L	$\Delta \mu_L$	θ_i	$\Delta \theta_i$	θ_f	$\Delta \theta_f$
400	2	72	3	34	3	18	0,5	6,5	0,5

- Calculer L_{exp}

$$L_{\text{exp}} = \frac{(M + \mu) C (\theta_i - \theta_f) - C \theta_f}{M'} = C \left[\frac{(M + \mu) (\theta_i - \theta_f)}{M'} - \theta_f \right] = 1 \times \left[\frac{(400 + 34)(18 - 6,5)}{72} - 6,5 \right]$$

$$\Rightarrow L_{\text{exp}} = 62,81 \text{ cal/g}$$
- Calculer ΔL_{exp}

$$\Delta L_{\text{exp}} = 7,32 \text{ cal/g}$$

- Ecrire L sous la forme de :

$$L_{\text{exp}} = 62,81 \pm 7,32 \text{ [cal/g]}$$

- Donner la valeur théorique de L

$$L_{\text{th}} = 80 \text{ cal/g}$$

- Donner l'expression de $\Delta L_{\text{exp}} / L_{\text{exp}}$ sous forme d'une somme de cinq termes : $\Delta C = 0 \text{ cal/g/}^\circ\text{C}$

$$\frac{\Delta L_{\text{exp}}}{L_{\text{exp}}} = \left| \frac{C(\theta_i - \theta_f)}{M'} \right| \frac{\Delta M}{L_{\text{exp}}} + \left| \frac{C(\theta_i - \theta_f)}{M'} \right| \frac{\Delta \mu}{L_{\text{exp}}} + \left| \frac{C(M + \mu)}{M'} \right| \frac{\Delta \theta_i}{L_{\text{exp}}} + \left| \frac{-C(M + \mu) - C}{M'} \right| \frac{\Delta \theta_f}{L_{\text{exp}}} + \left| \frac{-(M + \mu) C (\theta_i - \theta_f)}{(M')^2} \right| \frac{\Delta M'}{L_{\text{exp}}}$$

- Donner la valeur numérique de chaque terme :

$$\left| \frac{C(\theta_i - \theta_f)}{M'} \right| \frac{\Delta M}{L_{\text{exp}}} = 5,08 \times 10^{-3} \quad \left| \frac{C(M + \mu)}{M'} \right| \frac{\Delta \theta_i}{L_{\text{exp}}} = 47,98 \times 10^{-3} \quad \left| \frac{-(M + \mu) C (\theta_i - \theta_f)}{(M')^2} \right| \frac{\Delta M'}{L_{\text{exp}}} = 45,98 \times 10^{-3}$$

$$\left| \frac{C(\theta_i - \theta_f)}{M'} \right| \frac{\Delta \mu}{L_{\text{exp}}} = 7,62 \times 10^{-3} \quad \left| \frac{-C(M + \mu) - C}{M'} \right| \frac{\Delta \theta_f}{L_{\text{exp}}} = 55,94 \times 10^{-3}$$

- Donner le terme qui a la contribution la plus importante à l'erreur sur L_{exp} :

Le terme qui a la contribution la plus importante à l'erreur sur L_{exp} est le terme à plus grande valeur numérique est :

$$\left| \frac{-C(M + \mu) - C}{M'} \right| \frac{\Delta \theta_f}{L_{\text{exp}}}$$



Pendule simple



Date
Section
Groupe
Note

1) Quel est le but de la manipulation ?

Le but de cette manipulation est de déterminer la pesanteur g

2) Déterminer la période T dans le cas des oscillations de faibles amplitudes.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

3) Isochronisme des oscillations de faibles amplitudes:

Suspendre l'un des pendules, régler sa longueur à $l_0 = 1,1 \times 10^{-3}$ m et remplir le tableau suivant :

Temps(s) $\theta < 15^\circ$	(t_1)	(t_2)	(t_m)	T	Δt_m	Δt_{chro}	ΔT
θ_1	12,53	12,50	12,515	1,2515	0,015	0,1	0,0115
θ_2	12,56	12,53	12,545	1,2545	0,015	0,1	0,0115

Pour chaque cas, on mesure deux fois la durée de 10 oscillations t_1 et t_2 .

t_m est la période moyenne : $t_m = [t_1 + t_2] / 2$

Δt_m est l'incertitude absolue sur t_m : $\Delta t_m = |t_1 - t_2| / 2$

Δt_{chro} est l'incertitude sur le chronomètre utilisé.

On peut déduire la période T et l'incertitude totale par les formules :

$$T = t_m / 10 \text{ et } \Delta T = (\Delta t_{\text{chro}} + \Delta t_m) / 10 \quad (10)$$

Vérifier l'indépendance de la période de l'angle θ ($\theta_1 < \theta_2 < 15^\circ$).

T ne dépend pas de θ

4) Utiliser les trois pendules ($m_1 < m_2 < m_3$), régler leurs longueurs à $l_1 = \dots$ m et remplir le tableau suivant :

Temps(s) masses	(t_1)	(t_2)	(t_m)	T	Δt_m	Δt_{chro}	ΔT
m_1							
m_2							
m_3							

Que peut-on conclure ?

5) Mesure de l'accélération de la pesanteur g :

Utiliser l'un des trois pendules ; $m = 100 \text{ g}$
 Pour chaque valeur de l , faire osciller le système et mesurer la période correspondante.
 Remplir le tableau suivant :

Tableau III

Temps l (m)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_m (s)	T (s)	T^2 (s ²)	Δt_m (s)	Δt_{chro} (s)	ΔT (s)	ΔT^2 (s ²)
10	6,31	6,33	6,32	0,632	0,399	0,01	0,1	0,011	0,0139
20	8,75	8,82	8,785	0,8785	0,771	0,035	0,1	0,0135	0,0237
30	10,66	10,81	10,735	1,0735	1,152	0,075	0,1	0,0175	0,0375
40	12,41	12,49	12,405	1,2405	1,538	0,005	0,1	0,0105	0,026
50	13,84	13,89	13,825	1,3825	1,911	0,015	0,1	0,0115	0,0317

N.B.:
 $\Delta T^2 = 2T \Delta T$

Représenter sur un papier millimétré les points (T^2, l) et les rectangles d'incertitudes correspondants.

Calculer les pentes des deux droites limites (L_1 et L_2)

$$P_1 = \frac{27,5 \times 10^{-2} - 0}{1,132 - 0} = 0,242$$

$$P_2 = \frac{45 \times 10^{-2} - 0}{1,663 - 0} = 0,27$$

Selon le graphe : $P_1 = \frac{l_2 - l_1}{T_2^2 - T_1^2}$

De même pour P_2

et en déduire la pente moyenne P_m et son incertitude ΔP_m .

$$P_{\text{mod}} = 0,256$$

$$P_{\text{mod}} = [P_1 + P_2] / 2$$

$$\Delta P_m = 0,014$$

$$\Delta P_m = |P_1 - P_2| / 2$$

En déduire g et Δg .

$$g = 10,1 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Voir: "Note 1"

$$\Delta g = 0,552 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Donner une conclusion. (sur la valeur de g trouvée) :

On conclut que la valeur de g trouvée est équivalente à la valeur de g théorique.

Note 1:

On a : $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ et selon le graphe : $P_{\text{mod}} = \frac{l}{T^2}$

$T^2 = 4\pi^2 \frac{l}{g}$, on introduit ce terme dans l'expression de P_{mod} :

$$P_{\text{mod}} = \frac{l}{4\pi^2 \frac{l}{g}} \Rightarrow P_{\text{mod}} = \frac{g}{4\pi^2} \Rightarrow g = 4\pi^2 P_{\text{mod}}$$

$$\Delta g = \Delta[4\pi^2 P_m] = 4\pi^2 \Delta P_m$$

6) Mesure de la longueur du pendule:

Utiliser l'un des trois pendules, prendre une longueur x inconnue.

Mesurer la période correspondante et en déduire x et $\Delta x/x$.

(en utilisant la valeur de g déjà trouvée)

(l_1)	(l_2)	T (s)	ΔT (s)	(x) (m)	$\Delta x/x$
10,66	10,81	1,0735	0,0175	0,294	0,178%

Voir:

"Note 2"

Mesurer cette longueur inconnue avec une règle graduée et calculer $\Delta l/l$.

$$l = 0,3 \text{ [m]}$$

$$\Delta l/l = 0,175 \%$$

Comparer les deux valeurs: x calculée et l mesurée:

On voit que les deux valeurs x calculée et l mesurée sont un peu près équivalentes.

Conclusion:



Note 2: Calcul de $\frac{\Delta x}{x}$:

$$\bullet \text{ On a : } T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow \frac{T^2}{4\pi^2} = \frac{l}{g} \Rightarrow l = \frac{T^2}{4\pi^2} g$$

$$\text{On a : } l = \frac{T^2}{4\pi^2} g \text{ et } x \text{ est une longueur inconnue du pendule simple}$$

$$\text{Posons : } l = x \text{ alors : } x = \frac{T^2}{4\pi^2} g, \text{ avec : } g = 10,1 \text{ m/s}^2$$

$$\Rightarrow \Delta x = \Delta \left[\frac{T^2}{4\pi^2} g \right] = \frac{1}{4\pi^2} \Delta [T^2 g] = \frac{1}{4\pi^2} \Delta T^2 \Delta g \text{ et : } \Delta T^2 = 2T \Delta T$$

$$\Rightarrow \Delta x = \frac{2T \Delta T \Delta g}{4\pi^2}, \text{ avec : } \Delta g = 0,552 \text{ m/s}^2$$

• On mesure la longueur du pendule simple par une règle graduée

$$\text{On trouve : } l = 0,3 \text{ m et } l = \frac{T^2}{4\pi^2} g$$

$$\text{Alors : } \Delta l = \Delta \left[\frac{T^2}{4\pi^2} g \right] \Rightarrow \Delta l = \frac{2T \Delta T \Delta g}{4\pi^2} = \Delta x, \text{ avec } \Delta g = 0,552 \text{ m/s}^2$$

Le graphe:

