ÉCOLE UNIVERSITAIRE
DE PHYSIQUE ET D'INGÉNIERIE
Université Clermont Auvergne

UE de Physique – L1 S2
Physique Expérimentale II

Table des matières

Ch.1 : Incertitude dans les mesures et exploitation des résultats 5
1. Mesures, erreurs, incertitudes et précision 5
2. Incertitude sur la mesure directe d'une grandeur 6
2.1. Incertitude de type A prépondérante 6
2.2. Incertitude de type B prépondérante 7
2.3. Incertitude de type A et B du même ordre de grandeur 7
3. Propagation des incertitudes 7
4. Notion de chiffres significatifs et expression des résultats 8
5. Tracé des graphiques 10
6. Vérification des lois physiques : Méthode de la bande commune 10
7. Estimation des incertitudes : fiche synthétique 11
8. Fiche TD – Incertitudes de mesures 13
Ch.2 : Évaluation et bonne pratique 17
1. Gestion du matériel, propreté et comportement 17
2. Rédaction du compte-rendu 17
Ch.3 : Etude des champs magnétiques 19
1. Travail de préparation 19
1.1. Calcul du champ magnétique 19
1.2. Effet Hall 20
1.3. Dispositif expérimental 20
2. Travail expérimental 21
2.1. Conducteur droit 22
2.2. Boucle conductrice 22
Ch.4 : Capacité d'un condensateur plan 24
1. Travail de préparation 24
1.1. Condensateur plan 24
1.2. Dispositif expérimental 24
2. Travail expérimental 27
2.1. Protocole de mesure 27
2.2. Mesures 27
Ch. 5 : Etude de mouvements rectiligne et circulaire dans un référentiel galiléen 29
1. Travail de préparation 29

1.1. Mouvement rectiligne 30
1.2. Mouvement circulaire uniforme 30
1.3. Détermination théorique de g 31
1.4. Dispositif expérimental 32
2. Travail expérimental 33
2.1. Protocole de mesure 33
2.2. Mesures et exploitation des résultats 33
Ch. 6 : Etude de l'oscillateur harmonique libre dans un référentiel galiléen 35
1. Travail de préparation 35
1.1. Equation du mouvement d'un pendule simple 35
1.2. Force de rappel d'un ressort 37
1.3. Dispositif expérimental 39
2. Travail expérimental 40
2.1. Protocole de mesures 40
2.2. Mesures et exploitation des résultats 40

La physique est une science expérimentale : observer et manipuler sont au cœur de la démarche d'un physicien pour comprendre et expliquer les phénomènes auxquels il est confronté. Le module de physique du deuxième semestre inclut donc une part importante de pratique expérimentale.

L'élément constitutif (EC) « Physique Expérimentale II » est constitué de séances de préparation, de manipulation et de conclusion pour un total de 24h réparties comme suit :

- Travail préparatoire (2 x 3h) : ces séances permettent d'assimiler la théorie associée à chaque problématique expérimentale et de réaliser la modélisation sous forme d'exercice. Le fonctionnement du matériel utilisé lors des mesures vous sera expliqué. La présentation et l'interprétation des données expérimentales (incertitudes, graphiques, …) seront aussi discutées.
- Travail expérimental (4 x 4h) : lors de ces séances, vous étudierez deux problématiques de mécanique du point et deux autres d'électro-magnétostatique. A travers différentes mesures, vous pourrez valider expérimentalement les lois énoncées en cours.
- Travail de synthèse (1 x 3h) : cette dernière séance permettra de dresser un bilan de votre travail : comparaison des résultats des différents binômes, correction des comptes rendus, amélioration de la méthodologie …

Les différentes étapes du raisonnement scientifique : observation, hypothèse, expérimentation, analyse, conclusion, mises en œuvre dans ces séances pratiques ont été exposées dans le cours de méthodologie du travail universitaire (MTU) au premier semestre. Au terme d'une formation de Licence de sciences, un étudiant doit être en mesure, de façon autonome, de mettre en œuvre un raisonnement scientifique complet. Cette approche a été guidée lors des séances du premier semestre (optique géométrique et électricité) afin de vous préparer à une plus grande autonomie durant ce deuxième semestre.

Le fascicule est constitué de deux parties. Le premier chapitre présente la méthodologie du travail en sciences expérimentales. Cette partie générale a déjà était expliquée au premier semestre : elle doit donc être assimilée avant le début des séances et ne devrait servir que d'aide-mémoire. En particulier, le paragraphe 8 contient une fiche synthétique vous permettant de réaliser un calcul d'incertitude. Le deuxième chapitre rappel les différentes consignes que vous devez respecter lors des séances, les éléments attendus dans les comptes rendus et le déroulement de l'évaluation.

Les problématiques de mécanique du point et d'électro-magnétostatique sont abordées dans les chapitres suivants. Pour chaque problématique, un premier paragraphe présente sous forme d'exercice le modèle physique qui sera développé lors des séances de préparation. L'étudiant est ensuite guidé pour la réalisation d'une manipulation expérimentale. Avant le démarrage des séances, il est nécessaire d'avoir pris connaissance du fascicule. Des recherches bibliographiques, des calculs, … sont généralement nécessaires avant chaque séance.

Le compte-rendu de l'expérimentation est à rendre en fin de séance, seul un travail préparatoire de qualité permettra la production d'un compte-rendu satisfaisant les critères d'un travail de sciences expérimentales au niveau universitaire et dans le temps imparti.

Ch.1 : Incertitude dans les mesures et exploitation des résultats

La caractérisation de la précision et de l'exactitude d'une mesure par la détermination de son incertitude est un aspect essentiel du travail expérimental. Ce chapitre discute de la détermination des incertitudes en fonction du contexte expérimental ainsi que de l'exploitation de cette information dans la présentation des résultats, que ce soit sous forme de texte, de tableau ou de graphique. Au niveau universitaire, toute mesure sera associée à une incertitude. **Ce chapitre est à travailler en autonomie**. La fiche synthétique *page 12* est un outil de réflexion sur la méthode à appliquer pour déterminer une incertitude sur une quantité et pourra être réutilisée lors des séances de sciences expérimentales des années universitaires supérieures. Le *paragraphe 8* propose des exercices d'application à chercher pour la séance de préparation.

La détermination de l'incertitude d'une mesure est une tâche complexe. Ce chapitre n'est en aucun cas un cours de métrologie (science de la mesure), il résume les éléments de base nécessaires aux étudiants de L1 et pourra être complété par des lectures annexes (voir bas de page).

1. Mesures, erreurs, incertitudes et précision

La mesure d'une grandeur physique est nécessairement inexacte. L'écart (différence algébrique) entre la valeur mesurée x_m et la valeur recherchée x_0, est l'erreur de mesure. La distribution des valeurs mesurées x_m est représentée statistiquement par une loi de probabilité.

On distingue les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires, chacune pouvant provenir soit de la nature de l'expérience, soit de l'opérateur, soit des appareils de mesure.

L'erreur systématique est une erreur de valeur constante pour une mesure donnée et qui agit toujours dans le même sens (de signe constant). Elle peut provenir :

- de l'appareillage (graduation défectueuse ...)
- de l'opérateur (erreur de parallaxe ...)
- de la méthode de mesure.

L'erreur aléatoire est une erreur dont la valeur et le sens varient d'une mesure à l'autre (de signe variable.). Elle peut être due :

- à l'appareillage (sensibilité et fidélité du matériel...)
- à l'opérateur (qualité d'une lecture.. .).

Évaluation des incertitudes de mesure, Physique Chimie terminale S, Hachette Éducation, 2012
Nombre, mesures et incertitudes en sciences physiques et chimiques, Groupe des Sciences physiques et chimiques de l'IGEN
Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, norme AFNOR NF ENV 13005, Aout 1999
Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, Bureau International des Poids et Mesures

Les erreurs systématiques dues à un appareillage défectueux ou à un mauvais opérateur sont supposées éliminées. Celles dues à la méthode de mesure peuvent généralement être soumises à analyse et évaluées quantitativement.

Par exemple : influence de la poussée d'Archimède dans une pesée, influence de la résistance d'un ampèremètre dans la mesure d'un courant ...

La valeur vraie d'une grandeur ne pouvant être déterminée avec certitude, on est amené à présenter le résultat des mesures sous la forme $x \pm \Delta x$, où x est la valeur la plus probable et Δx, **toujours positif**, est l'incertitude de mesure ou incertitude absolue associée à un niveau de confiance.

Cela permet de proposer un intervalle : $[x - \Delta x\ ;\ x + \Delta x]$ dans lequel la valeur vraie x_0 se trouve avec une probabilité dépendant du niveau de confiance. L'incertitude relative $\Delta x/x$ caractérise la précision de la mesure.

2. Incertitude sur la mesure directe d'une grandeur

Une grandeur dont la valeur est directement lue sur l'appareil de mesure (règle, voltmètre, chronomètre, …) correspond à une mesure directe. Il existe deux types d'incertitudes : les incertitudes statistiques (type A) et les incertitudes de lecture (type B).

2.1. Incertitude de type A prépondérante

La dispersion statistique des mesures est sensiblement plus grande que l'incertitude liée à la précision de l'appareil utilisé. En pratique, il est nécessaire de faire plusieurs fois la mesure et la valeur moyenne ainsi que l'incertitude sont alors déterminées par une méthode statistique qui sera détaillée en L2.

En règle générale, pour des résultats $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ de n mesures qui diffèrent les uns des autres :

- la valeur la plus probable x de la mesure est la moyenne arithmétique $\bar{x}$ des n résultats :

$$x = \overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

- le calcul de l'écart-type à la moyenne σ_x correspondant à la distribution des n mesures permet d'estimer l'incertitude-type, u_A, associée à la mesure de la grandeur x :

$$u_A = t \times \sigma_x = t \times \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}$$

Dans cette dernière formule, le facteur de Student t permet de prendre en compte la dispersion statistique des valeurs pour un faible nombre de valeurs.

En fonction de la précision attendue pour le résultat, il sera possible de négliger le facteur de Student pour un nombre important de mesures. Par exemple, pour $n > 5$, l'erreur commise n'est que de l'ordre de 10%.

Nombre de mesures n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	40	∞
Facteur de Student t	1,84	1,32	1,20	1,14	1,11	1,09	1,08	1,07	1,06	1,03	1,01	1,00

Remarque : cette incertitude type peut être liée à une incertitude élargie $\Delta x = k \times u_A$, avec un taux de confiance donné. Pour les incertitudes de type A, la distribution statistique étant une loi gaussienne, la probabilité que la valeur recherchée x_0 soit dans l'intervalle $x_0 \pm u_A$ est de 68,3%. Si l'on souhaite élargir cet intervalle, on obtient donc l'incertitude élargie, avec un taux de confiance de 95,5% si $k = 2$ ou 99,7% si $k = 3$. En pratique, vous utiliserez sauf mention contraire $k = 1$: l'incertitude élargie Δx est alors équivalente à l'incertitude type u_A.

2.2. Incertitude de type B prépondérante

L'incertitude liée à la précision de l'appareil de mesure est largement supérieure à la dispersion des mesures. Une seule mesure (soignée) est réalisée et l'incertitude de lecture directement déterminée avec l'appareil de mesure. L'incertitude type est donnée par le constructeur dans la documentation de l'appareil (voltmètre, comparateur, …) ou à défaut par l'enseignant.

Exemple 1 : pour une lecture directe sur une règle graduée, l'incertitude de mesure type sera obtenue comme étant égale à l'écart entre deux graduations divisé par $\sqrt{12}$ afin de prendre en compte la distribution statistique des valeurs dans l'intervalle.

Exemple 2 : pour la mesure d'une tension avec un voltmètre numérique, le constructeur donne une incertitude de mesure type égale à un pourcentage de la valeur lue (précision de l'appareil) à laquelle s'ajoute la résolution de l'affichage numérique.

2.3. Incertitude de type A et B du même ordre de grandeur

Si aucun des deux types d'incertitude n'est prépondérant, il sera alors nécessaire de prendre en compte les deux. L'incertitude type finale u sur la grandeur mesurée sera donnée par :

$$u = \sqrt{(\mathrm{u}_A)^2 + (\mathrm{u}_B)^2}$$

3. Propagation des incertitudes

Lorsque la valeur g de la grandeur à déterminer s'exprime indirectement en fonction des valeurs $x, y, \cdots$ d'autres grandeurs mesurées directement, avec les incertitudes $\Delta x, \Delta y, \cdots$ il est nécessaire de propager les incertitudes de mesure. Mathématiquement, la fonction $g(x, y, \cdots)$ relie la valeur à déterminer aux mesures.

Les formules de propagation suivantes sont celles que l'on rencontre usuellement :

- somme ou différence :

$$g(x,y) = x + y \quad \text{ou} \quad x - y \quad \longrightarrow \quad \Delta g = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

- produit ou quotient :

$$g(x,y) = x \times y \quad \text{ou} \quad {}^{x}/_{y} \quad \longrightarrow \quad \frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}$$

Nous montrerons au S2 qu'une estimation de l'incertitude Δg est obtenue par la formule de propagation des incertitudes suivante :

$$\Delta g = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_{y,\,\ldots} \Delta x\right)^2 + \left(\left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)_{x,\,\ldots} \Delta y\right)^2 + \cdots}$$

Cette formule de propagation des incertitudes fait intervenir les dérivées partielles de la fonction $g(x, y, \cdots)$, lesquelles s'obtiennent en dérivant à chaque fois par rapport à une seule variable, les autres étant considérées comme constantes. Par exemple la dérivée partielle de la fonction $g(x, y, \cdots)$ par rapport à la variable x s'écrit $\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_{y,\ldots}$; elle correspond à une dérivée standard si on considère que toutes les autres variables $y, \cdots$ sont des constantes, soit $\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_{y,\ldots} \equiv g'(x)$.

Un certain nombre de règles devront être respectées pour la présentation des résultats des mesures sous forme de tableaux, l'expression des résultats expérimentaux, les unités, le tracé des graphiques, la vérification de lois physiques. La première de ces règles est que toute mesure directe ou indirecte doit être associée à son incertitude.

4. Notion de chiffres significatifs et expression des résultats

Le résultat de la mesure d'une grandeur physique s'exprime par **un nombre suivi d'une unité**. Dans ce nombre, on appelle chiffres significatifs, la suite des chiffres ayant un sens physique, le premier n'étant pas zéro, les suivants pouvant l'être.

Le nombre de chiffres significatifs est d'autant plus élevé que la mesure est précise. Supposons, par exemple, que l'on mesure le diamètre ϕ d'un cylindre métallique :

1. À l'aide d'un réglet gradué en millimètres, on lit $\phi = 24\ mm$, l'incertitude type de mesure étant $u_B(\phi) = 1/\sqrt{12} = 0{,}3\ mm$. On écrit $\phi = (24{,}0 \pm 0{,}3)\ mm$. La mesure comporte 3 chiffres significatifs (2, 4 et 0) et l'incertitude un seul (3). Ceci reste vrai même si l'on change d'unité : $\phi = (2{,}40 \pm 0{,}03)\ cm$ ou $\phi = (0{,}0240 \pm 0{,}0003)\ m$.

2. À l'aide d'un pied à coulisse comportant un vernier au dixième de millimètre, $\phi = 24{,}0\ mm$, l'incertitude de mesure étant $u_B(\phi) = 0{,}1/\sqrt{12} = 0{,}03\ mm$. On

écrit : $\phi = (24{,}00 \pm 0{,}03)\ mm$. La mesure comporte 4 chiffres significatifs (2, 4, 0 et 0) et l'incertitude un seul (3).

3. À l'aide d'un palmer au centième de millimètre, $\phi = 24{,}03\ mm$, l'incertitude de mesure étant $u_B(\phi) = 0{,}01/\sqrt{12} = 0{,}003\ mm$. On écrit : $\phi = (24{,}000 \pm 0{,}003)\ mm$. La mesure comporte 5 chiffres significatifs (2, 4, 0, 0 et 0) et l'incertitude un seul (3).

On remarquera que le rang du dernier chiffre significatif du nombre exprimant la mesure est le même que celui sur lequel porte l'incertitude :

- le dixième (de millimètre) pour la mesure 1
- le centième (de millimètre) pour la mesure 2
- le millième (de millimètre) pour la mesure 3

En résumé :
- l'incertitude est toujours majorée et écrite avec un seul chiffre significatif (deux éventuellement, uniquement lorsque le premier chiffre est 1, pour éviter des majorations trop importantes), ceci uniquement en fin de calcul.
- la grandeur est arrondie, ceci uniquement en fin de calcul, de sorte que seul le dernier chiffre (ou éventuellement les deux derniers) soit (soient) affecté(s) par l'incertitude.

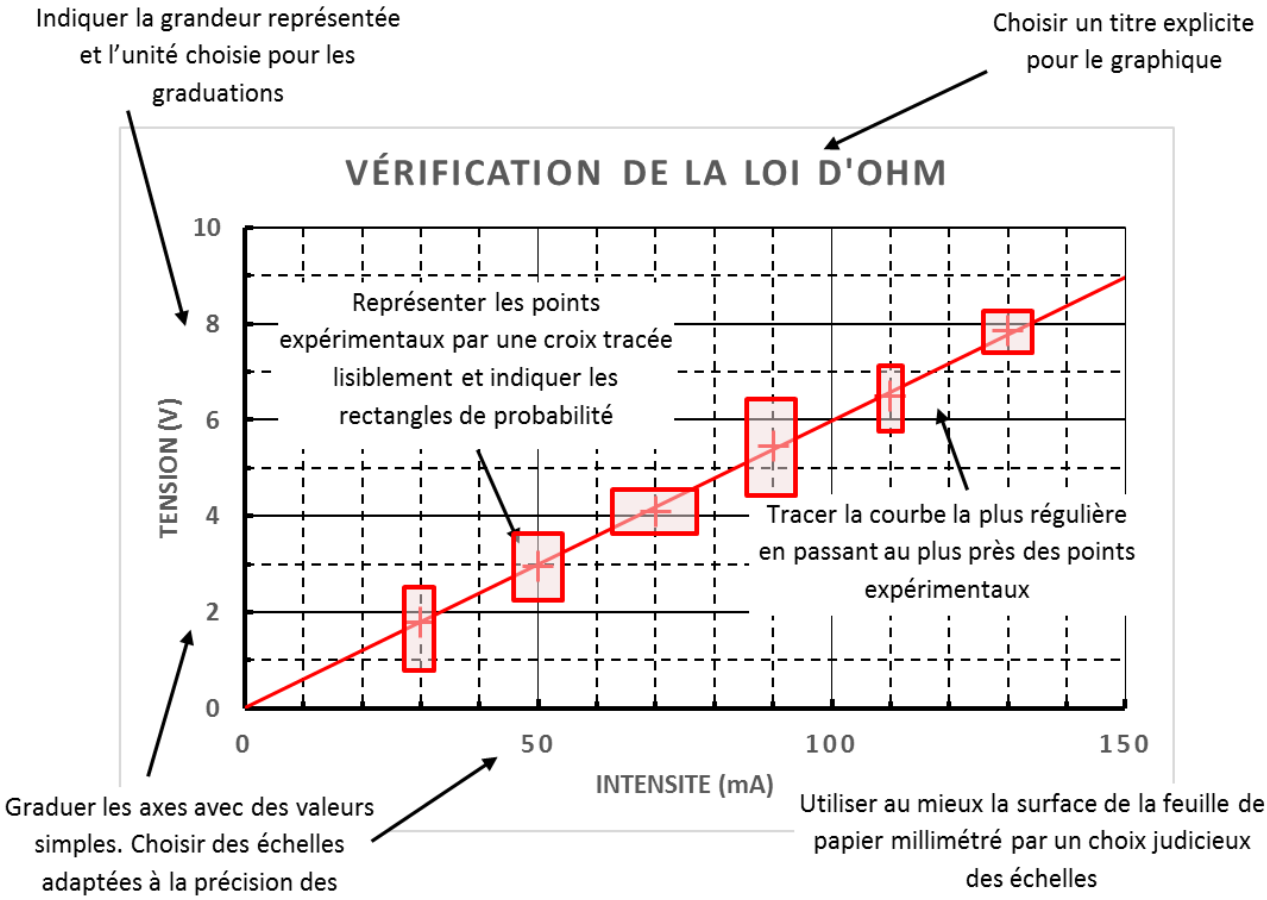


Figure 1 – Exemple de tracé d'un graphique avec indications.

5. Tracé des graphiques

Pour vérifier la loi d'Ohm, $U/I = R = cte$, on mesure le courant I parcourant une résistance pour plusieurs valeurs de la tension appliquée U ; à chaque couple (U, I) sont associées des incertitudes de mesure.

Les valeurs expérimentales obtenues pour la vérification de la loi d'Ohm peuvent être exploitées graphiquement, en représentant les variations de U en fonction de I et en vérifiant que la courbe obtenue est bien une droite passant par l'origine des coordonnées, comme présenté sur la *Figure 1* ci-dessus.

Remarque : en réalité, dans la représentation de la variation de $y(x)$, chaque « point expérimental » occupe une position indéterminée à l'intérieur d'un « rectangle de probabilité » de largeur $2 \times \Delta x$ et de hauteur $2 \times \Delta y$, centré sur la valeur la plus probable (x, y). La courbe tracée doit passer au plus près des centres de ces domaines d'incertitude et avoir des points communs avec chacun d'entre eux. Lors du traitement graphique, il est possible d'éliminer une éventuelle valeur « fausse » si la courbe tracée ne passe pas par son domaine d'incertitude. Il s'agit d'un bon moyen pour repérer les erreurs de mesures ou de calculs.

6. Vérification des lois physiques : Méthode de la bande commune

Cette méthode permet de vérifier la « concordance » entre n déterminations $x_i \pm \Delta x_i$ d'une même grandeur physique. La vérification est réalisée s'il existe une zone ou bande commune à ces n valeurs comparées.

Exemple : mesure de la vergence (ou puissance) P d'un microscope pour différentes valeurs de la distance d'accommodation D_a comme illustré sur la *Figure 2*.

L'existence d'une bande commune permet de conclure que la vergence du microscope est indépendante de la distance d'accommodation. On retiendra, comme valeur finale de la vergence le milieu P de la bande commune.

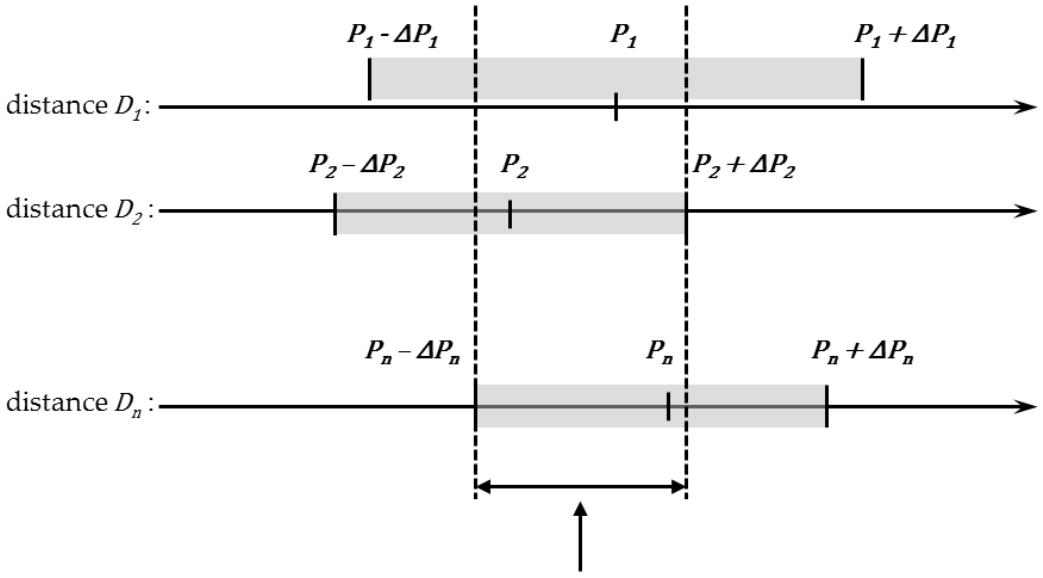
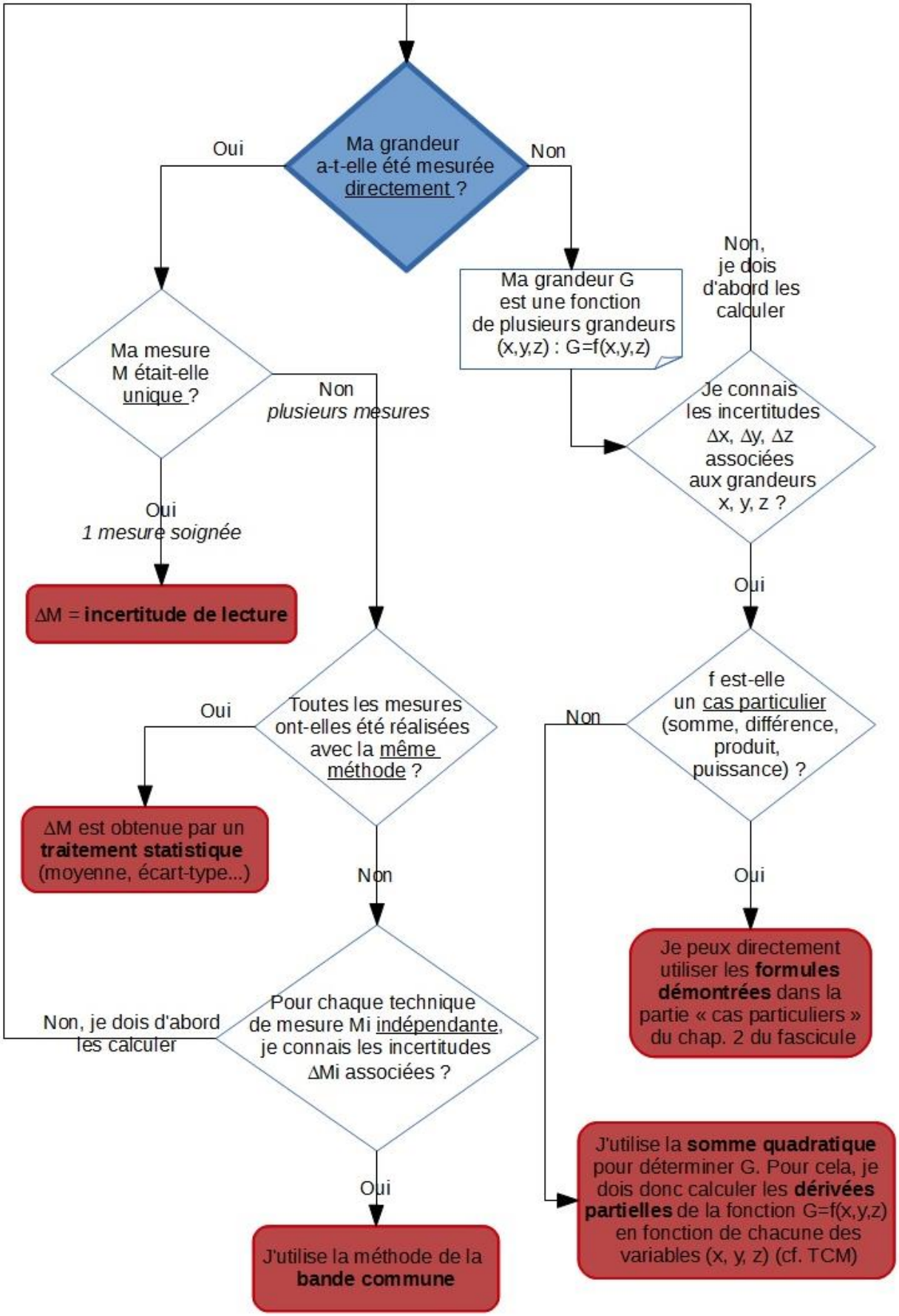


Figure 2 - Utilisation de la méthode de la bande commune pour déterminer une valeur moyenne.

Remarque : on utilise aussi quelquefois cette méthode de la bande commune pour vérifier la compatibilité des résultats expérimentaux lors de la mesure d'une même grandeur par différentes méthodes ou avec différents appareils (voir manipulation : « Lentilles minces »). Il est ainsi possible de choisir la méthode présentant la plus faible incertitude dont le résultat est compris dans la bande commune : ce sera la méthode à privilégier pour l'obtention de la grandeur recherchée.

7. Estimation des incertitudes : fiche synthétique

La fiche synthétique ci-après est un guide de raisonnement pour répondre à la question : « Comment déterminer l'incertitude de la grandeur que j'étudie ». Les étapes clés du raisonnement renvoient aux sections du fascicule explicitant le cas. La fiche synthétique pourra être utilisée quelle que soit la manipulation effectuée.


Ma grandeur a-t-elle été mesurée directement ?
Oui
Non
Ma mesure M était-elle unique ?
Non
plusieurs mesures
Oui
1 mesure soignée
ΔM = incertitude de lecture
Toutes les mesures ont-elles été réalisées avec la même méthode ?
Oui
ΔM est obtenue par un traitement statistique (moyenne, écart-type...)
Non
Pour chaque technique de mesure Mi indépendante, je connais les incertitudes ΔMi associées ?
Non, je dois d'abord les calculer
Oui
J'utilise la méthode de la bande commune
Ma grandeur G est une fonction de plusieurs grandeurs (x,y,z) : G=f(x,y,z)
Non, je dois d'abord les calculer
Je connais les incertitudes Δx, Δy, Δz associées aux grandeurs x, y, z ?
Oui
f est-elle un cas particulier (somme, différence, produit, puissance) ?
Non
Oui
Je peux directement utiliser les formules démontrées dans la partie « cas particuliers » du chap. 2 du fascicule
J'utilise la somme quadratique pour déterminer G. Pour cela, je dois donc calculer les dérivées partielles de la fonction G=f(x,y,z) en fonction de chacune des variables (x, y, z) (cf. TCM)

8. Fiche TD – Incertitudes de mesures

Exercice 1 : Chiffres significatifs

a) Choisir la bonne réponse :

Le nombre de chiffres significatifs de 3,14159 est :	□ 1	□ 3	□ 5	□ 6
Le nombre de chiffres significatifs de $1,00.10^{-2}$ est :	□ 1	□ 3	□ 5	□ 6
Le nombre de chiffres significatifs de $0,10.10^{3}$ est :	□ 1	□ 2	□ 3	□ 5
Le volume de la terre, assimilée à une sphère de rayon $6,38.10^{6}$ m, est :	□ 1.10^{21} m^3 □ $1,1.10^{21}$ m^3 □ $1,09.10^{21}$ m^3 □ $1,088.10^{21}$ m^3			
L'aire d'un champ rectangulaire de dimensions 20 m sur 10,5 m est :	□ 210 m^2 □ $2,1.10^{2}$ m^2 □ $2,10.10^{2}$ m^2 □ $2,100.10^{2}$ m^2			

b) Donner le nombre de chiffres significatifs des nombres suivants :

67,1	0,072	3,1416	6,28	0,00173	0,000056	$2,30.10^{-9}$

$6,30.10^{5}$	$5,0.10^{4}$	3,0054	0,0054	0,100	0,0004000

c) Ecrire les nombres suivants en tenant compte du nombre de chiffres significatifs demandé entre parenthèses :

6243 (2)	4270 (2)	0,006738 (3)	240000 (3)	0,006748 (1)	238,62 (3)	1999,9 (3)	0,0006000 (3)

0,05796 (2)	21500 (3)	1,2037 (3)	0,007 (3)	6,001 (3)	43,715 (4)	3,1459 (3)	6,345 (2)

d) Exprimer les résultats suivants en tenant compte des chiffres significatifs et des unités données entre crochets. Tous les nombres sans unités sont considérés comme des nombres sans dimension.

- 6,00 [g] x 4,2 [J (g °C)$^{-1}$] x 26,3 [°C] =

- 3,64 [g] x 4,5406 [mL] =
- $2{,}00.10^3$ [J] / $8{,}0.10^2$ [J] =
- 4,54 [g] / 35,5 [g mol^{-1}] =
- 4,2 [cm] + 4,6 [cm] =
- 4 [m^2] - 200 [cm^2] =
- 32,6 x 104 [kg] x 0,74 [m s^{-2}] =
- 6,3 [m] x 2,4 [s^{-2}] =
- 31,3 [m] ² =
- 96,2 [N] – 12,29 [N] =
- 45,2 [A] – 12,57 [Ω] =

Exercice 2 : Conversion d'unités

a) Convertir 56° en :

- Radian
- Minute d'arc
- Seconde d'arc

b) Convertir 9759' (min d'arc) en :

- Degré
- Radian

c) Convertir 1h 34min en unité du S.I.

d) Exprimer la masse volumique de l'eau (1 kg L^{-1}) en g cm^{-3} puis en unité du S.I.

Exercice 3 : Quelques mesures historiques de la vitesse de la lumière

Depuis longtemps les hommes sont conscients du fait que la lumière a une vitesse finie *c*. Aujourd'hui, on a fixé *c* = 299792458 m s^{-1}.

a) Galilée, au début du XVIIème siècle, a tenté de mesurer *c* avec un assistant situé à 3 km de lui. Chacun étant équipé d'une horloge et d'une source de lumière, ils se sont envoyés des faisceaux lumineux et ont essayé de mesurer le temps de parcours de la lumière entre eux. A votre avis, pourquoi cette expérience s'est soldée par un échec ? Qu'en déduisez-vous concernant l'horloge dont ils disposaient ?

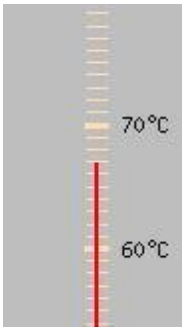
En 1676, Olaüs Romer détermine à partir de l'étude des satellites de Jupiter une vitesse de la lumière *c* = 212000 km s^{-1}. Fizeau en 1849 obtient une valeur différente *c* = 315300 km s^{-1}. En 1878, Albert A. Michelson et Edward W. Morley calculent la valeur de la vitesse de la lumière : 299853 km s^{-1} à 50 km s^{-1} près.

b) Analyser la cohérence de ces résultats et l'évolution de la précision des mesures.

c) Quelle est l'erreur commise en prenant *c* = 300000 km s^{-1} ?

d) Quelle est l'erreur commise en prenant *v* = 300000 km s^{-1} dans l'air dont l'indice de réfraction moyen dans le visible à 300 K vaut 1,000297.

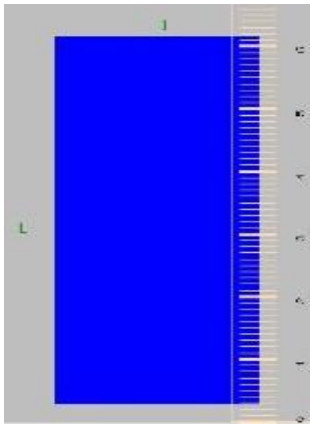
Exercice 4 : Incertitude de lecture simple



Un étudiant utilise le thermomètre ci-contre pour effectuer une mesure de température T. Il obtient la valeur indiquée sur ce thermomètre :

- Relever la valeur T en tenant compte des chiffres significatifs : T = °C
- Calculer l'incertitude-type de lecture sans tenir compte des chiffres significatifs : °C
- Ecrire T sous sa forme définitive :

Exercice 5 : Incertitude de lecture double



Un étudiant utilise un microscope possédant un objectif gradué en µm pour mesurer une particule assimilée au rectangle ci-contre. Il souhaite mesurer le côté L.

- Relever la valeur de L (attention à l'origine de l'axe gradué) :
  L = µm
- Calculer l'incertitude-type de lecture sans tenir compte des chiffres significatifs : µm
- Ecrire L sous sa forme définitive :

Exercice 6 : Incertitudes de construction du aux appareils

Le tableau suivant synthétise quelques spécifications d'un multimètre *numérique* (fournies par la notice de l'appareil) :

Position commutateur	Conditions	%L	N_{UR}
V_{DC}	Continu	0,3%	2
V_{LOWZ}	40 Hz à 1 kH	1%	2
V_{AC+DC}	40 Hz à 1 kH	1,5%	2

où : %L : l'incertitude de construction s'exprimant en pourcentage de la valeur lue

N_{UR} : nombre d'unités de représentation (l'unité de représentation est la plus petite valeur que l'affichage numérique peut donner dans le calibre utilisé).

Si on lit en continu une tension U = 280,0 V sur ce multimètre, quelle incertitude de construction a-t-on ? Conclure.

Exercice 7 : Incertitudes liées à l'appareil

On dispose de trois résistances R_1 = 47 Ω ± 5%, R_2 = 33 Ω ± 3% et R_3 = 22 Ω ± 2% branchées en série dans un circuit dont l'intensité est I = 2 ± 0,05 A. On rappelle que la résistance totale R et la puissance électrique P du circuit sont données respectivement par : $R = \sum_i R_i$ et $P = R\, I^2$.

a) A l'aide des formules de propagation des incertitudes, déduire l'expression de l'incertitude ΔR sur la résistance totale R en fonction de chacune des résistances R_i et de leurs incertitudes ΔR_i.
b) Exprimer la valeur de la résistance totale de ce circuit en tenant compte de la règle des chiffres significatifs.
c) Donner l'expression de l'incertitude relative sur la puissance en fonction de R, ΔR, I et ΔI.
d) Exprimer la valeur de la puissance de ce circuit en tenant compte de la règle des chiffres significatifs.

Exercice 8 : Bande commune

Deux groupes d'étudiants A et B ont réalisé des mesures de distances focales (en cm) d'une même lentille à l'aide de deux méthodes différentes. Les résultats obtenus sont :

- groupe A : $f_A = (4{,}84 \pm 0{,}16)$ cm ;
- groupe B : $f_B = (4{,}89 \pm 0{,}10)$ cm.

a) Vérifier s'il existe une bande commune.
b) Déterminer la valeur de la distance focale de la lentille.

Ch.2 : Évaluation et bonne pratique

Lors de chaque séance expérimentale, vous serez évalué sur la qualité de votre préparation, votre gestion du matériel, de votre paillasse ainsi que sur le compte-rendu de vos travaux. Cette évaluation en contrôle continu sera complétée par un examen terminal après la séance de synthèse.

1. Gestion du matériel, propreté et comportement

Lors des séances vous êtes responsable du matériel mis à votre disposition. Vous devez en prendre soin et le manipuler suivant les instructions données dans le fascicule ou par votre enseignant. Ceci demande d'avoir bien noté lors de votre préparation les précautions d'utilisation. À la fin de la séance, vous devez nettoyer le matériel avec les produits adaptés, ranger le matériel et nettoyer la paillasse dans son ensemble. Vous serez vigilant à éteindre et mettre hors tension les appareils utilisés.

Malgré une utilisation appropriée du matériel, il peut arriver une casse de petit matériel, vous devez prévenir vos encadrants qui vous expliciteront la procédure pour évacuer les déchets suivant la filière de recyclage adaptée et remplacer le matériel.

2. Rédaction du compte-rendu

La présentation des résultats de façon claire, rigoureuse et argumentée est un aspect essentiel du travail d'un physicien. Lors des séances pratiques d'optique géométrique vous allez produire un document de synthèse de vos travaux, un compte-rendu, à rendre à la fin de la séance. Ce document sera évalué.

L'objectif de ce document est de mettre en évidence les différentes étapes du raisonnement scientifique que vous avez suivi pour aborder la problématique de la séance. Le compte-rendu est constitué de 4 pages maximum (1 copie double) et suit un plan simple :

(i) Introduction : quelques lignes pour présenter l'observation et la problématique étudiée

(ii) Des parties argumentées qui donnent des éléments de réponses à la problématique. L'objectif de la partie dans le compte-rendu doit être explicité (étalonnage d'un appareil pour une mesure ultérieure, expérimentation, protocole). Les résultats seront présentés de façon synthétique. Les tableaux de mesures, le détail de certains calculs ou les graphiques, seront renvoyés en annexes, numérotées. Une référence à l'annexe concernée devra être clairement faite dans le texte lors de la discussion des résultats. Toute mesure sera caractérisée par son incertitude et commentée. Les difficultés rencontrées seront discutées. Chaque partie et sous partie sera terminée par une courte conclusion.

(iii) Conclusion : un paragraphe qui résume l'ensemble de la démarche exposée dans les parties argumentées et qui conclut sur la problématique exposée en introduction avec un œil critique sur les expérimentations/manipulations mises en œuvre au cours de la séance.

Ce document ne doit en aucun cas être une redite du fascicule, mais il doit tout de même pouvoir être lu et compris de façon autonome par le lecteur (le correcteur), sans que celui-ci ait besoin de se référer au fascicule. Les points essentiels devront donc être repris.

Attention :

- Toute mesure devra être caractérisée par une incertitude et commentée.
- Les graphiques devront être complets comme discuté dans le fascicule.
- Le compte-rendu ne doit pas être une simple liste de mesures.

Le travail préparatoire, notamment mis en évidence par des questions et des repérages graphiques dans le texte, doit vous aider à identifier la problématique de la séance et les étapes importantes du raisonnement et de l'argumentaire ou encore l'intérêt d'une expérimentation/manipulation. Il peut aussi vous guider pour estimer les incertitudes sur une mesure. Votre compte-rendu ne doit pas être une liste de réponses à ces questions sans lien ou analyse.

Vous devrez synthétiser les réflexions menées lors du travail préparatoire et lors de la séance pour produire un compte-rendu argumenté et concis discutant une problématique d'optique géométrique.

Il peut arriver lors de la séance, malgré un travail assidu, que vous ne trouviez pas les résultats standards attendus. Les causes peuvent être nombreuses, parfois solutionnées rapidement en discutant avec votre encadrant, parfois persistantes. Cela ne rendra pas votre compte-rendu moins intéressant ou moins pertinent. Il sera attendu qu'avec un raisonnement scientifique solide vous investiguiez ce problème et le présentiez dans votre compte-rendu.

Ch.3 : Etude des champs magnétiques

Un fil conducteur parcouru par un courant est à l'origine d'un champ magnétique. Les propriétés de ce champ vont influencer son environnement, et notamment induire un courant dans un circuit électrique tel que vous l'étudierez en deuxième année de licence. Il est donc indispensable de caractériser le champ magnétique produit par différentes géométries de conducteurs, comme vous allez le faire lors de cette séance, afin de pouvoir ensuite prévoir ses effets et éventuellement les supprimer ou les limiter.

1. Travail de préparation

1.1. Calcul du champ magnétique

Le champ magnétique $\overrightarrow{dB}$ créé par un petit élément de conducteur $\overrightarrow{d\ell}$ situé au point P et parcouru par le courant I est donné par la loi de Biot et Savart en un point M :

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu I}{4\pi} \frac{\overrightarrow{d\ell} \wedge \overrightarrow{PM}}{\left\|\overrightarrow{PM}\right\|^3}$$

où μ est la perméabilité magnétique du milieu que nous pourrons généralement reliée à celle du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ T.m.A^{-1}$. Dans le cas de l'air, $\mu = \mu_{air} \times \mu_0$ avec $\mu_{air} = 1{,}0000004$ la perméabilité relative de l'air.

Nous étudions un conducteur droit parcouru d'un courant d'intensité I. Nous considérerons que ce conducteur est infini, c'est-à-dire que sa longueur L est très supérieure à la distance ρ à laquelle se trouve le point M, où est mesuré le champ magnétique et de diamètre négligeable.

(iv) Exprimer le champ élémentaire $\overrightarrow{dB}$ dans le cadre décrit ci-dessus en utilisant les coordonnées cylindriques (ρ, θ, z) et la base $(\vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$.

(v) Donner une relation entre z, la coordonnée du point P où se situe l'élément $\overrightarrow{d\ell}$ et α, l'angle formé entre les droites (OM) et (PM).

(vi) En déduire une relation entre dz et $d\alpha$. Exprimer le champ élémentaire $\overrightarrow{dB}$ avec α comme unique variable.

(vii) En intégrant l'expression précédente, déterminer le champ magnétique $\vec{B}$ produit par le conducteur droit infini.

Vous utiliserez ce même raisonnement lors de la séance de travaux dirigés n°6 pour montrer que le champ magnétique créé par une boucle circulaire parcouru par un courant en tout point de son axe est :

$$\vec{B}(x) = \frac{\mu I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \vec{u}_x$$

avec I l'intensité du courant électrique parcourant la boucle conductrice, R le rayon de la boucle et x la distance au centre de la spire mesurée le long de l'axe. La direction du champ peut être déterminée en considérant les plans de symétrie.

1.2. Effet Hall

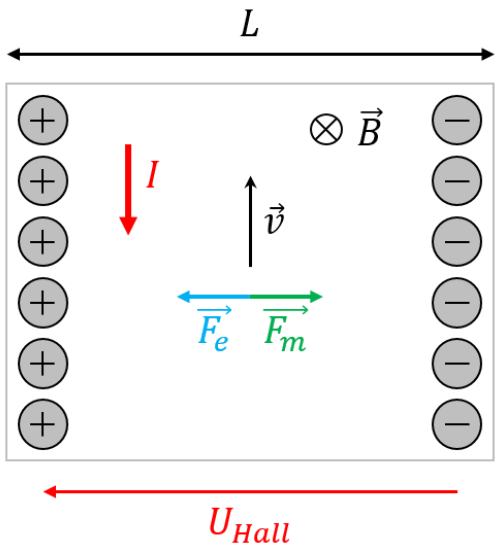


Figure 3 : représentation de la tension due à l'effet Hall dans un conducteur

Supposons un conducteur parallélépipédique parcouru par un courant d'intensité I constante et immergé dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire au courant (voir Figure 3). Une force de Lorentz s'exerce sur les électrons en mouvement :

$$\vec{F}_m = -e\,\vec{v} \wedge \vec{B}$$

avec $\vec{v}$ la vitesse des électrons et $-e$ leur charge.

Il en résulte une accumulation de charges sur les faces opposées du conducteur et donc un champ électrique $\vec{E}$ correspondant. La force de Coulomb s'exerçant sur les électrons est :

$$\vec{F}_e = -e\,\vec{E}$$

A l'équilibre, les deux forces se compensent. Soit en norme : $vB = E = U_{Hall}L$ avec L la largeur du conducteur et U_{Hall} la différence de potentiel entre les deux faces. Le courant I étant proportionnel à la vitesse v des électrons, la tension de Hall mesurée aux extrémités latérales du conducteur est proportionnelle à l'intensité du courant électrique et au champ magnétique :

$$U_{Hall} = k\,I\,B$$

1.3. Dispositif expérimental

Le matériel disponible est essentiellement présenté sur la Figure 4. Une alimentation à courant fort est reliée au conducteur étudié et fournit un courant continu ajustable pouvant atteindre 20 A. Cette alimentation peut être limitée en tension ou en courant. Les mesures se feront à intensité donnée en utilisant la limitation en courant. La précision de l'ampèremètre interne est de 2 %.



Figure 4 : montage expérimental pour le conducteur droit

Nous disposons de quatre conducteurs de courant pouvant supporter **ponctuellement** des intensités allant jusqu'à *20 A* : un conducteur droit de *40 cm* de longueur et *2 mm* de rayon et trois boucles conductrices de rayons *R = 20, 40* et *60 mm*.

Pour éviter que ces conducteurs ne chauffent trop, il conviendra de ne pas prolonger les durées d'alimentation en courant au-delà de *1* minute pour *20 A* et *5* minutes pour *15 A*.

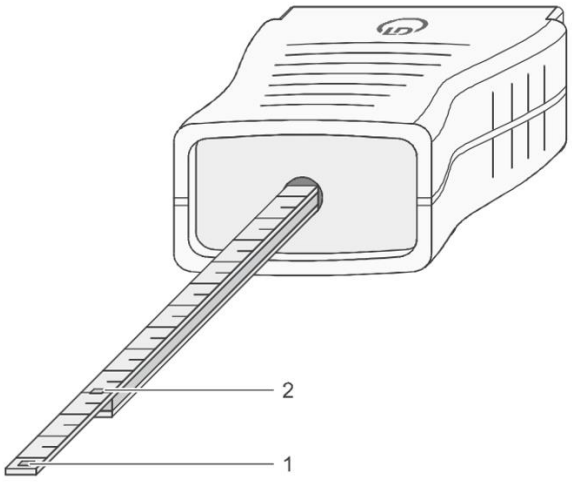


Figure 5 : sonde magnétique combinée

Une sonde combinée associe deux sondes à effet Hall. En effet, nous avons vu que la tension Hall est proportionnelle uniquement à la composante du champ magnétique orthogonale au plan. Sur la Figure 5, la sonde 1 permet de mesurer la composante du champ magnétique dans la direction perpendiculaire au plan du réglet support $B_\perp$ alors que la sonde 2 est utilisée pour la direction parallèle à l'axe principal du réglet support $B_\parallel$.

Cette sonde est reliée à un afficheur qui permet la lecture directe des deux composantes du champ magnétique. Plusieurs fonctions sont disponibles :

(i) Le bouton **quantity** permet de sélectionner la grandeur affichée, dans notre cas : soit la composante $B_\perp$ du champ magnétique (signalée par le symbole ⊥), soit la composante $B_\parallel$ (symbole ∥). Pour des mesures en alternatif, il est également possible d'afficher des valeurs efficaces signalées par le symbole ∼ : ce ne sont pas ces valeurs qui nous intéressent.

(ii) Le bouton **range** permet de sélectionner la gamme de mesure, pour la sonde combinée : ±10 mT, ±100 mT ou ±1000 mT. Les champs étudiés ici étant relativement faibles, nous utiliserons systématiquement la gamme ±10 mT.

(iii) Le bouton **→ 0 ←** permet de régler le zéro en ramenant la valeur mesurée à zéro. Il devra être systématiquement utilisé avant toute série de mesures, l'alimentation à courant fort étant alors éteinte.

La précision des mesures de champ est de 2% de la lecture (L) + 0,5% du maximum de la gamme utilisée, soit pour la gamme ±10 mT : $(0{,}02 \times L + 0{,}05)$ mT.

2. Travail expérimental

Cette séance porte sur l'étude des champs magnétiques associés à différents circuits parcourus par un courant : un conducteur droit et des boucles conductrices. Nous identifierons la direction du champ magnétique et vérifierons que ce dernier est proportionnel à l'intensité du courant électrique parcourant le conducteur. Pour le conducteur droit, nous étudierons également comment évolue le champ magnétique en fonction de la distance à l'axe du conducteur. Pour la boucle conductrice, nous nous intéresserons à l'évolution du champ magnétique le long de l'axe de la spire, d'une part, et en fonction de la taille de la spire, d'autre part. Finalement, nous évaluerons la perméabilité magnétique de l'air.

2.1. Conducteur droit

2.1.1. Etude qualitative

Installez et branchez le conducteur droit : il doit être centré par rapport à son support, son axe doit être perpendiculaire à l'axe principal du rail gradué. Positionnez la sonde combinée de sorte que l'extrémité du réglet support soit proche du conducteur droit (environ 1 mm) : le réglet support doit être à la hauteur de l'axe du conducteur droit, son axe principal doit être parallèle à l'axe principal du rail gradué.

Mesurez la composante $B_\perp$ pour un courant de 20 A. Que se passe-t-il quand on fait glisser le conducteur droit sous le réglet support de la sonde de sorte que son axe soit à la verticale du milieu de la sonde 1 ? Ces observations sont-elles en accord avec la direction du champ déterminée lors du travail préparatoire ? Que se passe-t-il si le sens de courant est inversé ?

2.1.2. Evolution du champ magnétique en fonction de l'intensité

Assurez-vous que l'extrémité du réglet support de la sonde combinée soit toujours proche du conducteur droit puis mesurez $B_\perp$ pour des courants I variant de 0 à 20 A par pas de 2 A.

Pour éviter que le conducteurs ne chauffent trop, il conviendra de ne pas prolonger les durées d'alimentation en courant au-delà de *1* minute pour *20 A* et *5* minutes pour *15 A*.

Utilisez le tableau ci-dessous pour présenter vos résultats.

I (A)	ΔI (A)	$B_\perp$ (mT)	$\Delta B_\perp$ (mT)

Tracez un graphique présentant l'évolution de $B_\perp$ en fonction de I. Le champ magnétique est-il bien proportionnel à l'intensité du courant électrique parcourant le conducteur ? Déterminez la pente de la droite et en déduire la distance ρ séparant la sonde du conducteur. Mesurez la distance entre l'axe du conducteur et le centre de l'élément de mesure de la sonde. Le résultat est-il cohérent avec la valeur de ρ ?

2.1.3. Evolution du champ magnétique en fonction de la distance à l'axe du conducteur

La distance ρ sera mesurée à l'aide du rail gradué en se référant à la position de la tige verticale supportant la sonde combinée dans le paragraphe précédent. Nous prendrons comme incertitude : $\Delta\rho = 0{,}5\ mm$.

Assurez-vous que le réglet support de la sonde combinée est toujours à la hauteur de l'axe du conducteur droit et que son axe principal est bien parallèle à l'axe principal du rail gradué. Pour un courant de 15 A, mesurez $B_\perp$ pour ρ = 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 17, 20 et 25 mm.

En utilisant un tableur, réalisez le graphe représentant le champ magnétique $B_\perp$ en fonction de $1/\rho$. Déterminez la pente de la droite a_{exp} en utilisant la fonction « régression linéaire ». Comparez votre résultat avec la valeur théorique a_{th} que vous pouvez obtenir à partir du travail préparatoire. Vous utiliserez le coefficient de corrélation R^2 pour justifier votre réponse.

2.2. Boucle conductrice

2.2.1. Aspects qualitatifs

Installez et branchez le boucle conductrice de rayon R = 20 mm : son plan doit être perpendiculaire à l'axe principal du rail gradué. Positionnez la sonde combinée de sorte que l'axe principal du réglet support soit confondu avec l'axe de la spire.

Positionnez la sonde 1 au centre de la spire et mesurez la composante $B_{\perp}$ pour un courant de 15 A. Placez maintenant la sonde 2 au centre de la spire et mesurez la composante $B_{\parallel}$ pour un courant identique. Ces observations sont-elles en accord avec l'orientation du champ magnétique déduite de la symétrie du problème ? Que se passe-t-il quand le sens de courant est inversé ?

2.2.2. Evolution du champ magnétique en fonction de l'intensité

Assurez-vous que la sonde 2 est toujours au centre de la spire puis mesurez $B_{\parallel}$ pour des courants I variant de 4 à 20 A par pas de 4 A.

Reportez dans un tableau les valeurs de I, $B_{\parallel}$ et $\Delta B_{\parallel}$. Tracez un graphique présentant l'évolution de B en fonction de I. Le champ magnétique est-il bien proportionnel à l'intensité du courant électrique parcourant le conducteur ?

2.2.3. Evolution du champ magnétique sur l'axe de la spire

Considérons la sonde 2 sur l'axe de la spire, soit x la distance entre le milieu de la sonde 2 et le centre de la spire. La valeur de x sera mesurée à l'aide du rail gradué en se référant à la position de la tige verticale supportant la sonde combinée lorsque la sonde 2 est au centre de la spire.

Assurez-vous que l'axe principal du réglet support de la sonde combinée est toujours confondu avec l'axe de la spire. Pour un courant de 20 A, mesurez B pour x = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 et 60 mm.

Reportez dans un tableau les valeurs de x, R2= (R2 + x2)3=2, B== et B==. Tracez un graphique présentant l'évolution de B== en fonction de x. Faire un graphique de B== en fonction de

R2= (R2 + x2)3=2. Vos résultats sont-ils en accord avec l'équation (2) ?

2.2.4. Evolution du champ magnétique en fonction de la taille de la spire

Pour un courant de 15 A, mesurez $B_{\parallel}$ au centre de la spire pour les différentes boucles conductrices.

Reportez dans un tableau les valeurs de R, 1=R, B== et B==. Tracez un graphique présentant l'évolution de B== en fonction de 1=R. Ces résultats sont-ils en accord avec l'équation (3) ?

2.2.5. Perméabilité de l'air

Déduisez de la mesure du champ magnétique au centre de la boucle conductrice de rayon R = 20 mm une mesure de la perméabilité de l'air air. Calculez l'incertitude associée air en propageant non seulement l'incertitude sur le champ mais également celle sur l'intensité. Ces deux sources d'incertitudes n'étant pas corrélées, il convient de sommer leurs contributions quadratiquement.

Votre mesure est-elle compatible avec les valeurs de 0 et air r mentionnées à la section 1 ? Quelle est sa précision relative ?

Ch.4 : Capacité d'un condensateur plan

Dans cette étude, nous vérifierons tout d'abord la proportionnalité entre la charge accumulée sur les armatures du condensateur et la différence de potentiel qui lui est appliquée. Nous analyserons alors plus spécifiquement comment la capacité d'un condensateur plan dépend de sa géométrie : distance entre les plaques et surface des plaques. Finalement, nous mesurerons la permittivité relative du polystyrène.

1. Travail de préparation

1.1. Condensateur plan

Un condensateur plan est constitué de deux plans de grandes dimensions (considérés comme infinis), parallèles, séparés d'une distance d, portant des charges opposées $+Q$ et $-Q$ réparties sur chacun d'eux avec une densité surfacique uniforme σ.

(i) Pour un plan infini portant la densité de charges σ, déterminez l'orientation du champ électrique.

(ii) En utilisant le théorème de Gauss, calculez la norme du champ.

(iii) En sommant les champs électriques produits par chaque plan chargé, montrez que le champ total entre les armatures du condensateur a pour valeur :

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\,\vec{u}_z$$

(iv) Calculez la circulation du champ électrique entre les deux plaques du condensateur et déduisez-en sa capacité à partir de la relation $Q = CU$.

Cette démonstration est valable si le milieu situé entre les deux armatures est le vide. Dans le cas d'un milieu diélectrique quelconque, il faut remplacer la permittivité du vide ε_0 = 8,854117 10-12 F.m^{-1} par celle du milieu $\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$. La permittivité de l'air est quasiment identique à celle du vide, soit une permittivité relative ε_r^{air} = 1,000590, proche de 1.

1.2. Dispositif expérimental

1.2.1. Principe de mesure

Le principe de la mesure repose sur le transfert de la charge emmagasinée aux bornes du condensateur de capacité C inconnue vers un condensateur de référence de capacité C_{ref} connue (voir Figure 6).

Lorsque le commutateur est en position AB, le condensateur de capacité inconnue se charge. A l'équilibre, la charge emmagasinée aux bornes du condensateur est $Q = C \times U$.

Lorsque le commutateur est en position AC, une partie de la charge Q est transférée aux bornes du condensateur de référence. Soient Q_1 et Q_2 respectivement les charges aux bornes de C et C_{ref}, et U_{EL} la différence de potentiel aux bornes des condensateurs à l'équilibre. Q_1 et Q_2 s'expriment comme :

$$Q_1 = C \times U_{EL} \text{ et } Q_2 = C_{ref} \times U_{EL}$$

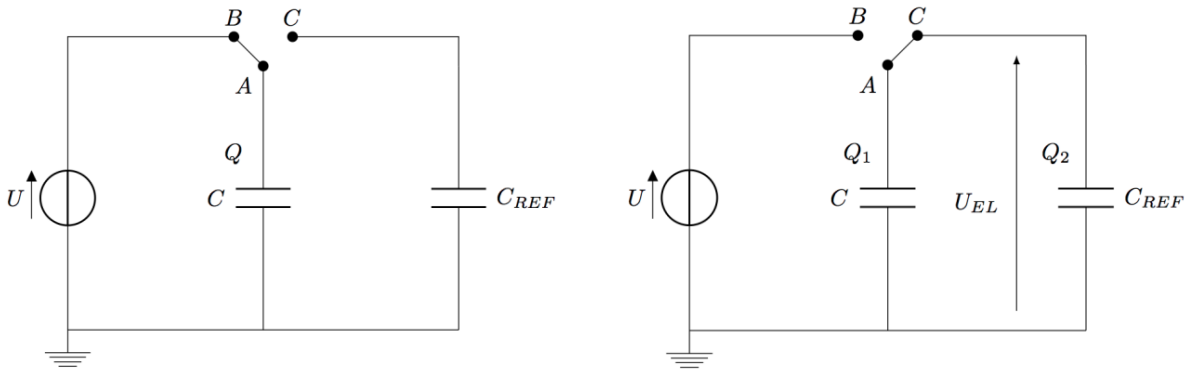


Figure 6 : charge (liaison AB) et décharge (liaison BC) du condensateur

La conservation de la charge impose $Q = Q_1 + Q_2$. Ainsi la capacité recherchée s'écrit :

$$C = \frac{C_{ref}\, U_{EL}}{U - U_{EL}}$$

1.2.2. Matériel

Deux jeux de plaques peuvent être étudiées : deux petites plaques de surface S_1 = 400 cm^2 et deux grandes de surface S_2 = 800 cm^2.

Comme le montre la Figure 9, un système d'entretoises permet de régler la distance d entre les plaques à 1, 2, 3, 4 ou 6 mm. Les plaques sont maintenues en appui grâce à quatre pinces plastiques utilisées aux quatre coins. Pour améliorer le parallélisme entre les plaques, nous disposons de petites pièces de plastique de 1, 2 et 3 mm d'épaisseur qu'il convient de placer au milieu des arêtes latérales et de l'arête du haut du condensateur plan, maintenues à l'aide des pinces plastiques restantes.

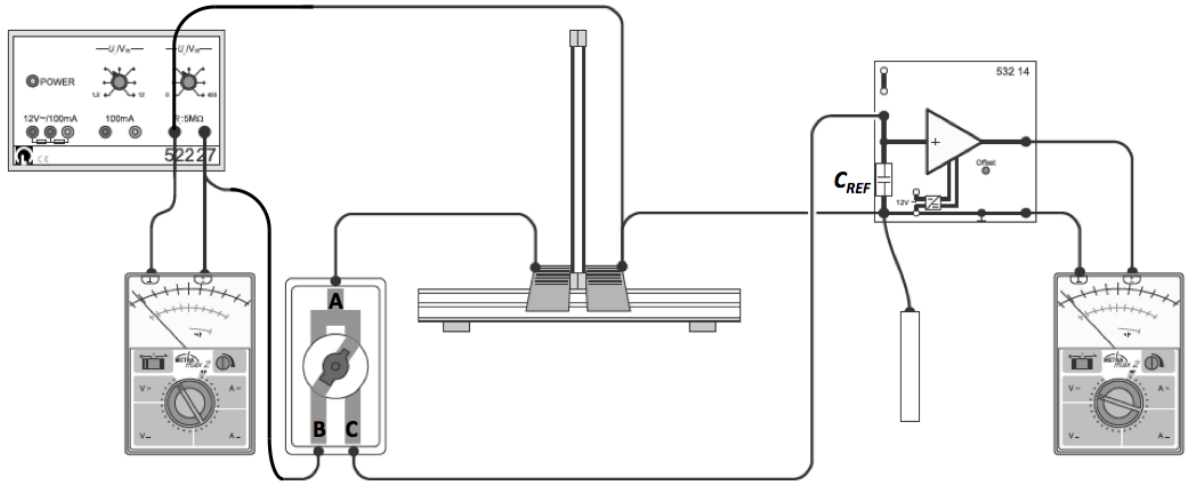


Figure 7 : dispositif expérimental

La sortie haute tension de l'alimentation est utilisée pour charger le condensateur.

La charge emmagasinée aux bornes du condensateur plan est mesurée par un électromètre. Ce dernier est présenté sur la Figure 9. Il est alimenté en connectant la sortie 12 V alternatif de l'alimentation aux bornes (5.1). Disposant d'une entrée à très haute impédance (> 10^{13} Ω), il permet des mesures quasi-statiques de différences de potentiel. Il a un gain de 1

et fonctionne pour des différences de potentiel à l'entrée, et donc à la sortie, U_{EL} allant jusqu'à 10 V. Nous l'utilisons ici comme coulomb-mètre en enfichant une capacité de référence, C_{ref} = 10.0 ± 0.5 nF, entre les bornes (1.1) et (1.2).

Un commutateur permet de connecter le condensateur plan à la haute tension pour le charger (position AB) puis à l'électromètre pour mesurer la charge emmagasinée (position AC).

Une tige métallique connectée à la masse de l'électromètre sert à décharger le condensateur plan.

Deux voltmètres sont utilisés pour mesurer la différence de potentiel U appliquée aux bornes du condensateur plan d'une part et la différence de potentiel U_{EL} à la sortie de l'électromètre d'autre part. Ces voltmètres sont de classe 2 : l'incertitude de mesure est de 2% du calibre utilisé.

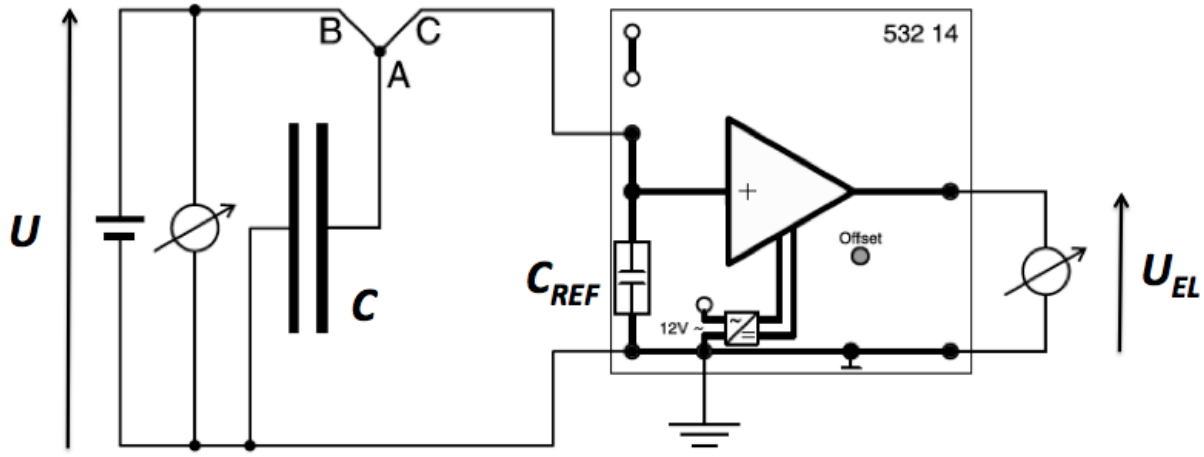


Figure 8 : circuit pour la mesure de la charge avec l'électromètre

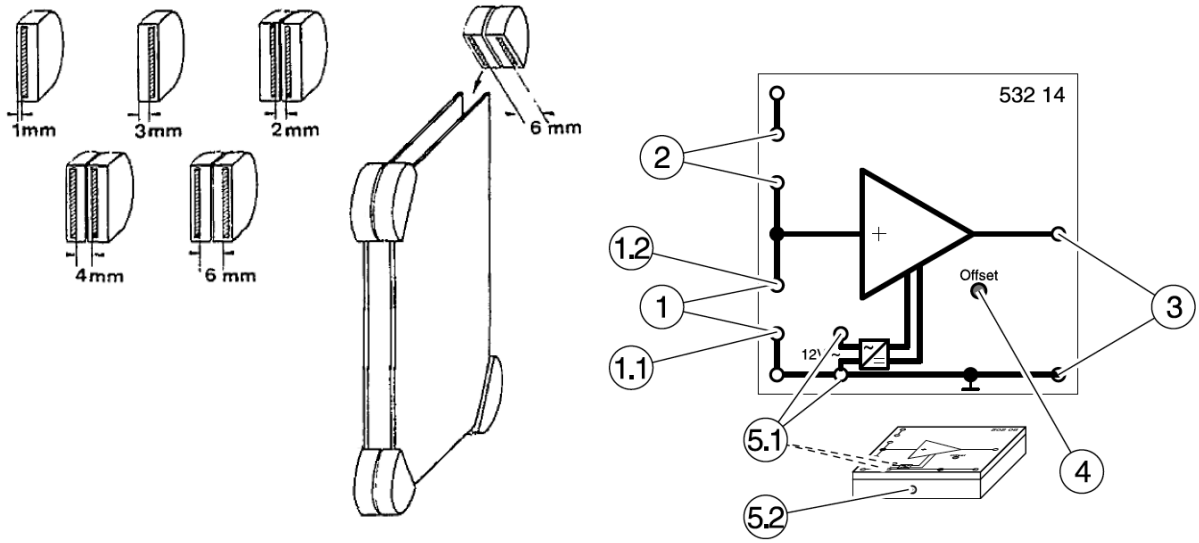


Figure 9: système d'entretoises et branchement de l'électromètre

2. Travail expérimental

2.1. Protocole de mesure

Pour chaque mesure, le protocole est le suivant :

(i) établir la liaison AC avec le commutateur.

(ii) régler la différence de potentiel U à la valeur souhaitée.

(iii) décharger le condensateur plan en touchant la plaque reliée à la borne A du commutateur avec la tige métallique et vérifier que la charge mesurée par l'électromètre est bien à zéro.

(iv) à partir de là, garder la tige métallique en main de sorte que la masse de l'électromètre soit bien reliée à la terre.

(v) mettre le commutateur en position AB et charger le condensateur0

(vi) revenir à la liaison AC et relever la différence de potentiel UEL immédiatement.

2.2. Mesures

2.2.1. Évaluation des incertitudes

Les valeurs de C et Q seront calculées à partir des équations de la partie théoriques. Les capacités C étudiées étant petites devant la capacité C_{ref} de référence, nous aurons toujours $U_{EL} << U$. Afin d'éviter toute erreur de mesure, chaque relevé sera effectué 3 fois.

2.2.2. Évolution de la charge en fonction de la différence de potentiel

Utilisez les petites plaques, fixez la distance entre les plaques à d = 2 mm et faites les mesures pour une différence de potentiel appliquée U fixée à 75 V puis 150, 225 et 300 V.

Reportez dans un tableau les valeurs de U, ΔU, UEL, ΔUEL, Q et ΔQ. Tracez un graphique montrant l'évolution de Q en fonction de U. La charge accumulée est-elle bien proportionnelle à la différence de potentiel appliquée ?

2.2.3. Évolution de la capacité en fonction de la distance entre les plaques

Utilisez les petites plaques et faites les mesures pour une différence de potentiel appliquée U de 200 V et une distance d entre les plaques de 1, 2, 3, 4 et 6 mm.

Reportez dans un tableau les valeurs de d, UEL, ΔUEL, C et ΔC. Tracez un graphique montrant l'évolution de C en fonction de 1/d. Obtenez-vous une droite ? Passe-t-elle par l'origine ? Interprétez.

S'il existe une capacité parasite parallèle à celle du condensateur plan, la capacité totale s'écrit : C_tot=C+ C_par

Toujours avec le même protocole expérimental, mesurez cette capacité parasite en déconnectant la plaque du condensateur normalement reliée à l'entrée A. Evaluez l'incertitude sur cette mesure.

Reportez cette mesure sur le graphique précédent. Ce point est-il cohérent avec les autres ? Comment la capacité du condensateur plan dépend-t-elle de la distance entre les plaques ?

2.2.4. Évolution de la capacité en fonction de la surface des plaques

Utilisez les grandes plaques, fixez la distance entre les plaques à d = 2 mm et mesurez la capacité C(S2) pour une différence de potentiel appliquée U de 150 V et en tenant compte de la capacité parasite. Evaluez l'incertitude sur cette mesure.

Calculez le rapport r entre la valeur C(S2) obtenue pour les plaques de surface S2 = 800 cm2 et C(S1) obtenue dans les mêmes conditions pour les plaques de surface S1 = 400 cm2, ainsi que son incertitude. Comparez ce rapport à ce que prévoit l'équation la théorie. La capacité du condensateur plan est-elle bien proportionnelle à la surface des plaques ?

2.2.5. Détermination de la permittivité relative du polystyrène

Utilisez les grandes plaques et insérez la plaque de polystyrène, dont l'épaisseur est de 4 mm. Maintenez les plaques en appui grâce aux pinces plastiques. Mesurez la capacité Ctot pour une différence de potentiel appliquée de 200 V, en considérant la présence d'une capacité parasite. Evaluez l'incertitude sur cette mesure.

En admettant que la permittivité de l'air est très proche de celle du vide, déterminez la permittivité relative du polystyrène ε_r à partir de Ctot en utilisant la théorie. Calculez l'incertitude associée $\Delta\varepsilon_r$ et conclure.

Ch. 5 : Etude de mouvements rectiligne et circulaire dans un référentiel galiléen

1. Travail de préparation

On appelle référentiel un système d'axes lié à un solide indéformable. Un observateur, immobile par rapport à ce référentiel, pourra décrire le mouvement d'un objet : mouvement de la Terre dans un référentiel héliocentrique, mouvement d'un satellite dans un référentiel géocentrique, ou d'un ballon dans un référentiel terrestre.

Une fois le référentiel choisi, il est nécessaire de définir un repère, c'est-à-dire une base orthonormée de vecteurs, permettant de déterminer les coordonnées du point matériel dont on étudie le mouvement. Il permet également de définir les composantes de tout vecteur associé au mouvement de ce point (vitesse. Force, etc.. .). Ainsi, la position d'un point M est définie dans un référentiel par les coordonnées du vecteur OM, où O est un point fixe du référentiel.

- Equation horaire et trajectoire : Le mouvement d'un point M conduit a étudier l'évolution de ce dernier au cours du temps et a donner l'équation horaire du mouvement par OM (t) ou ses composantes dans le repère choisi. La courbe décrite par un point M au cours du mouvement est appelée trajectoire.

  Equations horaires du mouvement : ce sont les fonctions $\{x(t), y(t), z(t)\}$ ou $\{\rho(t), \theta(t), z(t)\}$ ou $\{r(t), \theta(t), \varphi(t)\}$ selon le repère choisi.

  Equation de la trajectoire : C'est la relation liant x, y, z ou ρ, θ, z ou r, θ, φ indépendamment du temps selon le repère choisi.

- Vitesse : si, à l'instant t_1, le point M occupe la position M1, et à l'instant t_2 la position M2, la vitesse moyenne $\overrightarrow{Vmoy}$ s'exprime: $\overrightarrow{Vmoy} = \frac{\overrightarrow{M1M2}}{t2-t1} = \frac{\overrightarrow{OM1} - \overrightarrow{OM2}}{t2-t1}$

La notion de vitesse instantanée découle de cette définition. En effet, en prenant des positions séparées par un intervalle de temps dt de plus en plus court, on se rapproche de la vitesse à un instant donné. On définit alors la vitesse instantanée comme étant :

$$\overrightarrow{v(t)} = \lim_{\Delta i \to 0} \frac{\overrightarrow{\Delta OM}}{\Delta t} = \frac{\overrightarrow{dOM(t)}}{dt}$$

- Accélération : De la même façon, on définit le vecteur accélération instantanée comme la dérivée par rapport au temps du vecteur vitesse :

$$\overrightarrow{a(t)} = \frac{\overrightarrow{dv(t)}}{dt} = \frac{\overrightarrow{d^2OM(t)}}{dt^2}$$

1.1. Mouvement rectiligne

La trajectoire du point M est une portion de droite que l'on choisit selon la direction (Ox) portant le vecteur unitaire $\vec{\imath}$ pour simplifier les calculs. Les conditions initiales seront les suivantes $x(t=0)=0$ et $v(t=0)=v_0$.

On a alors à l'instant t : $x=\overline{OM};\ \vec{v}=\dot{x}\vec{\imath};\ \vec{a}=\ddot{x}\vec{\imath}$. Deux cas sont possibles :

- <u>Mouvement rectiligne uniforme</u> : $\vec{v}(t)=\overrightarrow{v_0}=\overrightarrow{cst}=v_0\vec{\imath}\Rightarrow\vec{a}=\vec{0}$

  Donc l'équation différentielle du mouvement est $\dot{x}=v_0$ et l'équation horaire est $x(t)=v_0t$.

- <u>Mouvement rectiligne uniformément accéléré</u> : $\vec{a}(t)=\vec{a}_0=\overrightarrow{cst}$

  L'équation différentielle du mouvement est $\ddot{x}=a_0$

  La vitesse est $v(t)=\int a\,dt=\int a_0dt=a_0t+v_O$

  L'équation horaire est $x(t)=\int(a_0t+v_O)dt=\frac{1}{2}a_0t^2+v_0t$.

1.2. Mouvement circulaire uniforme

La trajectoire du point M est définie par un cercle de centre O et de rayon R. Le tableau résume les vecteurs position, vitesse et accélération du point M dans les 3 différents systèmes de coordonnées :

	VECTEUR POSITION $\overrightarrow{OM}$	***VITESSE*** $\vec{v}$	***ACCÉLÉRATION*** $\vec{a}$
CARTÉSIEN $(\vec{\imath},\vec{\jmath})$	$r\cos\theta\,\vec{\imath}+r\sin\theta\,\vec{\jmath}$	$r\dot{\theta}(-\sin\theta\,\vec{\imath}+\cos\theta\vec{\jmath})$	$r\left(-\ddot{\theta}\sin\theta-\dot{\theta}^2\cos\theta\right)\vec{\imath}$ $+r\left(\ddot{\theta}\cos\theta-\dot{\theta}^2\sin\theta\right)\vec{\jmath}$
POLAIRE (z=0)	$\rho\vec{u}_\rho$	$\rho\dot{\theta}\vec{u}_\theta$	$-\rho\dot{\theta}^2\vec{u}_\rho+\rho\ddot{\theta}\vec{u}_\theta$
FRENET	$s(t)=R\theta(t)$ *(abscisse curviligne)*	$R\dot{\theta}\vec{T}$	$R\ddot{\theta}\vec{T}+R\dot{\theta}^2\vec{N}$

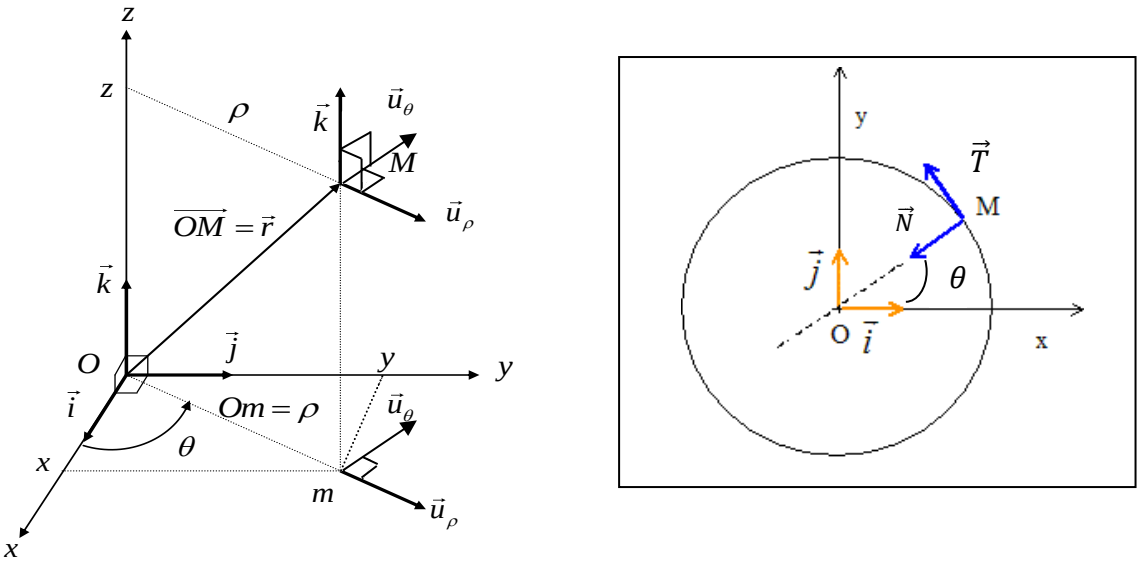


Figure 10 : Repères cartésien, polaire et Frénet

Si la vitesse angulaire ω_0 reste constante, le mouvement est donc circulaire uniforme :

$$\frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} = \ cst = \omega_0 \Leftrightarrow \theta = \omega_0 t$$

avec la condition initiale $\theta(t = 0) = 0$.

Dans le repère de Frénet et après simplifications, on obtient :

$$\vec{v} = R\omega_0\vec{T} \text{ et } \vec{a} = R{\omega_0}^2\vec{N}.$$

1.3. Détermination théorique de g

Soit un mobile autoporteur A de masse *M* uniformément accéléré par un bloc B de masse *m* à l'aide d'une poulie :

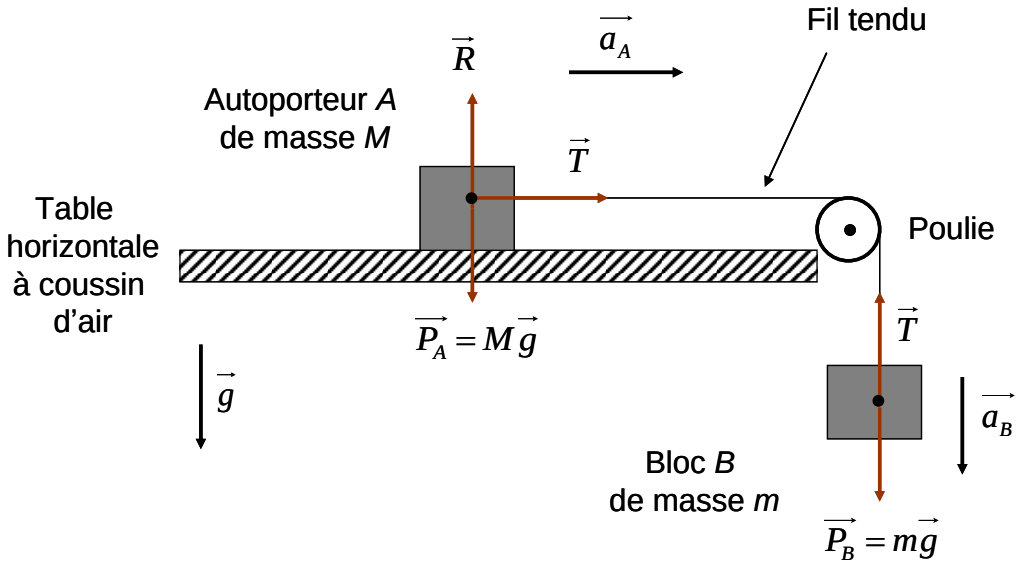


Figure 11 : mobile autoporteur A de masse M, *bloc B de masse* m et *poulie*

A partir du bilan des forces et du principe fondamental de la dynamique (PFD) appliqué :

- Sur le mobile autoporteur A, d'accélération $\overrightarrow{a_A}$:

  Bilan des forces : Poids $\overrightarrow{P_A} = M\vec{g}$, la réaction du support sur le mobile $\vec{R}$ et la tension $\vec{T}$ du fil.

  PFD : $\overrightarrow{P_A} + \vec{R} + \vec{T} = M\overrightarrow{a_A}$

- Sur le bloc B, de masse m et d'accélération $\overrightarrow{a_B}$:

  Bilan des forces : Poids $\overrightarrow{P_B} = m\vec{g}$ et la tension $\vec{T}$ du fil (on remarquera que la tension $\vec{T}$ appliquée en A est la même que celle appliquée en B).

  PFD : $\overrightarrow{P_B} + \overrightarrow{T} = m\overrightarrow{a_B}$

En négligeant les frottements présents au niveau de la poulie, on peut alors considérer que $\|\overrightarrow{a_A}\| = \|\overrightarrow{a_B}\| = a$. En projetant les deux équations précédentes sur un axe horizontal et un axe vertical adaptés au système, on obtient la relation suivante : $g = \frac{M+m}{m}a$.

1.4. Dispositif expérimental

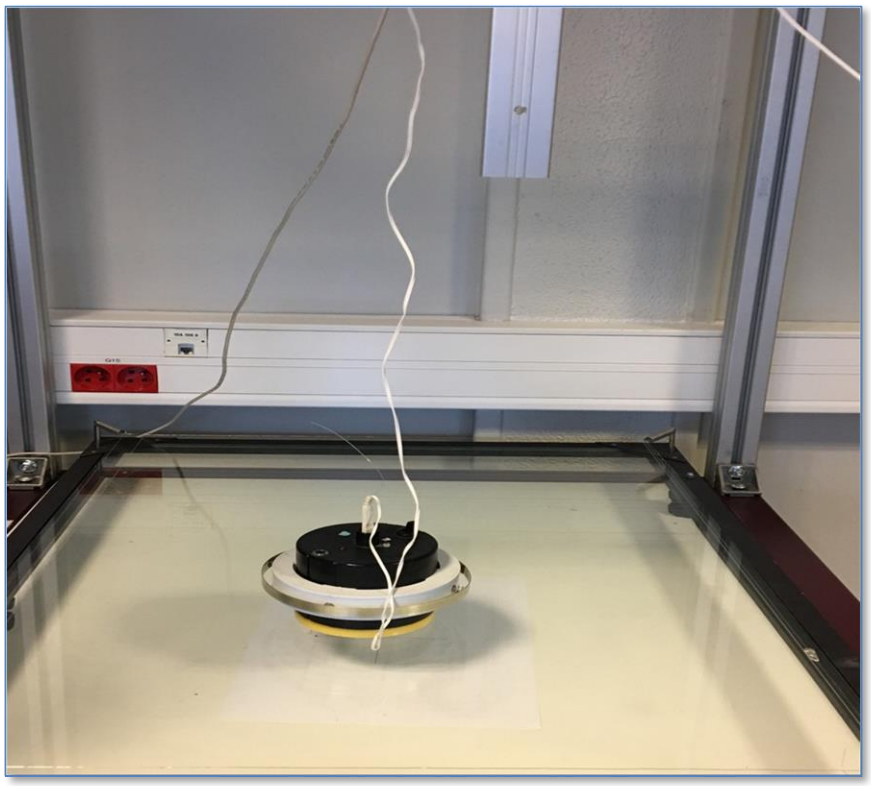


Figure 12 : montage expérimental, mobile autoporteur sur une table à coussin d'air

Un mobile autoporteur de masse *M* se déplace sans frottements sur une table à coussin d'air. La trajectoire du mobile aux instants déterminés peut être visualisée par acquisition vidéo à

l'aide d'une webcam positionnée au-dessus de la table couplée à un ordinateur équipé d'un logiciel de traitement vidéo (ici Cinéris). La fréquence d'acquisition des images dépend alors du logiciel et des capacités de la caméra.

Le TP comprend deux parties distinctes :

- Pour réaliser une mesure de g : l'accélération de la pesanteur, nous avons à disposition une poulie pouvant s'accrocher au bord de la table à coussin d'air ainsi qu'une bobine de fils.
- Pour réaliser le mouvement circulaire, on accrochera le mobile autoporteur à un point fixe par l'intermédiaire d'un fil.

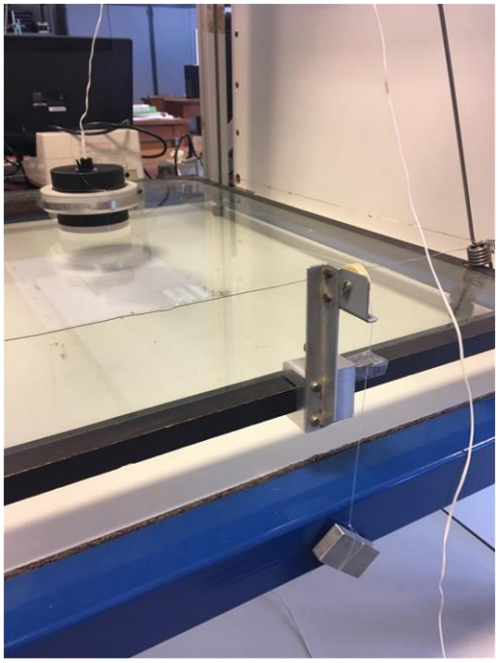


Figure 13 : Masse accroché au mobile autoporteur par l'intermédiaire d'une poulie

2. Travail expérimental

2.1. Protocole de mesure

Pour les deux expériences, le protocole est le suivant :

i. La trajectoire du mobile est enregistrée à l'aide d'une webcam et du logiciel Cinéris.

ii. A partir de la vidéo obtenue, un pointage de la position du mobile est réalisé avec Cinéris. Un repère orthonormé gradué sera défini au préalable dans Cinéris.

iii. Les données enregistrées sont présentées dans un tableau de Cinéris et vont permettre d'extraire les différents paramètres caractérisant le mouvement.

2.2. Mesures et exploitation des résultats

2.2.1. Détermination de l'accélération de la pesanteur g

Pour trois couples de masses (M,m), appliquer le protocole précédent :

i. Réaliser et enregistrer à l'aide de Cinéris la trajectoire du mobile.

ii. Ensuite pointer la position du mobile à partir de la vidéo et déduire la vitesse et l'accélération instantanées.

iii. A partir des données obtenues, déterminer l'accélération a du mouvement et estimer son incertitude Δa . On considérera uniquement la partie de la trajectoire correspondant à un mouvement rectiligne uniformément accéléré ($a = cste$).

Et déduire la constante de gravitation g et son incertitude Δg.

2.2.2. Etude d'un mouvement circulaire uniforme ($\omega = cste$)

Pour trois rayons R :

i. Réaliser et enregistrer à l'aide de Cinéris la trajectoire du mobile $x(t)\ et\ y(t)$. Pointer la position du mobile à partir de la vidéo.

- Tracer $y = f(x)$ et $R_{exp} = f(t)$. En déduire le rayon moyen de la trajectoire circulaire et le comparer au rayon R fixé au départ.
- Déduire les vitesses instantanées et les accélérations instantanées à partir des coordonnées $x(t)\ et\ y(t)$.
- Tracer les graphes suivants : $v = f(t)$ et $a = f(t)$.
- En déduire la vitesse et l'accélération moyennes du mobile.

ii. La vitesse angulaire instantanée ω d'un solide est le rapport de la variation de l'angle θ au cours du temps Δt : $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$.

- Déterminer la valeur moyenne de la vitesse angulaire ω pour chaque enregistrement. Vérifier l'équation $v = R\dot{\theta} = R\omega$.
- Comparer l'accélération déterminée à partir de son expression dans le repère de Frénet avec l'accélération obtenue à partir des positions $x(t)\ et\ y(t)$.

Ch. 6 : Etude de l'oscillateur harmonique libre dans un référentiel galiléen

1. Travail de préparation

1.1. Equation du mouvement d'un pendule simple

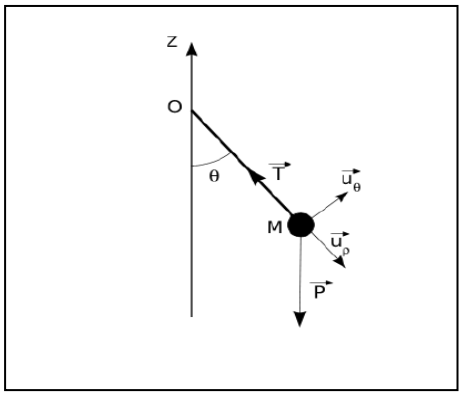
On considère une masse ponctuelle m accrochée à un fil tendu de masse négligeable et de longueur inextensible l. L'autre extrémité du fil situé au point O, est accrochée à un axe horizontal. Le fil peut osciller, sans frottement dans un plan vertical. La position de la masse m est repérée à chaque instant par son vecteur position $\overrightarrow{OM}$. L'angle θ est l'angle que fait le fil avec la verticale à chaque instant. On négligera les frottements dus à l'air.

Les conditions initiales sont les suivantes :

$$\theta(t=0) = \theta_0$$

$$\dot{\theta}(t=0) = 0$$

La trajectoire de la masse m est un arc de cercle. On utilisera les coordonnées polaires $(\overrightarrow{u_\rho}, \overrightarrow{u_\theta})$.



- Bilan des forces sur la masse m :
- le poids $\vec{P} = m\vec{g} = mg(\cos\theta\,\overrightarrow{u_\rho} - \sin\theta\,\overrightarrow{u_\theta})$
- la tension du fil : $\vec{T} = T\,\overrightarrow{u_\rho}$ (dirigée de M vers O)

- Principe fondamental de la dynamique (PFD) :
- $\vec{P} + \vec{T} = m\,\vec{a}$

$\vec{a}$: l'accélération de m dans le référentiel terrestre supposé Galiléen

g : l'accélération de la pesanteur à la surface de la terre $g = 9.81 \pm 0.12\ m.s^{-2}$

Les vecteurs position, vitesse et accélération sont donnés par :

Vecteur position	Vecteur vitesse	Vecteur accélération
$\overrightarrow{OM} = l\vec{u}_\rho$	$\vec{v} = l\dot{\theta}\vec{u}_\theta$	$\vec{a} = -l\dot{\theta}^2\vec{u}_\rho + l\ddot{\theta}\vec{u}_\theta$

A partir du PFD et en projetant sur $\vec{u}_\theta$ on obtient :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{\ell}\sin\theta = 0 \quad \text{(équation 6.1)}$$

C'est une équation différentielle du second ordre et non linéaire (à cause du terme $\sin\theta$). Cette équation est appelée équation différentielle du mouvement de M en θ en fonction du temps que doit satisfaire la fonction $\theta(t)$.

Pour de petits angles d'oscillation, on peut faire l'approximation $\sin\theta \sim \theta$, et l'équation 6.1 devient :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{\ell}\theta = 0$$

C'est l'équation d'un oscillateur harmonique de pulsation $\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$. On en déduit que : **Pour de faibles amplitudes des oscillations**, la période du pendule est $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$. Cette expression est remarquable car la période T_0 ne dépend pas de la masse *m* ni de l'amplitude des oscillations. A partir des conditions initiales, on obtient la position de la masse m : $\theta(t) = \theta_0 \cos\ \omega_0 t$.

Il faut bien faire attention et se rappeler que l'expression donnant T_0 n'est valable que pour de faibles angles. Quand l'amplitude des oscillations devient plus grande, la période du pendule devient une fonction de l'amplitude des oscillations. On peut calculer les corrections à l'approximation des petits angles, la période du pendule peut s'écrire sous la forme d'une série.

$$T = T_0\left\{1+\left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right)+\left(\frac{1\times3}{2\times4}\right)^2 \sin^4\left(\frac{\theta_0}{2}\right)+\left(\frac{1\times3\times5}{2\times4\times6}\right)^2 \sin^6\left(\frac{\theta_0}{2}\right)+\ldots\right\}$$

La période T_1 du pendule compte tenu de la première correction à l'approximation des petits angles, pour la période du pendule est donc : $T_1 = T_0\left(1+\frac{\theta_0^2}{16}\right)$.

1.2. Force de rappel d'un ressort

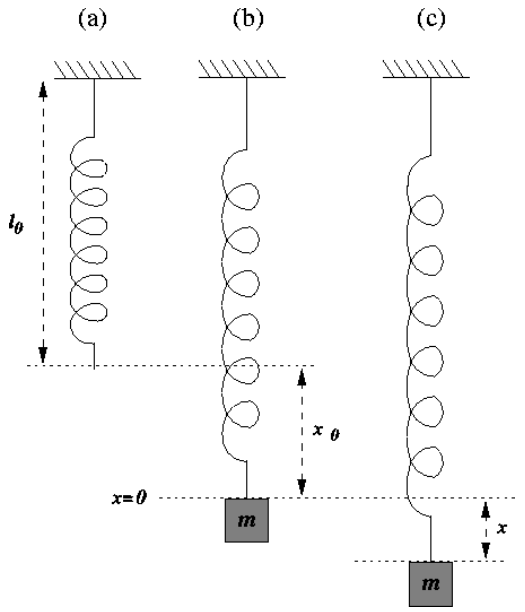


Figure 14 a) ressort à vide, b) ressort chargé, c) ressort chargé en mouvement

La figure 14.a montre le ressort à vide caractérisé par sa constante de raideur *k* et sa longueur à vide l_0.

La figure 14.b montre le même ressort auquel est suspendue une masse *m*, considérée comme ponctuelle, provoquant ainsi un allongement x_0 du ressort.

Ce système mécanique au repos doit vérifier l'équilibre des forces entre le poids de la masse et la force dite de rappel du ressort. Les forces de frottement sont supposées négligeables.

1.2.1. Détermination de la constante de raideur k d'un ressort à partir de la loi de Hooke

La loi de Hooke montre que la force de rappel $\overrightarrow{F}$ d'un ressort de norme $F = kx$ avec k la constante de *raideur* propre du ressort et x l'allongement du ressort par rapport à sa position d'équilibre sous l'effet de la masse (figure 14.c). Cette force tend à ramener la masse à sa position d'équilibre.

Dans l'hypothèse d'un ressort vertical, il n'y a pas de force de réaction à prendre en compte contrairement au cas d'un ressort horizontal reposant sur une surface. La relation vectorielle d'équilibre est donc simplement $\vec{F} + \vec{P} = \vec{0}$, avec le poids $\vec{P} = m\vec{g}$.

Ces deux forces étant suivant la direction verticale et de sens opposés, nous en déduisons directement qu'à l'équilibre, l'intensité de la force de rappel du ressort :

$$F = kx_0 = mg \text{ (figure 14.b)}$$

1.2.2. Détermination de la constante de raideur k d'un ressort à partir d'une étude du mouvement d'oscillations libres

Nous prenons comme origine de l'axe vertical la position d'équilibre de la masse. Considérons maintenant que nous donnons une certaine élongation initiale au ressort par rapport à la position d'équilibre (figure 14.c). Lorsque nous relâchons la masse, nous observons un mouvement oscillatoire autour de la position d'équilibre. La valeur de l'élongation du ressort par rapport à cette origine à un instant *t* est appelée *x(t)*.

- L'expression de l'élongation en fonction du temps peut se déterminer à partir du PFD : $\vec{F} + \vec{P} = m\vec{a}$

Avec $\vec{a}$: l'accélération de m dans le référentiel terrestre supposé Galiléen.

- En projetant cette relation vectorielle suivant l'axe vertical (Ox), on obtient :

$$-k(x + x_0) + mg = ma_x = m\frac{d^2(x + x_0)}{dt^2} = m\frac{d^2x}{dt^2}$$

Or, à l'équilibre nous avons vu que $kx_0 = mg$. On en déduit l'équation différentielle à une dimension du second ordre à coefficients constants et sans second membre décrivant le mouvement de la masse :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad \textit{(équation 6.2)}$$

Cette équation différentielle est caractéristique d'un mouvement sinusoïdal de pulsation propre $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$. La solution générale (équation horaire du mouvement) est donc de la forme :

$$x(t) = A\sin(\omega_0 t + \varphi) \textit{ (équation 6.3)}$$

A et φ étant des constantes d'intégration qui dépendent des conditions initiales du mouvement.

Si les conditions initiales sont $x(t = 0) = a$ et $\dot{x} = 0$, alors $\varphi = 0$ et $A = a$.

Au final, on a $x(t) = a\sin\omega_0 t$.

Il est intéressant de noter que ω_0 ne dépend pas de l'amplitude du mouvement. La période T est ici définie par :

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \textit{(équation 6.4)}$$

1.3. Dispositif expérimental

Toutes les horloges modernes fonctionnent sur la base d'un phénomène périodique, c'est-à-dire un phénomène qui se répète de manière identique à intervalles réguliers : par exemple, l'oscillation du balancier dans les horloges mécaniques ou l'oscillation beaucoup plus rapide des atomes dans les horloges atomiques qui servent de référence pour l'étalon de temps par exemple. L'objet de ce TP est l'étude des lois de variation de la période d'oscillation d'un pendule pesant en fonction des différents paramètres accessibles. Les résultats expérimentaux seront confrontés au modèle dit du « pendule simple ». On mesurera par exemple la période du pendule, dans le but de déterminer pour quelles valeurs de l'amplitude l'approximation des petites oscillations est applicable.



Figure 15 : montage expérimental du pendule (masse+ressort)

Deux pendules différents sont proposés :

Le premier est un « balancier » constitué d'un fil qui oscille autour d'un axe fixe. Le fil est fixé à l'axe, au milieu d'un disque gradué. A l'extrémité du fil est attaché un cylindre de masse *m*, à une distance *l* réglable.

Le second est constitué d'une masse considérée comme ponctuelle oscillant à l'extrémité d'un ressort à spires (ici vertical), l'autre extrémité étant fixe. La masse du ressort est négligée ainsi que les frottements et la résistance de l'air. Les oscillations se font le long de l'axe vertical et sont caractéristiques du pendule.

Ces systèmes mécaniques sont aussi appelés « oscillateurs harmoniques » car la position, la vitesse et l'accélération de la masse ponctuelle sont des fonctions sinusoïdales du temps qui donnent lieu à des mouvements périodiques.

On dispose d'une caméra couplée à un ordinateur (logiciel Cinéris) pour mesurer continûment la déviation angulaire θ ou le déplacement (x, y) du pendule par rapport à sa position d'équilibre en fonction du temps *t*. La période des oscillations sera déduite des données numériques déduites des images fournies par la caméra.

2. Travail expérimental

2.1. Protocole de mesures

Pour les deux expériences, le protocole est le suivant :

i. La trajectoire de la masse m est enregistrée à l'aide de la webcam et du logiciel Cinéris.

ii. A partir de la vidéo obtenue, un pointage de la position de la masse est réalisé avec Cinéris. Un repère orthonormé gradué sera défini au préalable dans Cinéris.

iii. Les données enregistrées sont présentées dans un tableau de Cinéris et vont permettre d'extraire les différents paramètres caractérisant le mouvement.

2.2. Mesures et exploitation des résultats

2.2.1. Etude des oscillations dans un plan vertical avec le pendule simple (fil+masse)

a) Mesurez la période T_{exp} du pendule pour plusieurs valeurs de l'amplitude θ_0 dans l'intervalle [5°, 70°] (effectuez des mesures tous les 5° jusqu'à 25° et ensuite tous les 10° jusqu'à 70°). Pour apprécier la période du pendule, on mesurera le temps correspondant à une dizaine d'oscillations, pourquoi ?

b) Pour chaque valeur de θ_0, on fera trois mesures de la période et on estimera l'incertitude ΔT sur la mesure de la période. On reportera ces résultats dans un tableau.

c) Mesurez la longueur l et estimez son incertitude Δl. Calculez la valeur théorique $T = T_0$ dans l'approximation des petits angles. Compte tenu des incertitudes Δl et $\Delta g = 0.12\ m.s^{-2}$. Calculer ΔT_0 l'incertitude sur T_0.

d) Faire un graphique sur du papier millimétré représentant la période T_{exp} en fonction de θ_0. On reportera sur ce graphique la valeur théorique $T = T_0$ calculée ci-dessus. On tracera aussi les incertitudes de mesure ainsi que l'incertitude sur la valeur théorique ΔT_0.

e) Pour quelles valeurs de l'amplitude θ_0 l'expression théorique T_0, est-elle suffisante pour décrire vos résultats de mesure ? Justifier précisément votre réponse.

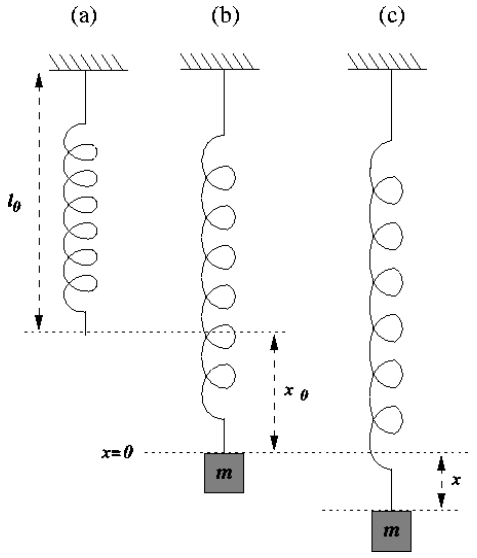
f) Pour quelles valeurs de θ_0 l'expression T_1, est-elle suffisante pour décrire vos résultats de mesure ? Justifier précisément votre réponse.

2.2.2. Etude des oscillations suivant un axe vertical avec le pendule masse + ressort

Détermination de k par la loi de Hooke :

a) Mesurer la longueur à vide du ressort en évaluant l'incertitude de la mesure.
b) Mesurer les masses de 5 masses différentes et indiquer l'incertitude de mesure Δm. Déterminer la dimension de k.
c) Mesurer l'allongement x_0 pour toutes les masses précédentes. Attendre que le système soit à l'équilibre avant de faire la mesure. Indiquer les incertitudes de mesure. Présenter les résultats sous forme de tableau.
d) Tracer sur un graphe x_0 en fonction de m_i en indiquant comme il se doit les rectangles d'incertitudes.
e) Déterminer la pente et en déduire la valeur de k du ressort ainsi que son incertitude absolue Δk en utilisant la méthode des droites de pentes extrêmes.

Détermination de k à partir des oscillations :



a) ressort à vide, b) ressort chargé, c) ressort chargé en mouvement

1. En déplaçant la masse m de sa position d'équilibre vers le bas, mesurer à l'aide d'un chronomètre 10 périodes d'oscillation pour trois masses différentes. On appellera t le temps mesuré. Evaluer Δt et présenter les résultats dans un tableau. En déduire T et ΔT.
2. Vérifier, pour une masse quelconque, que la période d'oscillations ne dépend pas de l'état initial. Donner les résultats pour deux élongations différentes et commenter.
3. Représenter graphiquement $m = f(T^2)$.
4. En déduire la valeur de k et Δk pour le ressort.

Cette méthode est-elle plus précise que celle employée précédemment ? Justifier la réponse en s'appuyant sur les incertitudes relatives.