



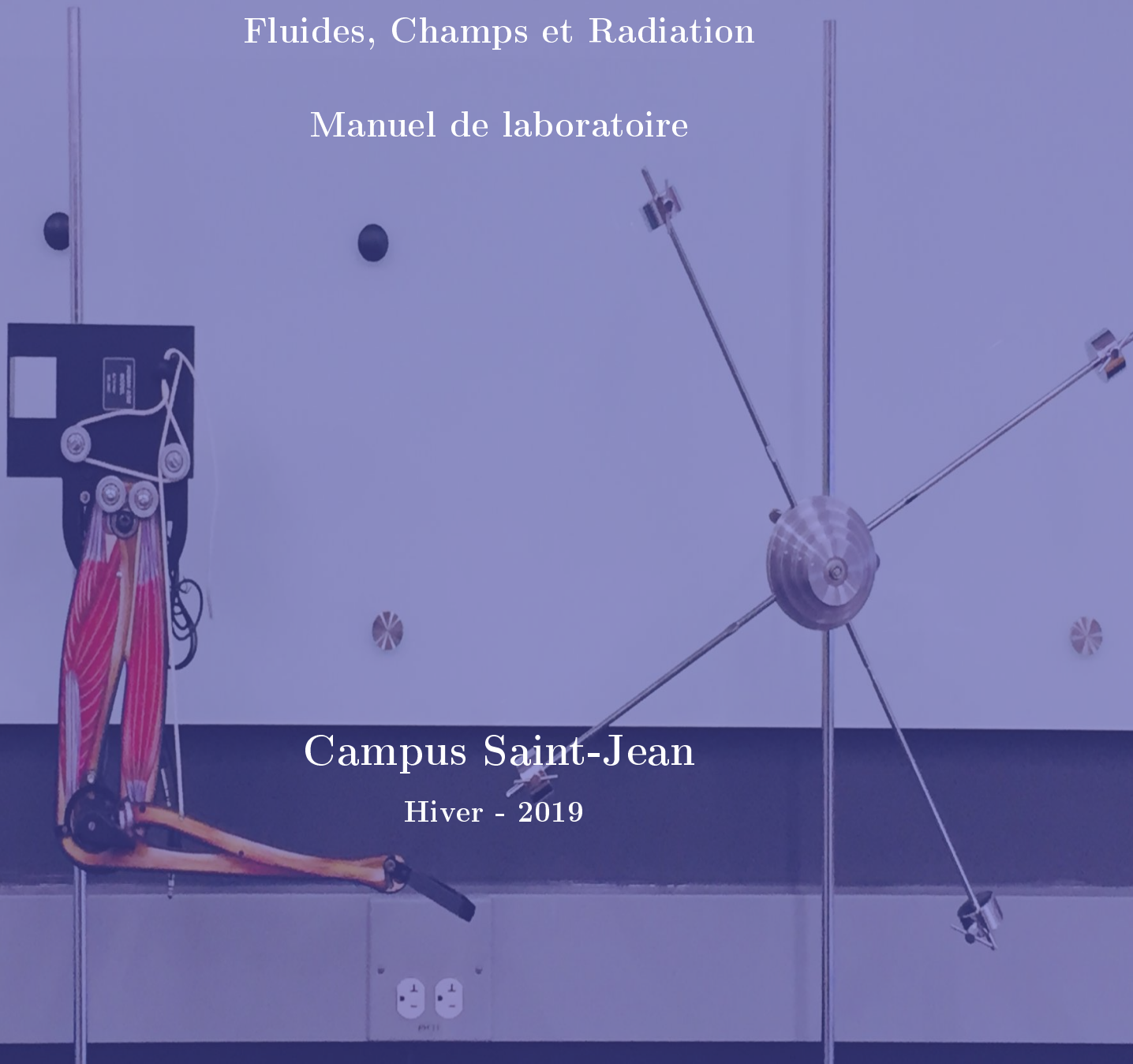
PHYSQ 126

Fluides, Champs et Radiation

Manuel de laboratoire

Campus Saint-Jean

Hiver - 2019





PHYSQ 126

Fluides, Champs et Radiation

Manuel de laboratoire

Coordonnatrice: Filsan Ahmed

Campus Saint-Jean

Hiver - 2018

Horaire des laboratoires

Semestre d'hiver 2019

Semaine du	Mardi	Jeudi
7 - 11 Janvier	Pas de laboratoire	Pas de laboratoire
14 - 18 Janvier	Pas de laboratoire	Vitesse limite dans un fluide
21 - 25 Janvier	Vitesse limite dans un fluide	Propriétés des fluides
28 Sept - 1 Fév	Propriétés des fluides	Potentiel électrostatique et champ
4 - 8 Février	Potentiel électrostatique et champ	Condensateurs et capacité
11 - 15 Févrie	Condensateurs et capacité	Pas de laboratoire
18 - 22 Févrie	Semaine de lecture	Semaine de lecture
25 Fév - 1 Mars	Pas de laboratoire	Résistances
4 - 8 Mars	Résistances	Lois de Kirchhoff
11 - 15 Mars	Lois de Kirchhoff	Pas de laboratoire
18 - 22 Mars	Pas de laboratoire	Force magnétique sur un courant
25 - 29 Mars	Force magnétique sur un courant	Champ magnétique induit
1 - 5 Avril	Champ magnétique induit	Pas de laboratoire

**FACULTÉ SAINT-JEAN
UNIVERSITY OF ALBERTA
PHYSIQUE 126**

MANUEL DE LABORATOIRE 2018-2019

Table des matières

Introduction

Exemple de rapport scientifique

Expériences

1. Vitesse limite dans un fluide [rapport court]
2. Propriétés des fluides [rapport court]
3. Potentiel électrostatique et champ [rapport court]
4. Condensateurs et capacité [rapport complet]
5. Résistances [rapport complet]
6. Lois de Kirchhoff [rapport court]
7. Force magnétique sur un courant [rapport court]
8. Champ magnétique induit [rapport court]

Annexes

INTRODUCTION

Chers étudiants,

Bienvenue au laboratoire de PHYSQ 126! Nous espérons que vous trouverez dans ce laboratoire une expérience éducative riche. Ce laboratoire vous donnera une occasion unique d'effectuer des recherches expérimentales sur les phénomènes sous-jacents et les lois physiques qui seront présentées dans le cours de physique d'un point de vue théorique.

En plus des compétences pratiques impliquant une gamme d'appareils scientifiques, vous apprendrez des méthodes expérimentales de base en science, y compris l'acquisition de données et des analyses quantitatives. Ce dernier comprend des méthodes statistiques et des outils numériques qui sont utilisés pour analyser de grandes séries de données recueillies avec des logiciels scientifiques. Vous apprendrez à quantifier les erreurs et à les calculer, à effectuer une analyse de régression, à visualiser les données et à analyser cette information.

Après chaque expérience, vous allez préparer et soumettre électroniquement ou en format papier un rapport de laboratoire décrivant vos résultats et votre analyse de données. La création de ces rapports vous dotera de solides compétences en rédaction technique et en transfert d'information. Cela conduira également à une compréhension plus profonde des lois fondamentales de la physique.

Pendant ce laboratoire, vous travaillerez avec un partenaire, seul un groupe de deux est autorisé sauf dans le cas où le nombre d'inscrit dans une section est impair. Au début du laboratoire, votre instructeur de laboratoire fera des commentaires sur les rapports de la semaine dernière, et donnera une brève introduction à l'expérience que vous effectuerez.

INFORMATIONS GÉNÉRALES DU LABORATOIRE

1. Horaire

L'horaire du laboratoire est disponible sur la page eclass du laboratoire et se trouve également dans votre manuel de laboratoire.

2. Responsabilité

Ce laboratoire a été équipé à un coût considérable. Il est donc essentiel que vous soyez attentifs à l'utilisation de l'équipement. Au début de chaque période de laboratoire, vous vérifiez la liste des matériels requis pour l'expérience (voir dans le manuel de laboratoire) pour confirmer que vous avez tout et qu'ils sont en bon état. Vous devez immédiatement signaler tout matériel manquant ou endommagé à votre instructeur. À la fin de chaque période, s'il vous plaît mettez votre station en ordre et vérifiez à nouveau que tout l'équipement est là. En suivant soigneusement et consciencieusement cette procédure simple, vous nous aiderez à assurer le bon fonctionnement des matériels et vous aiderez l'instructeur à maintenir le bon fonctionnement du laboratoire.

3. Crédit

Vos notes de laboratoire comptent pour 15% de votre note totale du cours. Vous devez obtenir au moins 50 % dans les laboratoires et les séminaires combinés afin de passer et d'obtenir un crédit pour l'ensemble du cours.

4. Présence

Votre présence au laboratoire et aux séances de séminaire est obligatoire. Votre instructeur vérifiera la présence au début de chaque session. Si votre nom n'y figure pas sur la liste de présence, vous recevrez un zéro pour ce rapport de laboratoire ou ce séminaire. Vous ne pouvez pas simplement remettre des rapports de laboratoire ou des séminaires sans participer à des séances de laboratoire.

5. Sessions manquées

Si vous manquez un laboratoire pour une raison médicale ou toute autre raison valable, vous pouvez demander une absence excusée à votre instructeur. Une seule absence excusée est permise pendant le terme. Il n'y a pas d'absences justifiées pour les séminaires manqués.

6. Grade du laboratoire

Trouver la bonne réponse est une bonne chose, mais il y a plus à faire pour obtenir une bonne note dans votre rapport. De plus, votre instructeur se penchera sur vos méthodes de raisonnements: le comment et le pourquoi.

Voici comment sera noté votre rapport:

- a. Un petit pourcentage de la note (5%) sera basé sur une présentation soignée et propre, selon l'évaluation de votre instructeur.
- b. Une évaluation du rapport basée sur la qualité des mesures, l'exactitude des calculs et l'analyse des résultats, la clarté de la discussion, l'exactitude des réponses aux questions et la propreté.
- c. Un rapport long compte pour 18 points et un rapport court pour 12 points.
- d. Enfin, une note globale de 5% sur l'ensemble du laboratoire durant le semestre vous sera attribué. Celle-ci prend en compte les retards, la performance de l'étudiant dans le laboratoire, y compris la préparation, l'attention, l'initiative, le niveau de participation au travail de groupe, l'habileté à faire les mesures, etc...

Vos notes pour chaque expérience seront disponibles sur eClass. Comparez ces résultats disponibles en ligne avec ceux écrits sur vos rapports et si vous croyez qu'une erreur s'est glissée lors de la compilation des notes, vérifiez auprès de votre instructeur de laboratoire.

7. Tricherie et plagiat

Les politiques sévères de l'Université de l'Alberta en matière de tricherie et plagiat seront observées selon le Code of Student Behavior (Annexe A du calendrier académique de l'université). Le fait de copier des travaux ou de tricher de quelque façon que ce soit est très grave et sera réprimandé sévèrement. Assurez-vous de bien comprendre les situations considérées comme de la tricherie. Notez que les comportements suivants sont considérés comme de la tricherie et/ou du plagiat:

- a. Copiage des questions préliminaires.
- b. Copiage des réponses d'une autre personne aux questions d'exercice/d'analyse de laboratoire.
- c. Copiage des rapports de laboratoire appartenant à une autre personne.
- d. Présentation du travail appartenant à une autre personne comme étant le sien.

8. Préparation.

Avant de venir au laboratoire, vous devriez lire:

- a. Les instructions pour votre expérience assignée,
- b. Les sections pertinentes de votre manuel, et les questions au début de l'expérience et celles des analyses à la fin de l'expérience, afin que vous puissiez chercher les réponses tout en effectuant l'expérience.

9. Expériences

Les expériences de laboratoire sont complémentaires aux théories discutées dans la classe. Il y aura des occasions où une expérience précède la théorie enseignée en classe. Il est de votre responsabilité de lire le matériel approprié dans le texte. Dans la plupart des cas, la présentation de la théorie en classe sera soit en parallèle, soit précédera l'expérience. Les expériences doivent être considérées comme une découverte et une confirmation des principes physiques sous-jacents. Elles ne doivent pas être considérées comme une recette d'étapes pour compléter l'expérience. De nombreuses expériences utilisent les tablettes et le système d'acquisition de données. Les données informatiques seront également analysées. N'imprimez pas tous les graphiques générés. Incluez dans votre rapport que ceux dont vous en avez besoin.

10. Matériels

Apportez toujours une calculatrice, du papier pour écrire, crayons et règle. Dans ce laboratoire, il est fortement recommandé d'apporter un ordinateur portable et un appareil photo numérique (ou votre cellulaire) afin de faire les graphiques demandés et commencer la rédaction de votre rapport.

11. Soumission du rapport

Un rapport pour chaque expérience est dû, et doit être remis, soit après deux jours ouvrables (rapport court) ou au début de la prochaine période de laboratoire (rapport long) suivant celle où l'expérience a été effectuée, et en fonction de ce que votre instructeur vous spécifiera. Lorsqu'un rapport n'est pas soumis à temps, la note du rapport de cette expérience est soumise à une pénalité de 10% pour le retard.

Rapport de laboratoire

L'étude de la physique expérimentale implique les étudiants dans le processus complet de la méthode scientifique: élaboration d'*hypotheses*, formulation d'une *théorie*, mesures et *observations*, interprétation des résultats et *vérification des hypotheses*, *compte rendu*. De plus, nous utiliserons des concepts tels que le calcul d'erreur, le contrôle des variables, l'utilisation de graphiques, etc. Finalement, les étudiants assimileront le langage scientifique et amélioreront leur habileté à rédiger un rapport logique et clair. Le rapport, ou *article scientifique*, constitue l'aspect "compte rendu" de la méthode scientifique.

Remarque

Un rapport long et détaillé *ne sera pas demandé* pour toutes les expériences. Dans la plupart des cas, nous ne demanderons que les réponses aux questions dans les protocoles, les tableaux d'observation, graphiques, et conclusion.

Rapports de laboratoire (ou "article scientifique")

Un rapport de laboratoire est un exemple de texte scientifique. Les caractéristiques essentielles d'un bon texte scientifique sont la *précision* du langage utilisé, la *clarté*, la *concision* et la *logique*. Le rapport n'est pas de la littérature, et le langage utilisé doit être simple. Un rapport doit être aussi concis et complet que possible.

Le format d'un rapport n'est pas rigide, mais contiendra typiquement les éléments suivants:

1. *Page titre*, contenant le titre, nom et no (et partenaire), instructeur de lab, date, section du cours, institution.

2. *Résumé*.

Une ou deux phrases suffisent en général.

3. *Théorie*.

Expliquez *brièvement* la théorie sous-jacente. Mentionnez les équations que vous voulez tester expérimentalement, et expliquez la signification des symboles utilisés. Assurez-vous que votre texte soit logique et que les équations soient expliquées de façon cohérente. Ne répétez pas inutilement les preuves et les équations intermédiaires déjà contenues dans le manuel de laboratoire.

4. *Matériel et méthode*.

Dressez un bref résumé de la méthode et du matériel utilisés. Cette section devrait être simple, claire et avoir un lien logique avec la théorie et le but de l'expérience. Un schéma du montage expérimental utilisé peut aider à expliquer le déroulement de l'expérience. Évitez d'inclure des étapes inutiles, par exemple, "on ouvre l'ordinateur".

5. *Observations et résultats.*

Cette section contient tous les résultats bruts des mesures et les estimations d'erreur, de même que les valeurs calculées avec erreur. Incluez des tableaux de vos mesures et des graphiques, si approprié. Pour certaines expériences, un logiciel (c.-à-d. Microsoft Excel) fera les calculs et tracera les graphiques pour vous. N'incluez pas une interprétation des résultats à ce stade-ci.

6. *Analyse des résultats (ou Discussion).*

Expliquez brièvement l'analyse des données, des graphiques, et le calcul des résultats, en incluant le calcul d'erreur, *si demandé*. Donnez aussi un exemple des quantités mesurées expérimentalement versus les valeurs prédites par la théorie (ici aussi, des tableaux risquent d'être utiles).

7. *Conclusion.*

Résumez vos résultats (tableaux, graphiques, etc.) et donnez leur signification. Avez-vous atteint ou non le(s) but(s) mentionné(s) au départ? Si non, pourquoi? Vérifiez si vos résultats concordent avec les valeurs théoriques, à erreur près. La conclusion ne devrait pas contenir d'information nouvelle, mais seulement faire ressortir les points importants de votre expérience.

8. *Questions.*

S'il y a des questions dans le guide de laboratoire, n'oubliez pas d'y répondre dans la section *Analyse des résultats*, plus haut.

La pondération de ces ingrédients diffère d'une expérience à l'autre. Pour certaines expériences, on vous demandera probablement de rédiger un *article scientifique*. Le format précis vous sera communiqué le cas échéant.

Prenez bien note que les figures et les tableaux doivent être numérotés de façon séquentielle comme figure 1, figure 2 ou tableau 1, tableau 2, etc., et toutes les figures doivent avoir une légende.

Enfin, une question commune que les élèves se posent est la longueur du rapport. Idéalement, nous vous laisserons décider de cela. Cependant, une bonne estimation pourrait être d'environ 3-4 pages, sans compter la première page de titre. Vous ne serez pas noté sur la longueur, mais sur le style et le contenu.

Aucune partie du rapport de laboratoire ne peut être faite à la main, sauf pour les dessins ou les diagrammes que vous pouvez décider de faire. On s'attend à ce que vous soyez en mesure de faire du traitement de texte de base et des graphiques, et des tableaux sous excel.

Exemple d'un rapport complet et d'un rapport court avec la pondération

1. Rapport complet

Ne considérez pas l'exemple ci-dessous comme le seul type de rapport possible, ni le meilleur. Il s'agit seulement d'une première illustration de ce que vous devriez remettre. Il contient cependant les qualités indispensables à un bon écrit scientifique (clarté, précision, concision, etc.).

Le format change d'une expérience à l'autre, et d'une personne à l'autre.

- Page titre
- Introduction (incluant le but général) (**1 point**)
- Théorie (incluant une hypothèse ou les équations à vérifier) (**1 point**)
- Méthode (incluant le matériel utilisé) (**2 points**)
- Observations et résultats (**4 points**)
- Analyse des résultats (incluant des exemples de calculs effectués, et les réponses aux questions posées dans le protocole, s'il y a lieu) (**8 points**)
- Conclusion (**2 points**)

2. Rapport court

- Page titre
- Observations et résultats (**4 points**)
- Analyse des résultats (incluant des exemples de calculs effectués, et les réponses aux questions posées dans le protocole, s'il y a lieu) (**6 points**)
- Conclusion (**2 points**)

Un exemple de rapport scientifique (complet) est présenté de la page 11 à 17.

1 Erreur sur les mesures

On entend par *erreur* le domaine possible de valeurs que peut prendre une certaine quantité. Une *erreur aléatoire* est due à des facteurs ordinaires hors de contrôle, et une *erreur systématique* est causée par un problème avec les outils de mesure ou avec les conditions externes. L'erreur sera exprimée sous forme d'*erreur absolue* (par ex. 10.0 ± 1.0 m/s) ou d'*erreur relative* (par ex. 10.0 m/s $\pm 10\%$). Notez que l'erreur absolue contient un chiffre significatif, mais qu'elle a la même précision (ou nombre de décimales) que la valeur de la quantité.

- Addition et soustraction : on additionne les erreurs absolues (par ex. si $z = x - y$, on a $\Delta z = \Delta x + \Delta y$)
- Multiplication et division : on additionne les erreurs relatives (par ex. si $z = xy$, on a $\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$)
- Multiplication par une valeur exacte: si $z = kx$, on a $\Delta z = k\Delta x$
- Puissance: on multiplie l'erreur relative par la puissance (par ex. si $z = x^n$, on a $\frac{\Delta z}{z} = n\frac{\Delta x}{x}$)
- Calcul direct: si $z = f(x)$ avec $x \pm \Delta x$, alors $\Delta z^+ = f(x + \Delta x) - f(x) \approx \Delta z^- = f(x) - f(x - \Delta x)$
- Calcul différentiel: si $z = f(x)$, alors $\Delta z = |f'(x)| \Delta x$

2 Graphiques et linéarisation graphique

- Soit $y = f(x)$, il arrivera que vous deviez tracer y (ordonnée) en fonction de x (abscisse).
- Pour une droite, on a $y = mx + b$, où m est la pente de la droite et b est l'ordonnée à l'origine.
- Si $y = f(x)$ n'est pas linéaire, on peut parfois linéariser l'équation en définissant de nouvelles variables X et Y , telles que $Y = mX + b$. Par ex. la loi d'Ohm donne $I = V/R$ qui n'est pas linéaire entre I et R . Avec $Y = I$ et $X = 1/R$, la loi d'Ohm devient $Y = VX$ et le graphique de Y en fonction de X est une droite dont $m = V$ et $b = 0$.
- Une linéarisation graphique n'est pas toujours possible, si l'équation est trop compliquée.

3 Logiciel graphique *Excel*

Il existe deux feuilles de calcul principales que les utilisateurs utilisent: *Microsoft Excel* et *Open Office Calc*. Heureusement, les formats de ces deux programmes sont très similaires, donc si vous en connaissez un, vous connaissez à peu près l'autre. Le laboratoire vous demandera de tracer différents types de fonctions avec une feuille de calcul.

Un tableur est un logiciel d'édition et de présentation de tableaux. Il est destiné à manipuler des données organisées dans des grilles formées de lignes et de colonnes.

Les données contenues dans ces tableaux sont très souvent chiffrées mais elles peuvent aussi être des dates ou des chaînes de caractères.

Les cellules du tableau peuvent aussi contenir des formules qui calculent automatiquement les valeurs à afficher en fonction des données modifiées ailleurs dans le tableau.

Le tableur est donc l'outil idéal pour les applications nécessitant :

- des calculs répétitifs ou nécessitant l'encodage de formules élaborées,
- une présentation de données ordonnées en lignes et en colonnes sous forme des tableaux
- la génération automatisée de graphiques, avec titre, légendes, etc...
- calculer la pente d'une droite, selon le cas, et obtenir son équation,
- selon les cas, tracer les barres d'erreur, et utiliser des fonctions telles que *LINEST* (qui signifie *Line Statistics*),
- inclure des graphiques ou tableaux de *Excel* dans un fichier *Word*

4 Rappel

Un ensemble de ressources pédagogiques pour les laboratoires, appelé *SOS Labos*, se trouve sur *eClass* à : <https://eclass.srv.ualberta.ca/portal/>. Attention: ces ressources ne sont pas toutes à jour.

[EXEMPLE DE RAPPORT - DÉBUT]

La loi en $\frac{1}{r^2}$ de la lumière

Article par
Isaac Newton
299792458
(Coéquipier: Thomas Young)

remis à
Galileo Galilée
le 31 février 2065

PHYSQ 124, Section LAB A01

Faculté Saint-Jean, University of Alberta

Résumé

L'intensité, I , de la lumière sortant d'un projecteur est mesurée en fonction de la distance, r , du projecteur à l'observateur, pour vérifier la loi en $\frac{1}{r^2}$ d'une source lumineuse ponctuelle.

Théorie

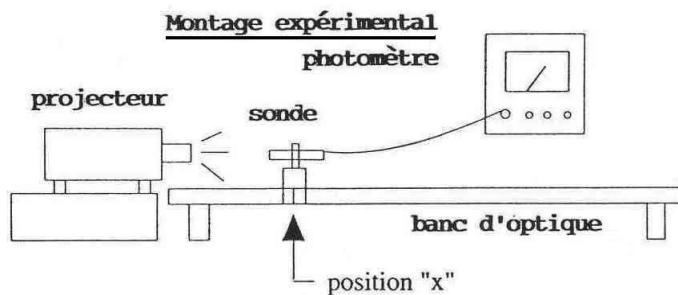
L'équation décrivant l'intensité de la lumière I sortant d'une source ponctuelle est

$$I = \frac{C}{r^2} = \frac{C}{(x + x_0)^2}, \quad (1)$$

où I est l'intensité lumineuse mesurée à la position x , r est le rayon à partir du centre de la source, C est une constante qui représente la puissance de la source, et x_0 est le décalage entre l'origine de l'échelle et le centre de la source de lumière.

Méthode

Une sonde photométrique est attachée à un banc d'optique et de la lumière sortant d'un projecteur de diapositives 35 mm est dirigée vers cette sonde.



L'intensité lumineuse résultante I est alors mesurée pour différentes valeurs de la position x de la sonde le long du banc d'optique.

Observations expérimentales

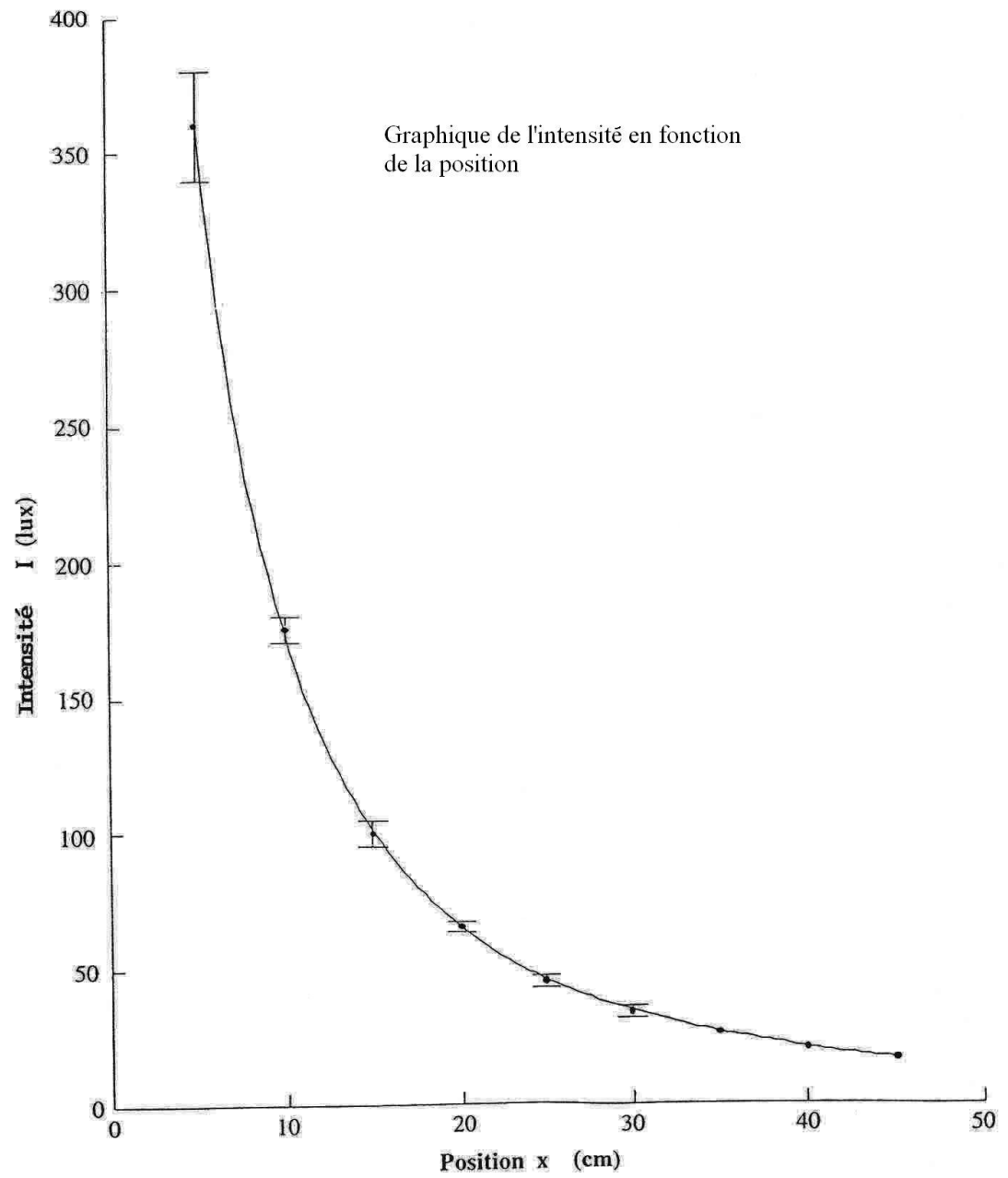
Tableau I: Intensité lumineuse I en fonction de la position x de la sonde photométrique.

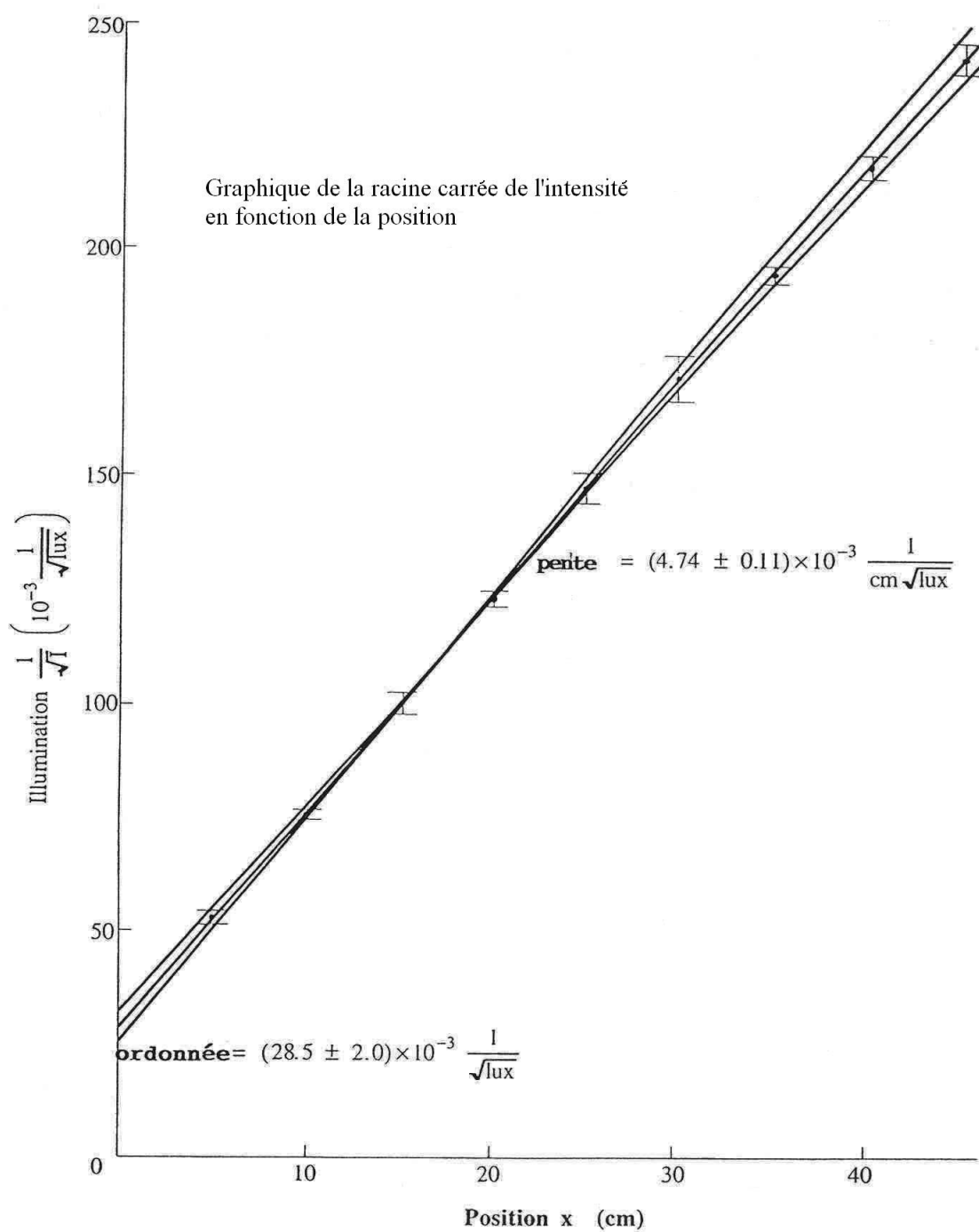
Position $x \pm 0.03$ (cm)	Intensité I (lux)	$1/\sqrt{I}$ $(\frac{10^{-3}}{\sqrt{\text{lux}}})$
5.00	360 ± 20	52.7 ± 1.5
10.00	175 ± 5	75.6 ± 1.1
15.00	100 ± 5	100.0 ± 2.5
20.00	66 ± 2	123.1 ± 1.9
25.00	46 ± 2	147.4 ± 3.2
30.00	34 ± 2	171.5 ± 5.0
35.00	26.5 ± 0.5	194.3 ± 1.8
40.00	21.0 ± 0.5	218.2 ± 2.6
45.00	17.0 ± 0.5	242.5 ± 3.6

Le graphique ci-dessous montre l'intensité I en fonction de la position x . Si on isole x dans l'équation (1), on obtient

$$\frac{\sqrt{C}}{\sqrt{I}} = x + x_0,$$

ce qui suggère de tracer $\frac{1}{\sqrt{I}}$ en fonction de x . Ceci est illustré au deuxième graphique, plus bas.





Analyse des résultats

Linéarisation graphique. Pour vérifier quantitativement la loi en $\frac{1}{r^2}$, réarrangeons l'équation (1), de façon à obtenir l'équation d'une droite, $y = mx + b$:

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = \frac{1}{\sqrt{C}} (x + x_0) = \frac{1}{\sqrt{C}} x + \frac{1}{\sqrt{C}} x_0,$$

de telle sorte que $y = \frac{1}{\sqrt{I}}$ est la variable dépendante, x la variable indépendante, la pente est $m = \frac{1}{\sqrt{C}}$ et l'ordonnée à l'origine vaut $b = \frac{x_0}{\sqrt{C}}$.

Résultats graphiques pour la pente et l'ordonnée à l'origine. Le deuxième graphique de $\frac{1}{\sqrt{I}}$ versus x est linéaire tel que prévu. Ainsi, nous pouvons déterminer les résultats pour les constantes inconnues, C et x_0 , à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine. Pour la droite moyenne, nous trouvons la pente:

$$m_{\text{moy}} = \frac{265.5 - 28.5}{50.0 - 0.0} \times \frac{10^{-3}}{\text{cm}\sqrt{\text{lux}}} = 4.74 \times \frac{10^{-3}}{\text{cm}\sqrt{\text{lux}}},$$

et l'ordonnée à l'origine

$$b_{\text{moy}} = 28.5 \times \frac{10^{-3}}{\sqrt{\text{lux}}}.$$

De la même façon, on trouve $m_{\text{max}} = 4.83 \times \frac{10^{-3}}{\text{cm}\sqrt{\text{lux}}}$, $m_{\text{min}} = 4.63 \times \frac{10^{-3}}{\text{cm}\sqrt{\text{lux}}}$, $b_{\text{max}} = 27.0 \times \frac{10^{-3}}{\sqrt{\text{lux}}}$, et $b_{\text{min}} = 30.5 \times \frac{10^{-3}}{\sqrt{\text{lux}}}$. La plus grande différence entre les valeurs $|\text{moyenne} - \text{min}|$ et $|\text{moyenne} - \text{max}|$ nous montre que l'erreur sur la pente est $0.11 \times \frac{10^{-3}}{\text{cm}\sqrt{\text{lux}}}$. De la même façon, la plus grande différence donne l'erreur sur l'ordonnée à l'origine: $2.0 \times \frac{10^{-3}}{\sqrt{\text{lux}}}$.

Les résultats pour la pente et l'ordonnée à l'origine moyennes, de même que les erreurs, peuvent donc être résumés comme suit:

$$\begin{aligned} m_{\text{moy}} \pm \Delta m &= 0.474 \pm 0.011 \frac{1}{\text{m}\sqrt{\text{lux}}}, \\ b_{\text{moy}} \pm \Delta b &= (2.9 \pm 0.2) \times 10^{-2} \frac{1}{\sqrt{\text{lux}}}. \end{aligned}$$

Valeurs expérimentales de C et x_0 . Comme la pente est $\frac{1}{\sqrt{C}}$, la puissance de la source lumineuse C est donnée par

$$C = \frac{1}{(\text{pente})^2} = 4.44 \text{ m}^2 \cdot \text{lux} = 4.44 \text{ lumen}.$$

L'erreur ΔC est évaluée en utilisant la règle de la puissance pour les erreurs:

$$\Delta C = C \left(\frac{1}{2\Delta_{\text{pente}}} \right)_{\text{pente}} = 4.44 \left(\frac{2 \times 0.011}{0.474} \right) = 0.21 \text{ lumen}.$$

Ainsi, le résultat final pour la puissance C de la source lumineuse est

$$C \pm \Delta C = 4.44 \pm 0.21 \text{ m}^2 \cdot \text{lux} = 4.4 \pm 0.2 \text{ lumen}.$$

Comme l'ordonnée à l'origine est $\frac{x_0}{\sqrt{C}}$, le décalage x_0 est donné par

$$x_0 = (\text{ordonnée}) \sqrt{C} = \frac{\text{ordonnée}}{\text{pente}} = \frac{28.5 \times \frac{10^{-3}}{\sqrt{\text{lux}}}}{4.74 \times \frac{10^{-3}}{\text{cm}\sqrt{\text{lux}}}} = 6.01 \text{ cm}.$$

L'erreur Δx_0 est obtenue en utilisant la règle de division pour les erreurs:

$$\Delta x_0 = x_0 \left(\frac{\Delta \text{ordonnée}}{\text{ordonnée}} + \frac{\Delta \text{pente}}{\text{pente}} \right) = 6.01 \left(\frac{2.0}{28.5} + \frac{0.11}{4.74} \right) \text{ cm} = 0.56 \text{ cm}.$$

Ainsi, le décalage x_0 du centre de la source lumineuse ponctuelle vaut

$$x_0 = 6.01 \pm 0.56 \text{ cm} = 6.0 \pm 0.6 \text{ cm}.$$

Comparaison avec les valeurs théoriques. Les valeurs théoriques sont basées sur l'hypothèse que la source de lumière est ponctuelle et d'une efficacité de 100%. La comparaison des valeurs expérimentale et théorique, de même que leur pourcentage d'erreur, sont

Quantité	Résultat expérimental	Valeur théorique	Pourcentage d'écart
C (lumen)	4.4 ± 0.2	7.8 ± 0.1	-44%
x_0 (cm)	6.0 ± 0.6	5.5 ± 0.2	8%

Conclusion

La validité de la loi en $\frac{1}{r^2}$ de l'intensité de la lumière a été confirmée expérimentalement, car le graphique de $\frac{1}{\sqrt{I}}$ en fonction de x est une droite, tel que prévu par la théorie. Nous avons constaté que l'équation (1) est valide, avec les valeurs expérimentales

$$\begin{aligned} C &= 4.4 \pm 0.2 \text{ lumen}, \\ x_0 &= 6.0 \pm 0.6 \text{ cm}. \end{aligned}$$

La valeur expérimentale de C ne coïncide pas, à l'erreur près, avec la valeur théorique de 7.8 ± 0.1 lumen. Cet écart de 44% peut être expliqué par le fait que la source de lumière n'est pas efficace à 100%, tel que supposé dans la théorie. Il est donc sensé d'obtenir un résultat expérimental plus faible, vu que de l'énergie est perdue en convertissant de l'énergie électrique en lumière.

La valeur expérimentale de x_0 est en accord avec la valeur théorique de 5.5 ± 0.2 cm. La source de lumière consiste en une lampe et une lentille dans le projecteur; elle n'est donc pas ponctuelle. La valeur de x_0 représente la position effective de la lumière, si elle était considérée comme émanant d'une source ponctuelle.

[FIN DE L'EXEMPLE DE RAPPORT]

VITESSE LIMITE DANS UN FLUIDE

1 But

Des objets qui se déplacent dans un fluide subissent l'action d'une force de frottement parfois proportionnelle à leur vitesse. On parle alors d'un *fluide visqueux*, et la force de frottement interne est reliée à la *viscosité* de ce fluide. Éventuellement, ces objets atteignent une vitesse constante, appelée *vitesse limite*. Dans le cadre de cette expérience¹, nous étudierons la relation entre la vitesse limite de balles d'acier qui tombent dans la glycérine et le rayon de ces balles. La valeur de la viscosité de la glycérine pourra être déterminée de cette relation.

Ce laboratoire contient quelques exercices sur la densité, la pression des fluides, l'effet de la profondeur et le principe de Pascal, ainsi qu'une brève expérience sur la vitesse limite d'un objet dans un fluide. Les notes ci-dessous sont un rappel des concepts nécessaires pour répondre aux questions.

2 Théorie

2.1 Densité d'une fluide

La *densité* ρ d'un objet est définie par

$$\rho \equiv \frac{M}{V},$$

où M est la masse correspondant à un volume V de cet objet. Par conséquent, la masse Δm d'un petit volume ΔV de cet objet est donnée par

$$\Delta m = \rho \Delta V.$$

2.2 Pression absolue et pression effective

La *pression absolue* P est donnée par

$$P \equiv \frac{F}{A}, \quad (\text{en Pa} = \text{N/m}^2)$$

où F est la force de contact sur une surface d'aire A . Par exemple, si un cube repose au sol, F est son poids et A est l'aire de la surface de contact sur laquelle le cube repose. Un autre exemple, relié aux fluides que nous étudierons dans ce cours, est la force F exercée par l'eau d'un aquarium sur la surface d'aire A d'une de ses parois.

La pression atmosphérique dans l'air ambiant est

$$P_{\text{at}} = 101.3 \text{ kPa} = 14.7 \text{ lb/in}^2 \text{ (ou psi)} = 760 \text{ mm} \cdot \text{Hg}.$$

¹Traduction partielle de: Experiment 12 - Terminal Velocity in a Fluid, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

La *pression effective* P_g (en anglais, *gauge pressure*) est définie par

$$P_g \equiv P - P_{\text{at}}.$$

Ce concept est utile pour des contenants (ex. ballons, pneus) renfermant de l'air, car elle est la différence entre les pressions interne et externe. Dans ces cas, il faut utiliser $P_g \equiv \frac{F}{A}$.

2.3 Relation entre la pression et la profondeur

Si deux points dans un fluide de densité ρ sont séparés d'une distance verticale h , alors la pression inférieure P_{inf} est reliée à la pression supérieure P_{sup} par la relation

$$P_{\text{inf}} = P_{\text{sup}} + \rho gh.$$

Autrement dit, la pression du fluide augmente avec la profondeur.

2.4 Principe de Pascal

Une pression extérieure exercée sur un fluide dans un contenant fermé est transmise inchangée à tous les points de ce fluide.

2.5 Vitesse dans un fluide

Un petit objet de masse m qui tombe dans un fluide subit l'action de trois forces :

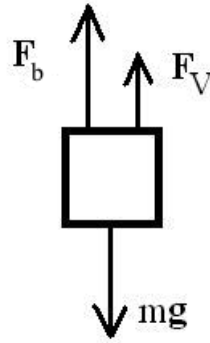


Figure 1. Forces sur une balle tombant dans un fluide visqueux.

Les deux forces dirigées vers le haut sont la poussée d'Archimède, \mathbf{F}_b , et la force de la viscosité, \mathbf{F}_V . La troisième force est le poids, $m\mathbf{g}$, dirigé vers le bas. L'accélération \mathbf{a} de la balle est donc donnée par

$$m\mathbf{a} = m\mathbf{g} - \mathbf{F}_V - \mathbf{F}_F. \quad (1)$$

Si on suppose que \mathbf{F}_V est proportionnelle à la vitesse v ,

$$F_V = \gamma v, \quad (\gamma \text{ constante}), \quad (2)$$

alors cette force augmente au fur et à mesure que le corps accélère vers le bas, ce qui provoque en retour une diminution de l'accélération, par l'équation (1). Ce processus continue jusqu'à ce que $\mathbf{a} = \mathbf{0}$, et ainsi la balle atteint sa vitesse limite, v_l . L'équation (1) devient alors

$$mg = F_V + F_b = \gamma v_l + F_b. \quad (3)$$

Pour une balle d'acier de rayon r qui tombe dans un fluide dont le coefficient de viscosité est η , la force de viscosité F_V est donnée par la loi de Stokes:

$$F_V = 6\pi\eta r v. \quad (4)$$

Donc, dans ce cas, on prend $\gamma = 6\pi\eta r$ dans l'équation (2).

Supposons que la balle ait une densité ρ , et le liquide, une densité ρ_f . La masse de la balle est

$$m = \rho V = \frac{4}{3}\rho\pi r^3,$$

et la force d'Archimède \mathbf{F}_b est égale au poids du liquide déplacé par ce volume:

$$F_b = \rho_f V g = \rho_f g \frac{4}{3}\pi r^3.$$

L'équation (3) devient alors

$$\frac{4}{3}\rho g \pi r^3 = \frac{4}{3}\rho_f g \pi r^3 + 6\pi\eta v_l r, \quad (5)$$

ce qui donne pour la vitesse limite,

$$v_l = \frac{2g(\rho - \rho_f)}{9\eta} r^2. \quad (6)$$

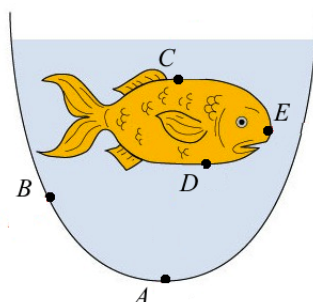
Le *coefficient de viscosité* η a comme unités N·sec/m², ou Pa·sec (en unités SI).

3 Questions préliminaires

(Essayez d'y répondre avant la séance de laboratoire. Vous insérerez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

1. Question 1

- Dans l'illustration de l'aquarium ci-dessous, indiquez par une flèche, à chaque point de contact (A à E), la direction de la force exercée par l'eau. Ne vous souciez pas de la grandeur de chaque force et tracez cinq flèches de longueur égale.



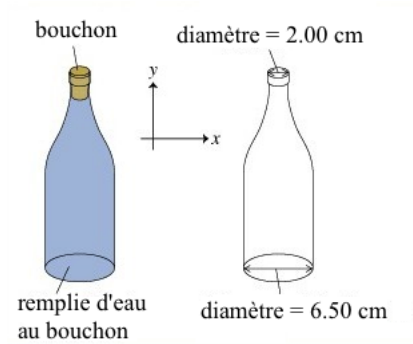
- Si on vous demandait d'indiquer la grandeur de la force à chaque point, auriez-vous assez d'information? Expliquez brièvement.
- Si le schéma de l'aquarium contenait une règle montrant la hauteur, quelle quantité cette information vous permettrait de calculer? Expliquez brièvement.

2. Question 2

- On donne que la pression à 10.0 m sous la surface de l'océan vaut environ 2.00×10^5 Pa. Prenez $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$. (a) Quelle est la pression à la surface de l'eau? (b) Quelle est la pression à 20.0 m sous la surface de l'océan? (c) Quel est le poids d'une colonne d'eau de hauteur 20.0 m d'aire 1.75 m^2 ?
- On veut fabriquer un réservoir d'eau sur la planète Mars, où $g = 3.71 \text{ m/s}^2$. La pression à la surface supérieure vaut 130 kPa et le réservoir a une profondeur de 14.1 m. La pression exercée par l'air dans le bâtiment sur la base du réservoir est 91.0 kPa. Si la base a une surface de 2.05 m^2 , quelle est la force nette exercée sur la base du contenant de part et d'autre par l'eau interne et l'air externe?

3. Question 3

Une bouteille est remplie d'eau jusqu'au niveau du bouchon, sans air entre l'eau et le bouchon. Le diamètre de la partie supérieure de la bouteille vaut 2.00 cm et le diamètre de la partie inférieure de la bouteille vaut 6.50 cm. On donne que ce verre casse quand la pression est égale à ou plus grande que $P_{\max} = 70.0 \text{ MPa}$.



Une étudiante frappe le bouchon rapidement avec son poing et le fond de la bouteille casse. Le poing a une masse $m = 0.480 \text{ kg}$ et frappe le bouchon à une vitesse $v_i = 5.00 \text{ m/s}$. La collision poing-bouchon est élastique et le poing rebondit à $v_f = v_i$. La durée de l'impact vaut $\Delta t = 1.20 \times 10^{-4} \text{ s}$. (a) Quelle est la force exercée par le poing sur le bouchon? (b) Quelle est la grandeur de la force exercée sur le fond de la bouteille par le fluide?

4 Matériels

- Balles d'acier de différents rayons,
- cylindre remplie de glycérine,
- pince en plastique,
- aimants.

5 Procédures et observations

La vitesse limite est atteinte à environ 5 cm sous la surface supérieure du fluide. Les mesures de vitesse ne doivent donc pas être effectuées plus haut que ce point. Prenez aussi ces mesures à au moins 3 cm du fond du contenant.

1. Vous utiliserez des balles d'acier dont le rayon vaut 0.770, 0.990, 1.190, 1.570, 1.980, 2.370 mm. Négligez l'erreur. Les balles sont lâchées au centre du cylindre de glycérine en utilisant des pinces en plastique.
2. En commençant avec une balle de 0.770 mm, mesurez le temps t requis pour tomber d'une distance d (à votre choix) dans le cylindre de glycérine. Vous pouvez utiliser les deux étiquettes collées sur le cylindre.
3. Déterminez la vitesse limite $v_l = d/t$ de la balle qui tombe dans la glycérine.
4. Retirez les balles en les attirant vers la surface à l'aide d'un aimant. *Ne laissez pas les balles toucher à l'aimant*, sinon elles seront magnétisées. Prenez tout simplement les balles avec vos doigts (ou des pinces en plastique) lorsqu'elles atteignent la surface.
5. Nettoyez les balles dans un gobelet *contenant de l'eau et y laisser*. L'instructeur du laboratoire passera vérifier si toutes les balles sont là. Vous pouvez ensuite vous laver les mains à l'eau car la glycérine est soluble dans l'eau.
6. Mesurez la densité ρ_f de la glycérine *après* que les lectures du temps de tous les différents diamètres aient été effectuées. L'hydromètre utilisé dans cette expérience a été calibré de façon à mesurer des densités variant de 1200 kg/m³ à 1400 kg/m³. Pour mesurer la densité de la glycérine, abaissez *lentement* l'hydromètre dans la glycérine et laissez-le flotter à sa position d'équilibre. Utilisez le niveau de la surface de la glycérine pour lire sur l'échelle de l'hydromètre.
7. La température de la glycérine devrait être la température de la pièce puisqu'elle y a été placée depuis quelques jours. Notez la température T de la pièce. La valeur du coefficient de viscosité η de la glycérine est 1.490 Pa·s à 20°C et 0.954 Pa·s à 25°C. La valeur de η peut être interpolée linéairement pour les température entre 20°C et 25°C :

$$\eta = \eta_{20^\circ C} + \left(\frac{\eta_{25^\circ C} - \eta_{20^\circ C}}{25^\circ C - 20^\circ C} \right) (T - 20^\circ C)$$

8. La densité ρ des balles d'acier est $(7.80 \pm 0.05) \times 10^3$ kg/m³.
9. Les valeurs mesurées dans cette expérience sont le rayon r des balles et leurs vitesses limites respectives v_l . Comment l'équation (6) peut-elle être linéarisée pour produire une droite dont la pente permet de déterminer la viscosité η de la glycérine?

PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Dans cette expérience¹, nous étudierons en première partie le principe d'Archimède (pour les fluides statiques), et en seconde partie, l'équation de Bernoulli (pour les fluides en mouvement).

On ne demande pas de calcul d'erreur.

1 PARTIE I: LE PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

1.1 Théorie

Une propriété importante des fluides est la force de poussée qu'ils exercent sur des objets immergés. On appelle cette force *poussée d'Archimède*. Cet effet est décrit par le *principe d'Archimède*, qui stipule que “La force de poussée sur un objet immergé dans un fluide est vers le haut et égale au poids du fluide déplacé par la présence de l'objet”. En d'autres termes, si V_{sub} est le volume de la partie immergée de l'objet, et ρ_f est la densité du fluide, alors la force de poussée est donnée par

$$F_b = \rho_f V_{\text{sub}} g.$$

Par conséquent, le poids apparent W' d'un objet dans un fluide sera plus petit que son poids réel W , tel qu'illustré à la Figure 1.

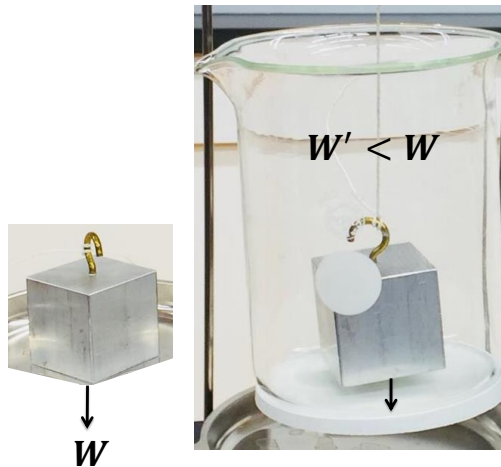


Figure 1. Poids W d'un objet dans l'air et son poids apparent W' dans un fluide

Si W représente le poids de l'objet dans l'air, W' le poids apparent de l'objet *complètement submergé* (en pratique, c'est la *tension* T de la corde par laquelle l'objet est relié à la balance),

¹Adapté de: Experiment 11 - Properties of Fluids, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

ρ_f la densité du fluide et ρ_o la densité de l'objet, on vous demande de montrer à la section 1.4, ci-dessous, que ces quantités sont reliées par

$$\rho_o = \frac{\rho_f W}{W - W'} \quad (1)$$

1.2 Question

(Insérez votre réponse dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

Montrez comment l'équation (1) a été obtenue. Ici, le volume submergé V_{sub} est le volume *total* de l'objet. Indices: trouvez la relation entre W , W' , et la force de poussée; exprimez la densité de l'objet en termes de W , V et g ; éliminez V .

1.3 Manipulations et observations

1. Mesurez la masse m de l'objet fourni en utilisant une balance à plateau, tel qu'illustré à la Figure 2:

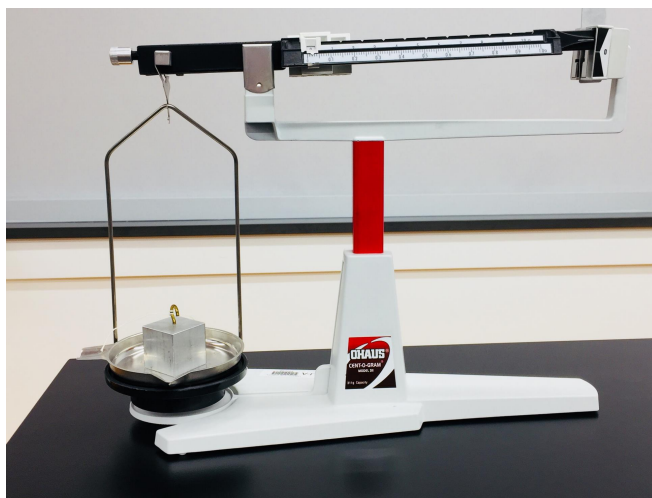


Figure 2. Balance à plateau

2. Élevez la plate-forme de la balance au-dessus du plateau, comme à la Figure 3. Placez ensuite un bécher (par ex. de 400 mL) sur la plate-forme. Ce bécher devra contenir assez d'eau pour que l'objet y soit complètement submergé. Suspendez l'objet à la poutrelle de la balance à l'aide d'une ficelle, tel qu'illustré à la Figure 3.

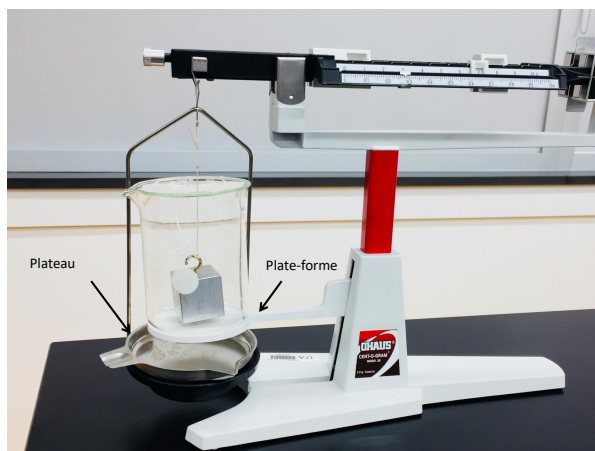


Figure 3. Montage de la balance avec le plateau, la plate-forme et la poutrelle

3. Mesurez la masse de l'objet lorsqu'il est complètement submergé dans l'eau.

1.4 Résultats et analyse

1. Utilisez vos mesures et la densité de l'eau (1000 kg/m^3) pour déterminer la densité de l'objet en utilisant l'équation (1).
2. Calculez aussi la densité de l'objet en mesurant sa masse et son volume (en le plongeant dans un bécher), et en calculant $\rho_o = m/V$.
3. Comparez les densités obtenues dans les étapes 1 et 2. Calculez le pourcentage d'écart, en divisant par la valeur obtenue à l'étape 2.

2 PARTIE II: ÉQUATION DE BERNOULLI

Le but de cette section est d'utiliser l'équation de Bernoulli pour *déterminer le diamètre d'un petit orifice circulaire situé au bas d'une bouteille*. En plus de l'équation de Bernoulli, nous utiliserons aussi les équations de la cinématique à accélération constante.

2.1 Théorie

En 1738, Daniel Bernoulli a appliqué le principe de la conservation de l'énergie à l'écoulement régulier d'un fluide incompressible non-visqueux. La relation résultante peut être utilisée pour étudier l'écoulement des fluides dans plusieurs situations où l'effet de la friction, ou *viscosité*, est négligeable.

Considérez l'écoulement de l'eau à travers un petit orifice situé au bas d'une bouteille (Figure 4, à gauche, ci-dessous).

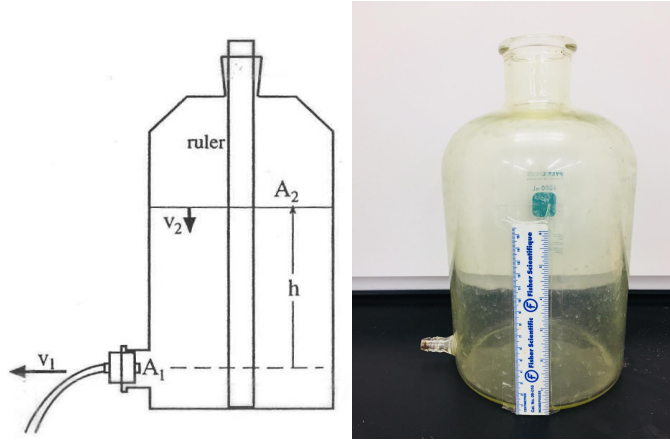


Figure 4. Écoulement de l'eau par un petit orifice

Avec la région 1 qui représente la sortie du petit orifice du bas, et la région 2 qui est à la surface supérieure du liquide, l'équation de Bernoulli prend la forme

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2, \quad (2)$$

où P est la pression, ρ est la densité du fluide, v est la vitesse du fluide, g est la constante gravitationnelle et y est la hauteur. Dans le cas de la Figure 4, $P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$ et si on définit $h \equiv y_2 - y_1$, l'équation de Bernoulli peut être écrite sous la forme

$$v_1^2 = v_2^2 + 2gh. \quad (3)$$

L'équation de continuité est

$$A_1 v_1 = A_2 v_2, \quad (4)$$

où A_1 et A_2 sont, respectivement, l'aire de la surface du petit orifice et celle de la surface supérieure d'eau.

Nous trouvons la vitesse de la surface supérieure de l'eau en combinant les équations (3) et (4):

$$v_2^2 = 2 \left(\frac{A_1^2 g}{A_2^2 - A_1^2} \right) h. \quad (5)$$

En comparant cette équation à l'équation de la cinématique,

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a(h_f - h_i), \quad (6)$$

on voit que la surface de l'eau dans la bouteille subit une accélération constante de

$$a = \frac{A_1^2 g}{A_2^2 - A_1^2}, \quad (7)$$

avec une vitesse initiale $v_i = 0$ et à partir d'une hauteur h_i . (Remarquez que si le petit orifice est fermé, nous avons $A_1 = 0$, ce qui entraîne $a = 0$ m/s², tel que prévu.)

Ici, nous avons $A_2 \gg A_1$, ce qui implique que

$$a \approx \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 g = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 g, \quad (8)$$

où d_1 et d_2 sont les diamètres des surfaces.

De plus, la vitesse de la surface de l'eau est égale à zéro lorsque la hauteur finale est zéro. Par conséquent, le temps t requis pour que la surface de l'eau descende d'une hauteur h à la hauteur 0 est

$$h = \frac{1}{2} a t^2. \quad (9)$$

Aussi, le temps δt requis pour que l'eau baisse de la hauteur initiale y_i à la hauteur finale y_f est égal à la différence entre les temps requis pour le passage de chacune des hauteurs à la hauteur finale 0 :

$$\delta t = \sqrt{\frac{2h_i - 2h_f}{a}}. \quad (10)$$

2.2 Manipulations et observations

Vous ferez varier la hauteur initiale y_i de la surface de l'eau et mesurerez le temps δt requis pour qu'elle descende jusqu'à la hauteur finale y_f , constante dans cette expérience.

1. Mesurez le diamètre du petit orifice en utilisant un calibre vernier. Cette valeur sera votre "valeur théorique" $d_{1,\text{théo}}$. Mesurez ensuite la hauteur de référence y_0 , distance entre le bas de la bouteille et le centre de cet orifice, tel qu'illustré à la Figure 5.

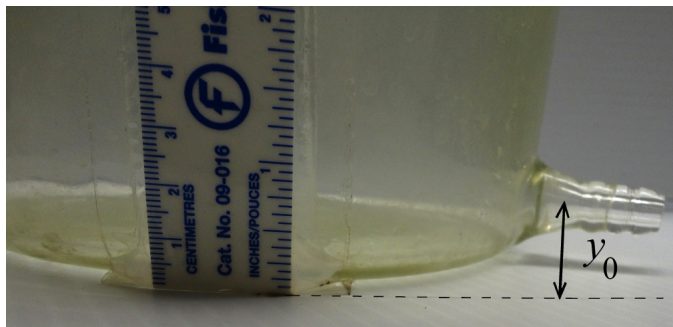


Figure 5. Hauteur de référence y_0

2. Remplissez la bouteille d'eau jusqu'à $y_i = 14.0$ cm. Notez ensuite le temps δt requis pour que l'eau s'écoule jusqu'à une hauteur finale de $y_f = 5.0$ cm.
3. Répétez l'étape (1) en faisant varier y_i de 13.0 cm à 6.0 cm par intervalle de 1.0 cm. Gardez le même $y_f = 5.0$ cm. Complétez le tableau 1, ci-dessous. Utilisez $h_i = y_i - y_0$, $h_f = y_f - y_0$, $g = 9.81$ m/s², et $d_2 = 16.4$ cm.

Lecture initiale de la règle y_i (cm)	Lecture finale de la règle y_f (cm)	Temps δt (sec)	Hauteur initiale h_i (cm)	Variable x (?)	Variable y (?)
	5.0				

Tableau 1. Temps requis par l'eau pour s'écouler, selon différentes hauteurs.

2.3 Questions

(Insérez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

1. Obtenez l'équation (5) à partir des équations (3) et (4).
2. Les variables mesurées dans cette expérience sont: la hauteur initiale h_i et le temps δt requis pour que l'eau s'écoule jusqu'à la hauteur finale h_f . Pour déterminer le diamètre d_1 à partir de la pente d'une droite, quelles sont les quantités qui correspondent à x , y , la pente m et l'ordonnée b ?
3. Trouvez une expression de d_1 en termes de d_2 , g et de la pente du graphique de la question 2, ci-dessus.

POTENTIEL ÉLECTROSTATIQUE ET CHAMP

1 But

Le but de cette expérience est d'étudier la configuration du potentiel électrique (c.-à-d. le *voltage*) et sa relation au champ électrique. Un schéma des courbes de potentiel constant, ou *équipotentiellles*, peut être utilisé pour tracer les lignes de champ électrique. Le patron du potentiel électrique donne un aperçu de l'intensité du champ électrique.

2 Théorie

L'électrostatique étudie la relation entre le champ électrique, le potentiel électrique et la distribution de charges dans des situations où les charges sont en équilibre.

Par exemple, considérez le champ électrique entre deux charges $+Q$ et $-Q$, représenté à la Figure 1:

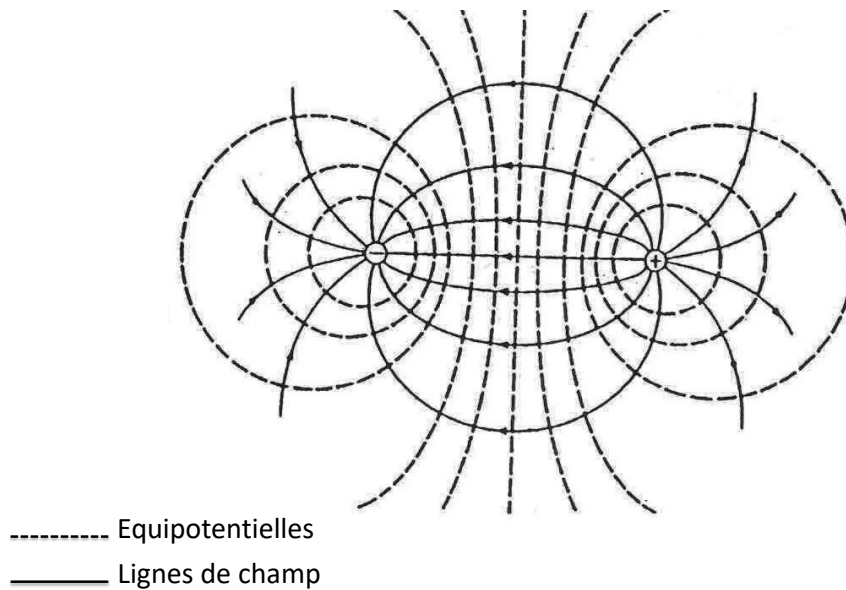


Figure 1: Champ électrique entre deux charges $+Q$ et $-Q$.

Le schéma contient des courbes solides et des lignes pointillées localement perpendiculaires les unes aux autres. Les *courbes solides avec des flèches* représentent des *lignes de champ électrique*, alors que les *courbes pointillées* représentent des *équipotentiellles*. Les lignes de champ

électrique partent des charges positives et pointent vers les charges négatives. De plus, la densité des lignes de champ électrique indiquent qualitativement l'intensité du champ électrique: le champ est plus intense là où les lignes de champ sont plus concentrées.

Le champ électrique en un point dans l'espace est relié au potentiel électrique par¹

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta s}$$

où Δs est la distance entre deux équipotentiels voisines. Le signe $-$ dans cette équation signifie que le champ \mathbf{E} pointe dans la direction où le potentiel V diminue. Comme le champ électrique pointe des charges positives vers les charges négatives, ceci implique que le potentiel diminue quand on approche les charges négatives².

Résumé de la théorie. Le potentiel est relié au travail effectué par \mathbf{E} par $W_E = -\Delta U_e = -q\Delta V_e$. Donc, $\Delta V_e = -\frac{W_E}{q}$. Le principe de conservation de l'énergie devient: $K_i + U_i = K_f + U_f$, c.-à-d. $\frac{1}{2}mv_i^2 + qV_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + qV_f$. La grandeur du champ \mathbf{E} vaut $|E| = \frac{\Delta V}{\Delta x}$, et le vecteur \mathbf{E} pointe dans la direction où V diminue³.

¹*Rappel:* Le champ électrique \mathbf{E} est défini de sorte que si une charge test q est placée dans ce champ électrique, elle subira une force électrostatique $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$. Si la charge est déplacée d'une distance Δs parallèlement à la force électrostatique, une quantité de travail $W = F\Delta s = qE\Delta s$ doit être fournie. L'énergie potentielle correspondante doit donc changer de $\Delta U = -qE\Delta s$. Le potentiel électrique V est défini comme l'énergie potentielle par unité de charge $V = U/q$.

² À titre de renseignement, dans l'espace à trois dimensions, les composantes du champ électrique sont données par les relations

$$E_x = -\frac{\Delta V}{\Delta x}, \quad E_y = -\frac{\Delta V}{\Delta y}, \quad E_z = -\frac{\Delta V}{\Delta z},$$

où Δx est un petit déplacement dans la direction x , et de même pour y et z . Par exemple, si V ne change pas (c.-à-d. $\Delta V = 0$) quand on se déplace dans la direction y , on a $E_y = 0$.

³Si le champ \mathbf{E} fait un angle θ par rapport au déplacement $\Delta \mathbf{r}$ entre le point i et le point f , alors la différence de potentiel entre ces points est donnée par

$$\Delta V \equiv V_f - V_i = -E\Delta r \cos \theta,$$

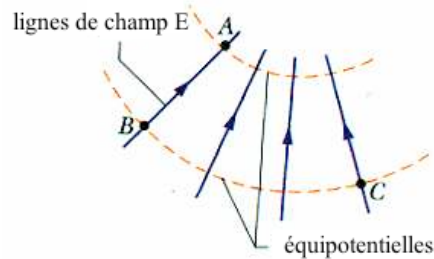
où Δr est la distance entre les points i et f .

3 Questions préliminaires

(Essayez d'y répondre avant la séance de laboratoire. Vous insérerez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

1. Potentiel électrique

Quand un électron se déplace du point A au point B le long d'une ligne de champ \mathbf{E} , le champ \mathbf{E} fait un travail 3.94×10^{-19} J. Quelles sont les différences de potentiel: (a) $V_B - V_A$, (b) $V_C - V_A$ et (c) $V_C - V_B$?



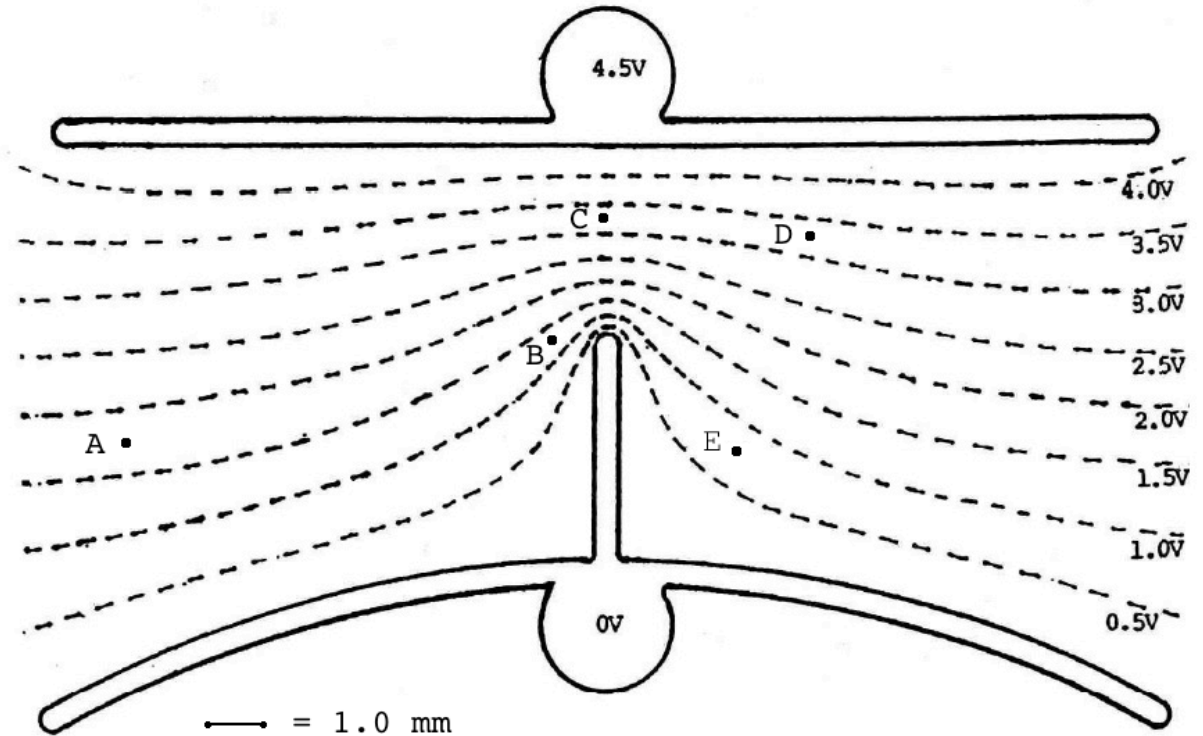
2. Conservation de l'énergie

À la figure 2 de la partie analyse *Potentiel électrique et champ*, imaginez qu'un électron au repos soit placé sur la borne négative. Le 6.0 V signifie que la borne + a un potentiel supérieur à la borne - de 6.0 V.

- Sera-t-il poussé vers la gauche ou vers la droite?
- Si 2.0 cm sépare les deux bornes + et -, quelle vitesse aura l'électron une fois rendu à la borne +? (Utilisez la conservation de l'énergie, $\Delta K + \Delta U = 0$ avec $U = qV$.)
- Et si la vitesse initiale de l'électron était 1.30×10^6 m/s vers la gauche, à son point de départ, plutôt que 0 m/s, quelle serait votre réponse à la partie (b)?

3. Équipotentiellles et champ électrique

Les courbes hachurées de la figure ci-dessous représentent des courbes équipotentiellles. On donne aussi une échelle en mm. À l'aide d'une règle à mesurer, utilisez les équipotentiellles et la relation $|E| = \frac{\Delta V}{\Delta s}$ pour tracer le vecteur champ électrique à chacun des points A, B, C, D et E, en indiquant dans chaque cas la grandeur de \mathbf{E} en V/m.



4 Matériels

- Appareil de champ électrique,
- une feuille noire de papier conducteur,
- papier quadrillé, source de
- courant,
- multimètre digital.

5 Manipulations

1. Montez l'appareil de la Figure 2. Dans le schéma, le symbole ΔV représente le multimètre digital.

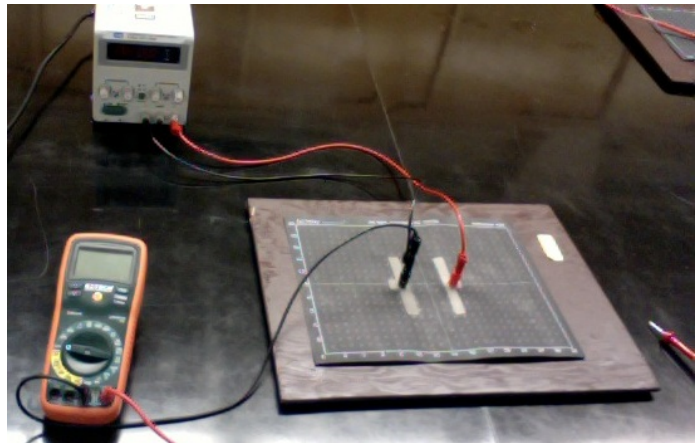
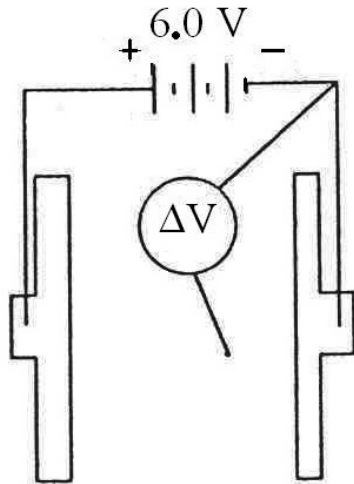


Figure 2. Schéma du montage (à gauche) et photo (à droite)

2. La feuille qui vous sera fournie représente deux charges ponctuelles. Reproduisez l'image des deux conducteurs ponctuels sur votre feuille blanche de papier quadrillé fournie lors de l'expérience.
3. Allumez la source de courant et ajustez le voltage à 6.0 V.
4. Une des sondes du multimètre digital restera fixe (sonde noire de la Figure 2 à droite) tandis que l'autre sera déplacée sur la feuille (sonde rouge de la Figure 2 à droite).
5. Déplacez la sonde mobile autour d'un des conducteurs, de façon à identifier les endroits où la différence de potentiel entre les deux sondes du multimètre digital est égale à 0.5 V. Notez ces endroits sur votre feuille blanche quadrillée à l'aide de petites croix. Assurez-vous de tracer suffisamment de petites croix, à environ tous les deux centimètres, pour être capable de tracer l'équipotentielle de 0.5 V.
6. Répétez l'étape précédente de façon à identifier et à tracer chacune des équipotentielles suivantes: 1.0 V, 1.5 V, 2.0 V, 2.5 V, 3.0 V, 3.5 V, 4.0 V, 4.5 V, 5.0 V et 5.5 V (celles de 0.0 V et 6.0 V sont situées à chacun des deux conducteurs ponctuels).
7. Une fois que vous avez tracé dix lignes équipotentielles, tracez sept ou huit lignes de champ électrique \mathbf{E} partant de *chaque* charge ponctuelle. Votre schéma devrait ressembler à la Figure 19.5(a) du manuel de Walker, ou tout autre figure pour deux charges ponctuelles que vous pouvez facilement retrouver sur internet.

8. En utilisant votre schéma et la relation $|E| = \frac{\Delta V}{\Delta s}$, évaluez approximativement la valeur numérique de E , en V/m, au point situé entre les deux charges.
9. Répétez l'exercice précédent et évaluez E pour deux autres points de votre choix sur le même schéma.

CONDENSATEURS ET CAPACITÉ

1 But

Un condensateur est un appareil constitué de deux conducteurs proches l'un de l'autre mais sans contact direct. Une application importante des condensateurs est qu'ils nous permettent d'emmagasiner de l'énergie électrique.

Cette expérience¹ contient deux parties:

1. vérification de la relation (2) pour le condensateur plan;
2. combinaisons de condensateurs en série et en parallèle, à l'aide des équations (3) et (4).

2 Théorie

Si une différence de potentiel V est établie entre deux conducteurs semblables, ils acquièrent une charge égale et opposée de $+Q$ et $-Q$, respectivement. Pour un condensateur donné, la quantité de charge Q sur chaque conducteur est proportionnelle à la différence de potentiel entre les conducteurs,

$$Q = CV. \quad (1)$$

La constante de proportionnalité C est appelée la *capacité* du condensateur. L'unité SI de la capacité est le *farad* (F), qui vaut un coulomb par volt (C/V).

2.1 Partie I. Condensateur plan

Un condensateur plan est constitué de deux armatures (c.-à-d. deux plaques parallèles) ayant une même surface A , et séparées d'une distance d (voir Figure 1). La capacité du condensateur plan est donnée par

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}, \quad (2)$$

où $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$ est la *permittivité du vide*. Dans l'équation (2), on suppose que la valeur de d est petite par rapport à l'aire du condensateur.

¹Adaptation et traduction de: Experiment 15 - Capacitance, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126, Department of Physics, University of Alberta.*

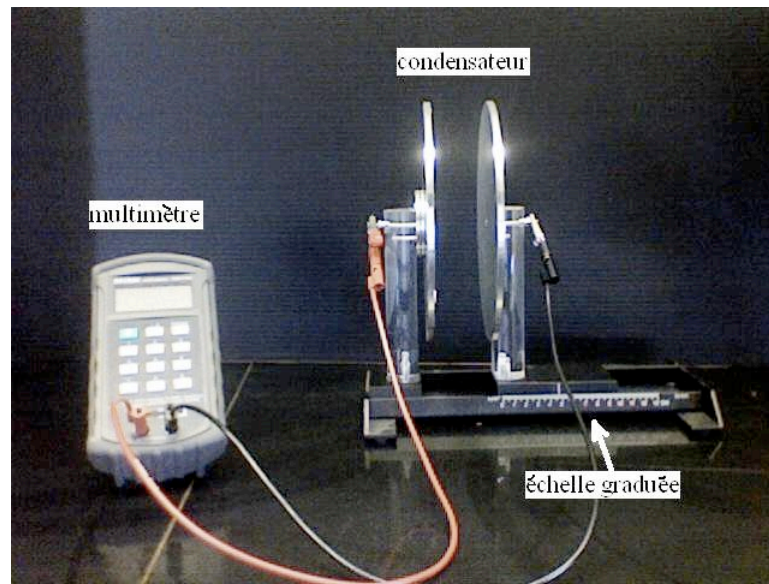


Figure 1: Condensateur plan

2.2 Partie II. Condensateurs en série et en parallèle

Si trois condensateurs sont branchés en *série* comme à la Figure 2, ci-dessous, chacun d'eux accumule une charge égale à Q . Un circuit en série possède une capacité équivalente, C_s , donnée par la relation

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (3)$$

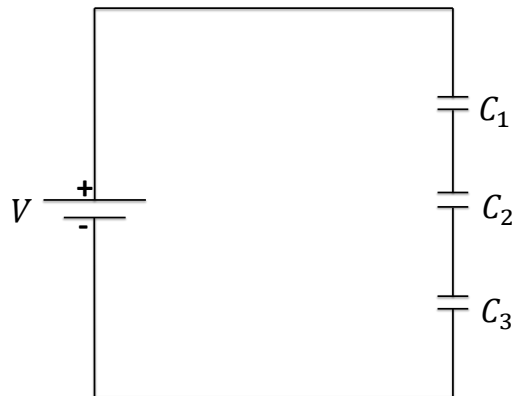


Figure 2: Condensateurs en série.

Par contre, si trois condensateurs sont branchés en *parallèle*, comme à la Figure 3, la différence de potentiel aux bornes de chaque condensateur est égale à la fém, \mathcal{E} , produite par la source de courant. Le circuit en parallèle possède une capacité équivalente C_p donnée par

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3. \quad (4)$$

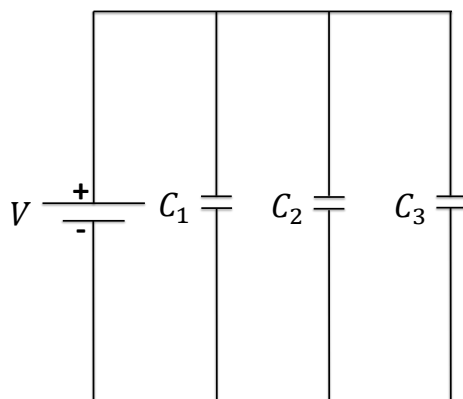


Figure 3: Condensateurs en parallèle.

3 Manipulations

3.1 Partie I. Condensateur plan

Observations préliminaires.

1. La capacité peut être mesurée directement en utilisant un multimètre digital.
2. Le multimètre affiche les lectures de la capacité en pF, nF, μF ou mF, selon l'échelle sélectionnée. Si la lecture de la capacité affichée sur l'appareil montre seulement un ou deux chiffres significatifs, sélectionnez une échelle plus sensible (ayant des unités plus petites). Si la capacité est plus grande que la valeur maximale de l'échelle, l'appareil affichera un "1", et vous devrez sélectionner une échelle ayant des unités plus grandes.
3. Lorsque vous mesurez la capacité en utilisant l'échelle des pF (picoFarad), la capacité des fils de connexion affecte les mesures.
 - (a) Allumez le multimètre digital en appuyant sur le bouton vert situé sur le côté gauche. Après avoir sélectionnez la fréquence 1 kHz avec le bouton "FREQ", utilisez le bouton "RANGE" pour changer l'unité de mesure à pF.
 - (b) Ensuite, faites le zéro de l'appareil en appuyant sur "REL".

- (c) Branchez ensuite les fils de connexion à l'appareil et observez la valeur de la capacité. Les fils de connexion branchés à l'appareil possèdent une capacité d'environ 10 pF. Déplacez les fils et observez le changement de la capacité des fils. Même la présence de vos mains autour des fils produit un changement de la capacité. Ceci est dû au fait que la capacité dépend de la géométrie entre les deux conducteurs.
- (d) Vous devrez donc être méticuleux lorsque vous utilisez l'échelle de pF.

Condensateur plan. La capacité d'un condensateur plan idéal est donnée par l'équation (2). Le but de cette première partie est de mesurer la capacité en variant la distance d entre les deux plaques.

1. Pour la première lecture², ajustez la séparation entre les plaques d à 2.0 mm et attachez les fils de connexion du multimètre aux poteaux isolants du condensateur plan, tel qu'illustré à la Figure 1. Ajustez l'appareil à zéro (en appuyant sur "REL"), tout en ayant des petits tubes de caoutchouc sur les vis latérales³. Attachez ensuite les fils au poteaux conducteurs en bougeant le moins possible les fils et en les gardant dans la même position. Éloignez-vous du montage et notez la valeur de la capacité C .
2. Prenez note de la capacité lorsque vous augmentez la séparation entre les plaques d de 1.0 mm, et ce jusqu'à la valeur maximum de 12.0 mm. Écrivez vos dix valeurs dans la colonne C_1 du Tableau 1, ci-dessous.

séparation $d \pm \delta d$	C_1	C_2	$C_{\text{moy}} \pm \delta C_{\text{moy}}$	$1/C_{\text{moy}} \pm \delta(1/C_{\text{moy}})$

Tableau 1: Capacité C d'un condensateur plan en fonction de la distance d .

3. Répétez les lectures, mais en *diminuant* la distance d de 12.0 à 2.0 mm, en variant de 1.0 mm à la fois. Écrivez vos dix valeurs dans la colonne C_2 du Tableau 1.
4. Mesurez directement le diamètre, $D \pm \Delta D$, des plaques en utilisant une règle.
5. Calculez les valeurs moyennes C_{moy} et l'erreur ΔC_{moy} pour chaque distance de séparation d , et écrivez-les dans le Tableau 1.
6. Vu que l'équation (2) donne $d = \frac{\epsilon_0 A}{C}$, complétez la dernière colonne du Tableau 1 pour $1/C_{\text{moy}}$ et son erreur.

²Vous mesurerez la capacité en variant la distance d entre les deux plaques de 2.0 mm à 12.0 mm. La capacité mesurée pour ces distances devrait être dans un intervalle de mesure d'environ 150 pF à 30 pF.

³L'instructeur de laboratoire peut vous aider à faire ceci correctement.

3.2 Partie II. Condensateurs en série et en parallèle

Capacité de trois condensateurs. On vous fournit trois condensateurs de capacités $C_1 \approx 0.10 \mu\text{F}$, $C_2 \approx 0.22 \mu\text{F}$ et $C_3 \approx 0.47 \mu\text{F}$.

1. Sélectionnez l'échelle de μF avec le bouton "RANGE" et faites le zéro de l'appareil avec le bouton "REL".
2. Mesurez et notez la capacité de chacun des trois condensateurs en vous assurant que votre lecture possède au moins trois chiffres significatifs. Notez l'erreur de la lecture en utilisant ± 1 de la dernière décimale. Complétez le Tableau 2, ci-dessous.

C donnée par le manufacturier (μF)	C mesurée (μF)	différence (μF)
0.100 ± 0.010		
0.220 ± 0.022		
0.470 ± 0.047		

Tableau 2: Mesure de la capacité de chaque condensateur en utilisant un multimètre.

Condensateurs en série.

1. En utilisant le panneau de circuit électrique, branchez les trois condensateurs dans un circuit en *série*, tel qu'illustré à la Figure 2.
2. Mesurez la capacité équivalente $C_s(\text{exp.}) \pm \Delta C_s(\text{exp.})$ de ce circuit et notez-la dans le Tableau 3, ci-dessous.

	$C(\text{théo.})$ (μF)	$C(\text{exp.})$ (μF)	différence (μF)
en série			
en parallèle			
mixte			

Tableau 3: Capacité équivalente de différents circuits.

3. Calculez la valeur théorique de la capacité équivalente, $C_s(\text{théo.}) \pm \Delta C_s(\text{théo.})$, en utilisant la capacité des condensateurs obtenue dans le Tableau 2 et notez le résultat à la première ligne du Tableau 3.
4. Notez la différence entre ces deux valeurs de la capacité équivalente C_s à la première ligne du Tableau 3. Sont-elles égales, à erreur près⁴?

Condensateurs en parallèle.

1. En utilisant le panneau de circuit électrique, branchez les trois condensateurs dans un circuit en *parallèle* comme à la Figure 3.
2. Mesurez et notez dans le Tableau 3 la capacité équivalente mesurée $C_p(\text{exp.}) \pm \Delta C_p(\text{exp.})$ de ce circuit.
3. Calculez la valeur théorique de la capacité équivalente, $C_p(\text{théo.}) \pm \Delta C_p(\text{théo.})$, en utilisant la capacité des condensateurs obtenue au Tableau 2. Notez le résultat à la deuxième ligne du Tableau 3.
4. Notez la différence entre ces deux valeurs de la capacité équivalente C_p à la deuxième ligne du Tableau 3. Sont-elles égales, à erreur près?

Combinaison en série et parallèle de trois condensateurs.

1. Le montage illustré à la Figure 4, ci-dessous, est une combinaison mixte (série et parallèle) de condensateurs. Pour calculer la valeur équivalente, il faut premièrement trouver la capacité équivalente aux deux condensateurs en parallèles seuls, à l'aide de l'équation (4). Ensuite, ce condensateur équivalent est en série avec le troisième condensateur, ce qui donne finalement la capacité du condensateur équivalent total, en utilisant l'équation (3).

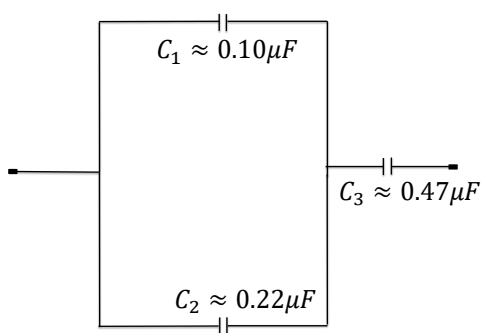


Figure 4: Combinaison mixte de condensateurs.

⁴Remarque: $\frac{\Delta C_s(\text{théo.})}{C_s^2(\text{théo.})} = \frac{\Delta C_1}{C_1^2} + \frac{\Delta C_2}{C_2^2} + \frac{\Delta C_3}{C_3^2}$.

2. En utilisant le panneau de circuit électrique, branchez les trois condensateurs selon la combinaison en série et parallèle montrée à la Figure 4.
3. Mesurez la capacité équivalente observée $C_{\text{comb}}(\text{exp.}) \pm \Delta C_{\text{comb}}(\text{exp.})$ de ce circuit (troisième ligne du Tableau 3).
4. Calculez la valeur théorique de la capacité équivalente $C_{\text{comb}}(\text{théo.}) \pm \Delta C_{\text{comb}}(\text{théo.})$, en utilisant la capacité des condensateurs du Tableau 2. Notez le résultat à la troisième ligne du Tableau 3.
5. Notez la différence entre ces deux valeurs de la capacité équivalente C_{comb} à la troisième ligne du Tableau 3. Sont-elles égales, à erreur près?

4 Résultats et analyse

Vérifiez l'équation (2) en traçant un graphique de d , en axe des y , en fonction de $1/C$, en axe des x . Déterminez une valeur expérimentale de la permittivité du vide $\varepsilon_0 \pm \Delta\varepsilon_0$ en utilisant les résultats de votre graphique et le rayon mesuré des plaques. Comparez cette valeur expérimentale avec la valeur théorique de $\varepsilon_0 = 8.8581878 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N}\cdot\text{m}^2}$.

1. L'équation (2) est vérifiée en traçant un graphique de d , en axe des y , en fonction de $1/C$, en axe des x . Quelles quantités correspondent à la pente et à l'ordonnée à l'origine de ce graphique?
2. Montrez que les unités de la quantité théorique dans la question (1) représentant la pente sont consistantes avec les vraies unités de la pente du graphique.
3. Prouvez les équations (3) et (4) pour les combinaisons de condensateurs, en utilisant l'équation (1), le fait que des condensateurs en série ont la même charge et que leurs potentiels s'additionnent, et le fait que des condensateurs en parallèle ont le même potentiel et que leurs charges s'additionnent.
4. Obtenez l'expression pour l'erreur de la capacité équivalente du circuit en série (ΔC_s), et aussi celle de la capacité équivalente du circuit en parallèle (ΔC_p).

RÉSISTANCES

1 But

Pour un matériau ohmique, la résistance (en anglais, *resistance*) est la constante de proportionnalité entre la grandeur du courant dans une composante électronique à la différence de potentiel aux extrémités de cette composante. Le mot résistance (en anglais, *resistor*) représente aussi un dispositif électronique dont la valeur de la résistance est constante. Cette expérience¹ contient cinq parties:

1. Loi d'Ohm
2. Valeurs de la résistance
3. Résistances en série
4. Résistances en parallèle
5. Circuit mixte

2 Théorie

Nous définissons la *résistance* d'un matériau comme

$$R = \frac{V}{I}. \quad (1)$$

où V est la chute du voltage à travers le dispositif et I est le courant qui passe dans ce dispositif. Si le dispositif obéit à la loi d'Ohm, alors R est constant et

$$V \propto I. \quad (2)$$

Une résistance est aussi un dispositif conçu pour obéir la loi d'Ohm sur un grand intervalle de voltages et de courants. Les autres dispositifs dont la résistance $R = \frac{V}{I}$ n'est pas constante, sont dits "non-ohmiques".

La puissance P dissipée dans un appareil est donnée par l'équation

$$P = IV \left(= I^2 R = \frac{V^2}{R} \right) \quad (3)$$

où P est en watts si I est en ampères et V est en volts. L'indice de puissance d'un appareil est la puissance maximale que l'appareil peut dissiper sécuritairement. S'il est dépassé, le dispositif

¹Adaptation et traduction de: Experiment 16 - Resistance, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

peut chauffer et être endommagé de manière permanente. Par exemple, si le fabricant d'une résistance R indique un indice de puissance de 1 watt, alors la puissance doit être gardée en dessous de 1 watt.

2.1 Résistances en série et en parallèle

Si trois résistances R_1 , R_2 et R_3 sont reliées en série comme à la Figure 1,

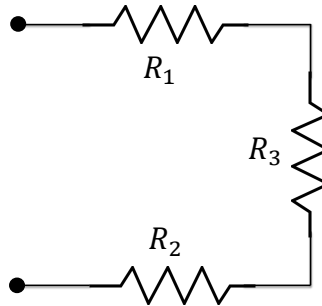


Figure 1: Résistances en série

le courant I qui passe dans chacune des résistances est le même, c.-à-d. $I = I_1 = I_2 = I_3$. La résistance R_s équivalente est donnée par

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3. \quad (4)$$

Par contre, si trois résistances R_1 , R_2 et R_3 sont reliées en parallèle comme à la Figure 2,

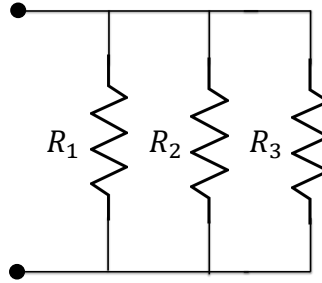


Figure 2: Résistances en parallèle

c'est la chute de potentiel à travers chacune des résistances qui est la même ($V = V_1 = V_2 = V_3$). La résistance R_p équivalente est donnée par

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (5)$$

3 Questions

(Insérez votre réponse dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

1. Dessinez de nouveau le diagramme de la Figure 3 en y incluant l'appareil qui mesure le voltage aux bornes de R_1 et l'appareil qui mesure le courant qui circule dans R_3 .

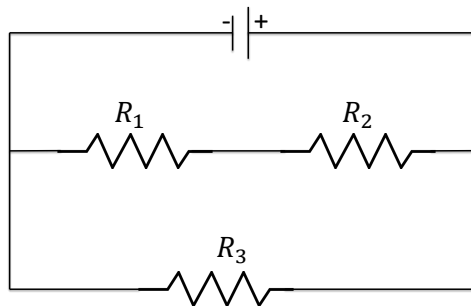


Figure 3

2. L'équation (1) est vérifiée en traçant le graphique de V en fonction de I . Déterminez les quantités correspondantes à la pente et à l'ordonnée à l'origine.

3. En utilisant les énoncés de la section *Théorie* de cette expérience, prouvez les équations (4) et (5) pour le circuit de résistances en série et celui en parallèle.
4. Trouvez l'expression de la résistance équivalente R_{mixte} en termes des résistances R_1 , R_2 et R_3 pour le circuit mixte de la Partie 5, donné à la Figure 5.

4 Matériels

- Une ampoule électrique,
- trois résistances,
- un ampèremètre (ou un multimètre), un voltmètre (ou un multimètre), un ohmmètre (ou un multimètre) et
- une source de courant.

4.1 PARTIE 1: La loi d'Ohm.

Le but est de vérifier à l'aide d'un graphique si la résistance R_1 de $100\ \Omega$ se comporte selon la loi d'Ohm.

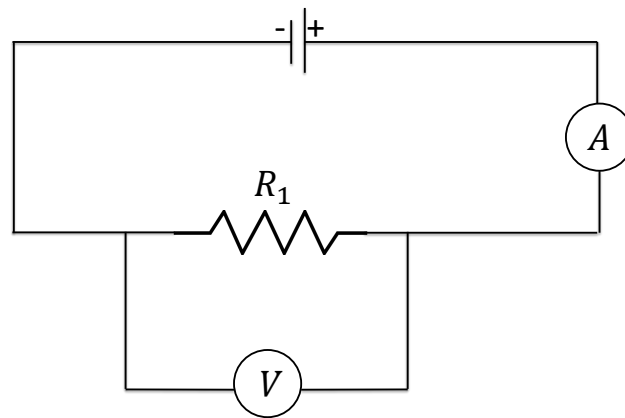


Figure 4

1. Montez le circuit de la Figure 4, ci-dessus.
2. Variez le potentiel de 1 à 5 volts, par sauts d'environ 0.5 volt. Prenez les lectures du courant I et du potentiel V pour chaque saut du potentiel et notez-les dans un tableau comme celui ci-dessous. L'erreur des mesures est ± 1 de la dernière décimale affichée sur le multimètre.

Résistance de 100 ohms	
courant $I \pm ?$ (A)	voltage $V \pm ?$ (V)

Tableau 1: Vérification de la loi d'Ohm pour une résistance

3. Remplacez la résistance par une ampoule de 60 watts. Répétez les mesures et complétez un tableau semblable à celui ci-dessous.

Ampoule de 60 W	
courant $I \pm ?$ (A)	voltage $V \pm ?$ (V)

Tableau 2: Vérification de la loi d'Ohm pour une ampoule

4.2 Analyse des résultats - Partie 1

1. Déterminez graphiquement la résistance R_1 et comparez-la à la valeur du fabricant, $100 \Omega \pm 5\%$.
2. Tracez un autre graphique, celui pour l'ampoule de 60 watts. Est-ce que l'ampoule obéit à la loi de Ohm? Comment est-ce que la résistance de l'ampoule peut-elle être déterminée?
3. Vérifiez que la puissance maximale P dissipée par la résistance n'a pas été dépassée durant la prise des observations précédentes. Selon le fabricant, l'indice de puissance de cette résistance est de 2 watts.

4.3 PARTIE 2: Comparaison de la résistance citée par le fabricant et celle mesurée avec un ohmmètre

On vous fournit trois résistances dont le fabricant a spécifié leur valeur avec une tolérance de $\pm 5\%$; $R_1 \approx 100 \, \Omega$, $R_2 \approx 47.0 \, \Omega$ et $R_3 \approx 150 \, \Omega$. La valeur de la résistance peut être déterminée directement avec un ohmmètre (ou un multimètre). Il n'est pas nécessaire de connecter la résistance à d'autres composantes de circuit, comme une source de courant.

Mesurez la valeur des trois résistances en utilisant un multimètre (sélectionnez l'échelle k Ω). Pour l'erreur sur la lecture, utilisez ± 1 de la plus petite unité, et additionnez-y 0.2% de la valeur mesurée (voir le manuel d'instruction de l'appareil).

	Valeur du fabricant $\pm 5\%$ (ohms)	Valeur mesurée avec un ohmmètre $\pm ? \pm 0.2\%$ (ohms)	Différence entre les valeurs (ohms)
R_1	100.0 ± 5.0	$\pm ?$	$\pm ?$
R_2	47.0 ± 2.4	$\pm ?$	$\pm ?$
R_3	150.0 ± 7.5	$\pm ?$	$\pm ?$

Tableau 3: Comparaison entre $R_{\text{fabricant}}$ et $R_{\text{mesurée}}$

Est-ce que la valeur mesurée pour chacune des résistances est égale, à erreur près, à la valeur citée par le fabricant? Laquelle des valeurs est la plus précise (possède la plus petite erreur): celle citée par le fabricant ou celle mesurée avec le multimètre? Utilisez la valeur la plus *précise* dans les parties subséquentes de l'expérience.

4.4 PARTIE 3: Résistances en série

Reliez R_1 , R_2 et R_3 dans un circuit en série (voir Figure 1). Mesurez la résistance équivalente R_s en utilisant un ohmmètre ou un multimètre. Complétez le Tableau 4.

Valeur calculée de R R_{calc} (ohms)	Valeur mesurée de R R_{mes} (ohms)	Différence $ R_{\text{calc}} - R_{\text{mes}} $ (ohms)
$\pm ?$	$\pm ?$	$\pm ?$

Tableau 4: Comparaison entre la résistance calculée et la résistance mesurée

Comparez votre valeur mesurée de R_s à celle calculée théoriquement, en utilisant la valeur la plus précise de chacune des trois résistances de la Partie 2. Sont-elles égales, à erreur près?

4.5 PARTIE 4: Résistances en parallèle

Reliez R_1 , R_2 et R_3 dans un circuit en parallèle, comme à la Figure 2. Mesurez la résistance équivalente R_p en utilisant un ohmmètre ou un multimètre. Insérez vos résultats dans un tableau comme le Tableau 4.

Comparez votre valeur mesurée de R_p à celle calculée théoriquement, en utilisant la valeur la plus précise de chacune des trois résistances de la Partie 2. Sont-elles égales, à erreur près²?

4.6 PARTIE 5: Circuit mixte

Reliez R_1 , R_2 et R_3 en un circuit mixte (série et parallèle) tel qu'illustré à la Figure 5. Mesurez la résistance équivalente R_m en utilisant un ohmmètre ou un multimètre. Insérez vos résultats dans un tableau comme le Tableau 4.

Comparez votre valeur expérimentale mesurée de R_m à celle calculée théoriquement, en utilisant la valeur la plus précise de chacune des trois résistances de la Partie 2. Sont-elles égales, à erreur près?

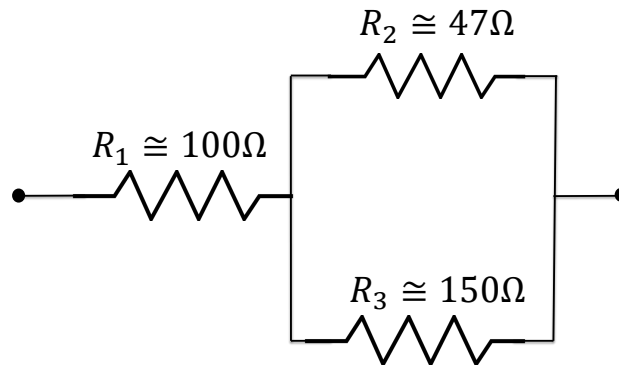


Figure 5

²Remarque: $\frac{\Delta R_p}{R_p^2} = \frac{\Delta R_1}{R_1^2} + \frac{\Delta R_2}{R_2^2} + \frac{\Delta R_3}{R_3^2}$.

LOIS DE KIRCHHOFF

1 Introduction.

Les deux lois de Kirchhoff rendent l'analyse des circuits électriques plus systématique. La première loi de Kirchhoff stipule que la somme algébrique des courants à un noeud est nulle, $\sum_{\text{noeud}} I = 0$. Autrement dit, la somme des courants qui entrent dans un noeud est égale à la somme des courants qui sortent du noeud. La deuxième loi de Kirchhoff affirme que la somme algébrique des différences de potentiels dans une boucle fermée est nulle $\sum_{\text{boucle}} \Delta V = 0$.

Dans cette expérience, vous vérifierez expérimentalement les lois de Kirchhoff de deux différents circuits électriques à courant continu:

Partie 1: Circuit à trois résistances de la Figure 1

Partie 2: Pont de Wheatstone de la Figure 4

Vous comparerez les valeurs théoriques calculées des courants avec les valeurs observées expérimentalement.

2 Questions

(Insérez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

1. Considérez le circuit de la Figure 1, ci-dessous, en prenant $R_1 = 560 \, \Omega$, $R_2 = 330 \, \Omega$, et $R_3 = 100 \, \Omega$.

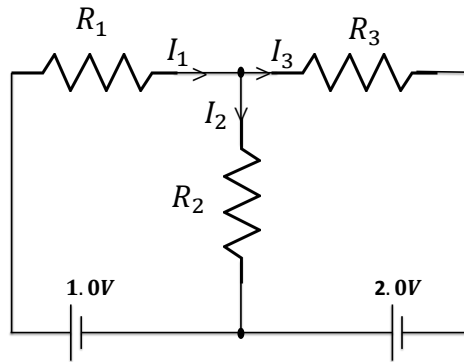


Figure 1

2. Écrivez la loi des noeuds en termes des variables I_1 , I_2 et I_3 .
3. Écrivez la loi des boucles en termes des mêmes variables pour *deux* boucles, en utilisant les valeurs numériques des résistances et des sources de fém.
4. En utilisant vos trois équations obtenues aux étapes 2 et 3, déterminez les valeurs théoriques de I_1 , I_2 et I_3 .

3 Matériels.

1. Planche à circuit de Pasco (Figure 2),
2. résistances (deux de $100\ \Omega \pm 5\%$, deux de $330\ \Omega \pm 5\%$, une de $560\ \Omega \pm 5\%$ et une de $270\ \Omega \pm 10\%$),
3. source de courant continu
4. multimètre.

Vous prendrez quand même une mesure de ces résistances avec le multimètre.

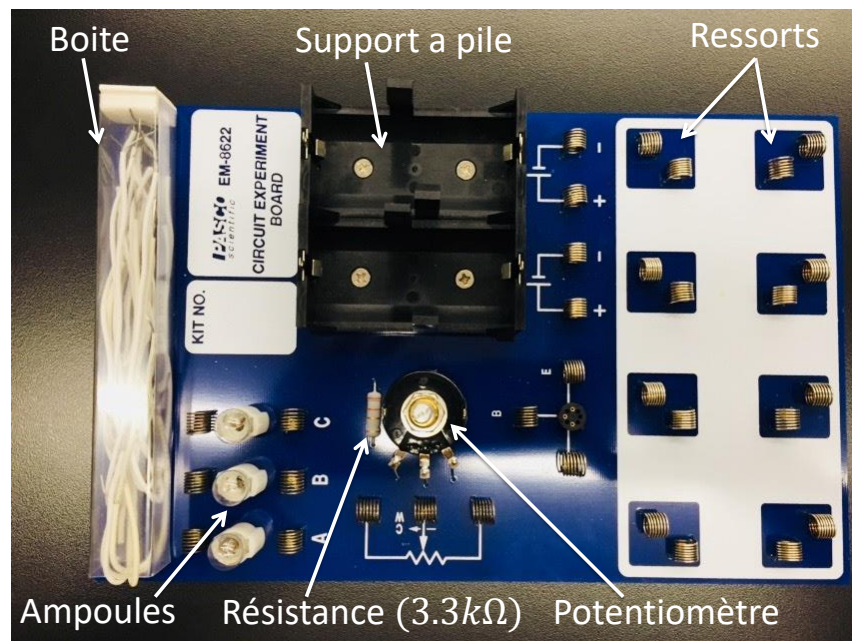


Figure 2: Planche à circuit

4 PARTIE 1

4.1 Manipulations

1. Préparez le montage du circuit de la Figure 1.
2. Mesurez la résistance de chacune des trois résistances du circuit, R_1 à R_3 , en utilisant un multimètre en mode ohmmètre. Lorsque vous prenez ces mesures, enlevez chaque résistance du circuit. Inscrivez vos valeurs à la première colonne du Tableau 1.

	Résistance (ohm)	Courant (A)		Voltage (V)
R_1		pt 1:	pt 5:	
R_2		pt 3:	pt 4:	
R_3		pt 2:	pt 6:	

Tableau 1: Mesures des résistances, voltages et courants de la Figure 2

3. Placez le multimètre en mode ampèremètre et mesurez le courant aux points 1 à 6 indiqués à la Figure 3. Notez vos mesures dans la deuxième colonne du Tableau 1.

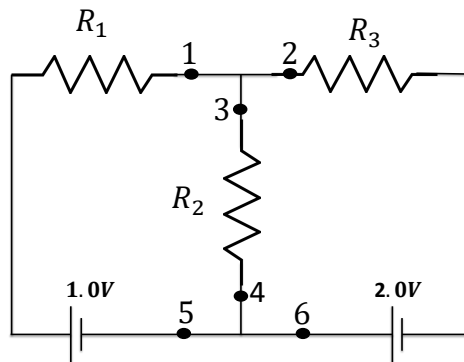


Figure 3

4. Placez le multimètre en mode voltmètre et mesurez la différence de potentiel aux bornes des trois résistances et des sources de fém. Notez vos mesures dans la troisième colonne du Tableau 1.

4.2 Analyse des résultats

1. Comparez vos résultats pour les mesures de courant aux points 1 et 5 de la Figure 3. Sont-ils semblables? Calculez la moyenne de ces deux valeurs pour la suite de l'analyse.
2. Même question pour les points 2 et 6 de la Figure 3.
3. Même questions pour les points 3 et 4 de la Figure 3.
4. Comparez les valeurs numériques que vous avez calculées à la Question 4 de la Section 3.1, avec les valeurs obtenues dans les trois étapes précédentes.

5 PARTIE 2

5.1 Manipulations

1. Préparez le montage du circuit de la Figure 4 à gauche en se référant au câblage de la figure de droite, avec les résistances suivantes: $R_1 = R_3 = 100$ ohms, $R_2 = R_4 = 330$ ohms et $R_5 = 560$ ohms. La valeur de la fém vous sera spécifié par votre instructeur de laboratoire.

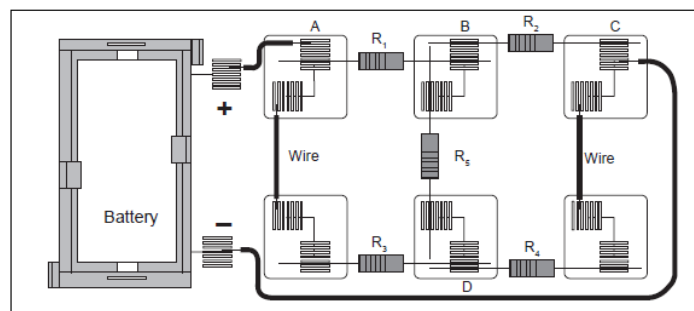
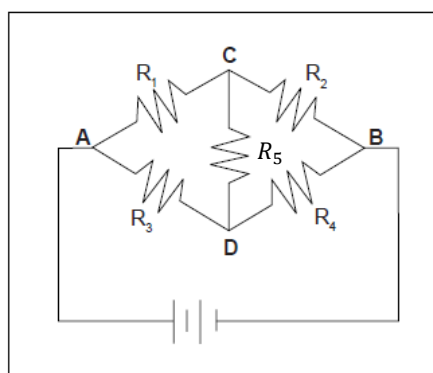


Figure 4

2. Mesurez et inscrivez la résistance de chacune des cinq résistances, R_1 à R_5 , dans la première colonne du Tableau 2.

	Résistance (ohm)	Voltage (V)	Courant (A)
R_1			
R_2			
R_3			
R_4			
R_5			

Tableau 2: Mesures des résistances, voltages et courants de la Figure 4

3. Mesurez la différence de potentiel aux bornes des cinq résistances et de la source de fém à la Figure 4. Notez vos mesures dans la deuxième colonne du Tableau 2. Notez aussi la polarité des résistances en traçant un $+$ à la borne positive de la Figure 4.
4. Mesurez le courant passant par chaque résistance ainsi que par la source de fém. Comme dans les parties précédentes, placez l'ampèremètre de chaque côté de la résistance et utilisez la moyenne de ces deux valeurs. Complétez la troisième colonne du Tableau 2.

5.2 Analyse des résultats

- Utilisez les lois de Kirchhoff pour déterminer la relation entre les résistances R_1 , R_2 , R_3 et R_4 qui fera en sorte que le courant passant par R_5 est égale à zéro.
- Est-ce que la relation découverte à l'étape 1 est satisfaite par vos données expérimentales?
- Si oui, est-ce que le courant mesuré dans R_5 est proche de zéro?

FORCE MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT

1 Théorie

Lorsqu'un courant électrique circule dans un fil conducteur, et que ce dernier est plongé dans un champ magnétique, le fil subira l'action de la *force magnétique* \mathbf{F}_M , tel qu'illustré à la Figure 1.

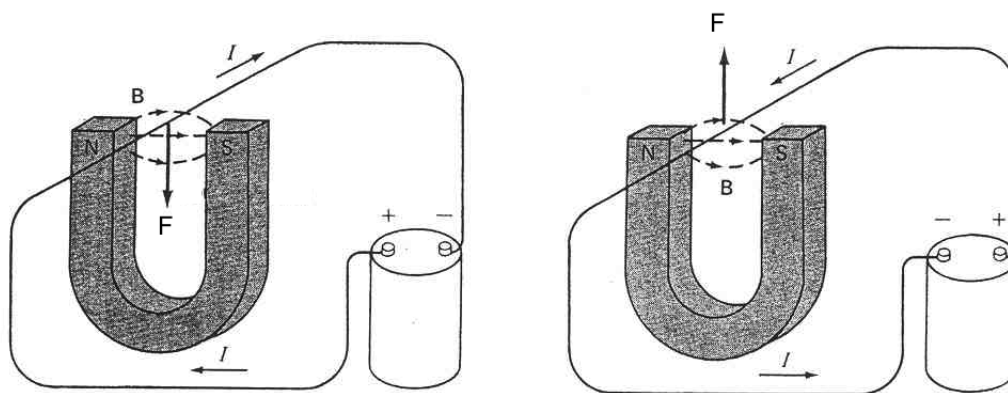


Figure 1

Les composantes du vecteur \mathbf{F}_M , c.-à-d. sa grandeur et sa direction, dépendent de quatre quantités: (1) le courant I qui circule dans le fil; (2) la longueur L du fil, qui constitue en fait un vecteur, \mathbf{L} , dont la direction est donnée par le sens du courant électrique; (3) l'intensité B du vecteur champ magnétique, \mathbf{B} ; et (4) l'angle θ entre le champ magnétique \mathbf{B} et le fil \mathbf{L} . L'intensité de la force magnétique est donnée par

$$F_M = ILB \sin \theta. \quad (1)$$

La direction de cette force est déterminée par la règle de la main droite, illustrée à la Figure 2. La force \mathbf{F}_M est perpendiculaire au plan formé par \mathbf{L} et \mathbf{B} . La notation vectorielle permet d'écrire ce résultat sous forme plus succincte:

$$\mathbf{F}_M = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}.$$

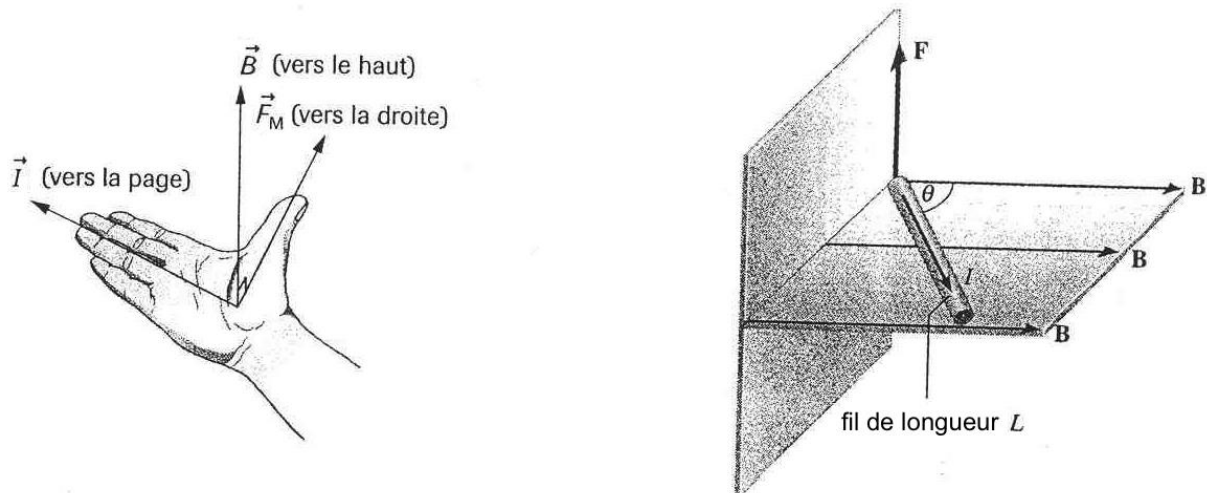


Figure 2: Règle de la main droite

La balance à courant Pasco SF-8607 permet de mesurer F_M en fonction de I , L , B ou θ . Dans l'expérience qui suit, nous allons vérifier l'effet du courant I , de l'intensité du champ magnétique B et de l'angle θ sur la force magnétique, F_M , exercée sur un fil électrique.

2 Matériels

La balance à courant (Figure 3) contient:

- la partie principale,
- six boucles de courant ayant différentes longueurs du fil électrique plongé dans le champ magnétique et le montage à aimants, qui peut contenir jusqu'à six aimants.

L'accessoire pour varier l'angle (Figure 4) contient:

- l'unité avec le cadran à angles
- et un montage à aimants (différent de celui de l'unité de base).

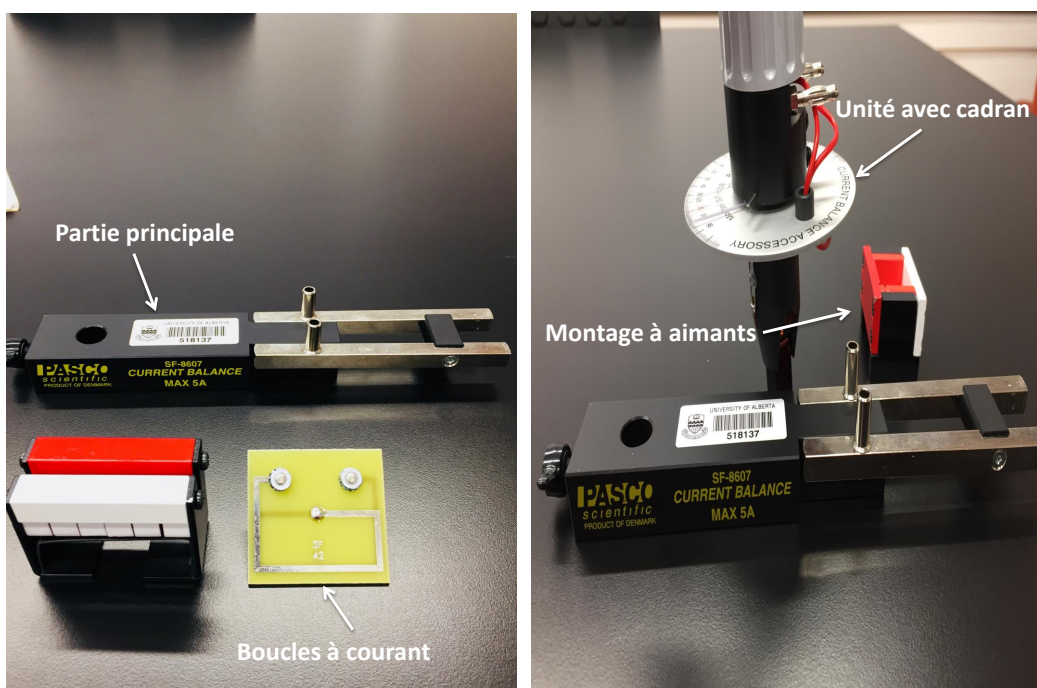


Figure 3: Balance à courant - unité de base

Figure 4: Accessoire pour varier l'angle θ

De plus, vous aurez besoin d'une source de courant, d'une balance qui mesure des forces avec une précision équivalente à une masse de 0.01 gramme, et d'un support expérimental universel (Figure 5).

3 Manipulations et analyse

3.1 Partie I: Relation du courant I sur la force magnétique F_M

1. La partie principale est déjà montée sur un support expérimental. Dans les deux petits orifices situés à l'extrémité de couleur argentée, insérez la boucle de courant SF42 tel qu'illustré à la Figure 5. La longueur du fil dans le champ magnétique pour la boucle de courant SF42 est $L = 8.4 \pm 0.2$ cm.

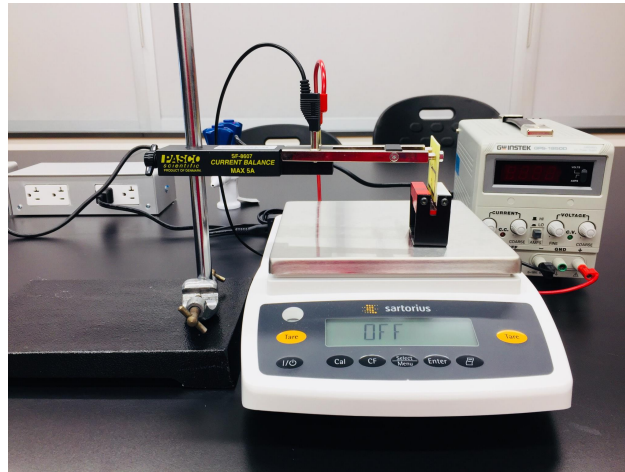


Figure 5: Montage expérimental de l'unité de base

2. Placez le montage à aimants sur la balance de manière à ce que la boucle de courant électrique soit alignée avec l'espace étroit au centre du montage à aimants. De chaque côté de cet espace se trouve le nord et le sud des aimants; c.-à-d. un côté est rouge et l'autre côté est blanc.
3. Ajustez la hauteur de la partie principale afin que la portion horizontale du fil électrique passe à travers la région du champ magnétique. La boucle de courant ne doit pas toucher aux aimants.
4. Lorsque la source de courant n'est pas en marche et qu'aucune valeur n'apparaît à l'afficheur (numéro 1 à la Figure 6), pesez le montage à aimants à 0.01 gramme près. Notez cette lecture de la balance au Tableau 1 (à la rangée $I = 0.00$ A).

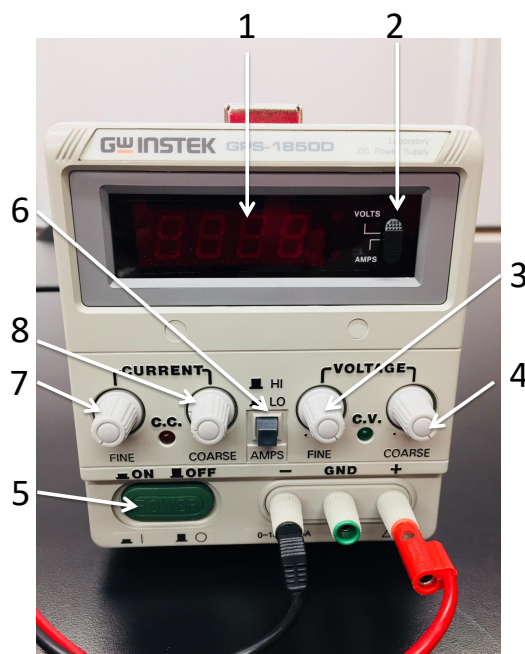


Figure 6: Source de courant

Courant I ($\pm ?$ A)	Lecture de la balance ($\pm ?$ grammes)	“Masse de F_M ” ($\pm ?$ grammes)	F_M ($\pm ?$ N)
0.00			
0.50			
1.00			
\vdots			
4.50			
5.00			

Tableau 1: Données expérimentales pour F_M en fonction de I .

- Avant de brancher la source de courant, les deux boutons du voltage (numéros 3 et 4 à la Figure 6) devraient être tournés vers la droite, en position maximale.
- Mettez la source de courant en marche en appuyant sur le bouton “POWER” (numéro 5 à la Figure 6) . Vérifiez que l’appareil soit ajusté à la grande échelle du courant et qu’il affiche deux décimales (numéro 6 à la Figure 6). Ajustez la source de courant à 0.50 A. Pesez de nouveau le montage et notez cette valeur au Tableau 1 sous la colonne de la lecture de la balance.
- Pour calculer la “Masse de F_M ”, soustrayez la lecture de la balance à 0.00 A de la lecture de la balance à 0.50 A.

8. Augmentez le courant par sauts de 0.50 A jusqu'à une valeur maximum de 5.0 A et notez ces lectures de la balance au Tableau 1. Calculez pour chaque valeur la "Masse de F_M " en soustrayant la lecture de la balance à 0.00 A.
9. Une fois terminé Appuyez à nouveau sur l'interrupteur "POWER" pour éteindre.

Tracez un graphique afin de pouvoir déterminer l'intensité du champ magnétique $B \pm \Delta B$ à partir de la pente. Déterminez les quantités pour l'axe des y , l'axe des x , la pente m et l'ordonnée à l'origine b de ce graphique. Est-ce que l'équation (1) est satisfaite par vos résultats?

3.2 Partie II: F_M en fonction de B

1. Gardez la boucle de courant SF42 ($L = 8.4 \pm 0.2$ cm) sur la partie principale du montage expérimental.
2. Enlevez le petit support en plastique noir situé sous les aimants, puis enlevez les six aimants du montage magnétique. Installez ensuite un seul aimant au centre du montage. Remplacez le petit support en plastique noir.
3. Placez le montage magnétique sur la balance et pesez le montage à aimants au 0.01 gramme près. Notez cette lecture de la balance au Tableau 2 sous la colonne "Masse" $I = 0.00$ A.

Nombre d'aimants	"Masse"		"Masse de F_M " (\pm ?grammes)	F_M (\pm ?N)
	$I=0.00$ A (\pm ?gramme)	$I \neq 0.00$ A (\pm ?gramme)		
1				
2				
\vdots				
6				

Tableau 2: Données expérimentales pour F_M en fonction de B .

4. Allumez la source de courant et ajustez-la à 2.00 A. Pesez la “Masse” $I \neq 0.00\text{A}$ au 0.01 gramme près et notez cette valeur au Tableau 2.
5. Pour compléter la colonne “Masse de F_M ”, soustrayez “Masse” $I = 0.00\text{A}$ de la “Masse” $I \neq 0.00\text{A}$.
6. Répétez les étapes 3 à 5 en ajoutant un aimant à chaque fois, et ce jusqu’à un total de six aimants.

Faites bien attention d’avoir toutes les faces blanches (ou rouges) du même côté (Figure 7 (a) et (b)) et non un mélange de blanches et rouges (Figure 7 (c)) à éviter.)

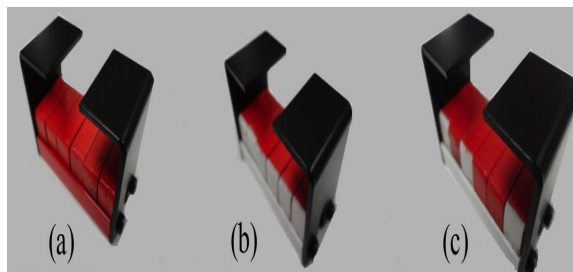


Figure 7: Montage à aimants

7. Tracez un graphique de la F_M (comme axe vertical) en fonction du nombre d’aimants (axe horizontal).
8. Selon vos résultats, est-ce que l’hypothèse selon laquelle le champ magnétique est proportionnel au nombre d’aimants semble justifiée avec ce montage?
9. Déterminez l’intensité du champ magnétique $B \pm \Delta B$ par aimant en utilisant la pente de votre graphique tracé à l’étape 7. Est-ce que cette valeur de B par aimant est égale à la valeur de B déterminée dans la partie I de cette expérience?
10. Selon vous, qu’arriverait-il si les aimants étaient alternés, c.-à-d. avec un pôle nord à côté d’un pôle sud ?

3.3 Partie III: F_M en fonction de θ

1. Remplacez la boucle de courant par l'unité avec le cadran à angles (Figures 4 et 8). Utilisez le support à aimants dont les aimants sont fixes et ne peuvent pas être enlevés.

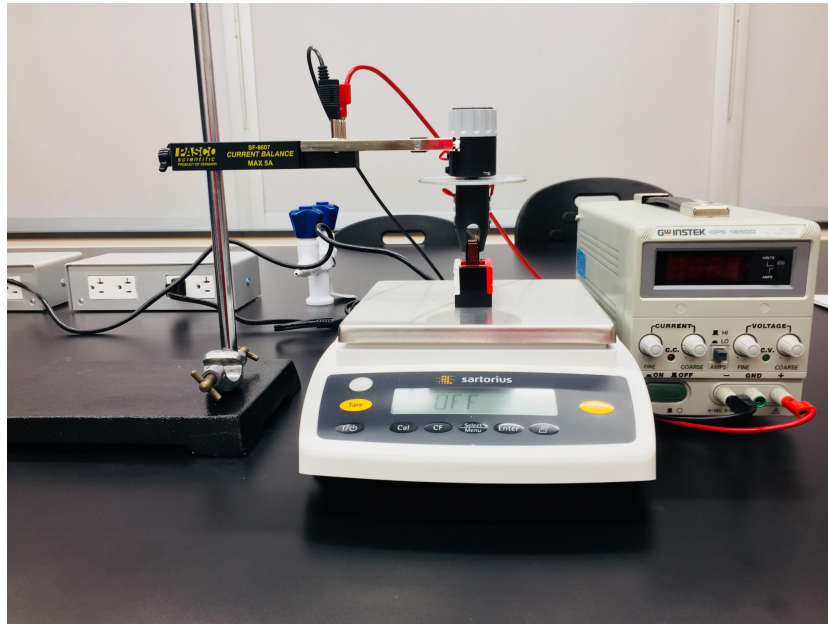


Figure 8: Montage expérimental pour varier l'angle θ

2. Lorsque la source de courant n'est pas en marche et qu'aucune valeur n'apparaît à l'afficheur (numéro 10 à la Figure 6), pesez le montage à aimants, au 0.01 gramme près. Notez cette lecture à l'endroit approprié ("Masse" $I = 0.00A$) sous le Tableau 3, ci-dessous.

Angle θ ($\pm ?^\circ$)	Lecture de la balance ($\pm ?$ grammes)	"Masse de F_M " ($\pm ?$ grammes)	F_M ($\pm ?N$)
0			
10			
20			
\vdots			
90			

Tableau 3: Données expérimentales pour F_M en fonction de $\sin \theta$.

3. Ajustez l'angle à 0° lorsque la direction du fil électrique est parallèle au champ magnétique.
4. Mettez en marche la source de courant et ajustez-la à 1.00 A. Pesez de nouveau le montage et notez la lecture de la balance au Tableau 3.
5. Pour calculer la “Masse de F_M ”, soustrayez “Masse” $I = 0.00\text{A}$ de lecture de la balance.
6. Augmentez l'angle par saut de 10° , pesez le montage à chaque fois et notez la lecture de la balance au Tableau 3.
7. Tracez un graphique de la F_M (axe vertical) en fonction de $\sin \theta$ (axe horizontal). Pour calculer l'erreur, utilisez $\Delta(\sin \theta) = |\cos \theta| \Delta\theta$ (θ en radians). À quels angles observe-t-on une force maximale? Est-ce que l'équation (1) est vérifiée par vos résultats?

CHAMP MAGNÉTIQUE INDUIT

1 But

Cette expérience porte sur le champ magnétique induit par un courant électrique. Elle contient quelques exercices avec des fils conducteurs et des boucles de courant. De plus, vous ferez une courte expérience avec des *bobines de Helmholtz*¹ pour vérifier l'équation (4), ci-dessous. Des bobines de Helmholtz consistent en une paire de boucles de courant.

2 Théorie

2.1 Fil conducteur droit infini

Le fil conducteur droit infiniment long parcouru par un courant I , représenté à la Figure 1, génère un champ magnétique \mathbf{B} dont la direction est donnée par la règle de la main droite, tel qu'illustré; le pouce pointe dans le sens du courant I et les doigts sont enroulés dans la direction de \mathbf{B} .

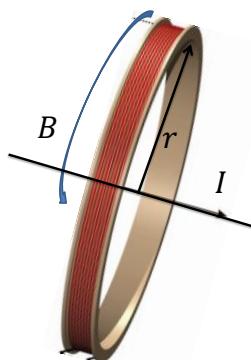


Figure 1: Fil conducteur

En un point situé à une distance r du fil, le champ magnétique \mathbf{B} est circulaire autour du fil et sa grandeur est

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}. \quad (1)$$

Ceci est la forme la plus simple de la *loi d'Ampère*.

¹La section sur les bobines de Helmholtz est une traduction et adaptation partielle de: Experiment 18 - Magnetic Fields, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

2.2 Champ magnétique au centre d'une boucle de courant

La Figure 2 montre une boucle de courant de rayon R qui génère un champ magnétique \mathbf{B} dont la direction est donnée par la règle de la main droite: si les doigts sont enroulés dans la direction du courant I , alors le pouce pointe dans la direction du champ magnétique \mathbf{B} .

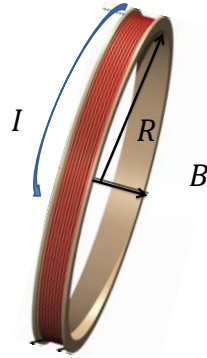


Figure 2: Boucle

Au centre de la boucle, la grandeur du champ magnétique \mathbf{B} vaut

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R}, \quad (2)$$

où N est le nombre d'enroulements de fil autour de la boucle. L'équation (2) est un cas particulier de l'équation (3), donnée plus bas.

Considérez la bobine représentée à la Figure 3.

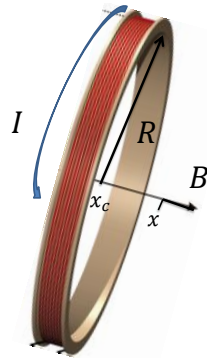


Figure 3: Bobine

Pour n'importe quel point x situé sur l'axe central de la bobine, centrée à x_c , le champ

magnétique \mathbf{B} est parallèle à l'axe central et sa grandeur est

$$B = \frac{\frac{1}{2}\mu_0 N R^2 I}{(R^2 + (x - x_c)^2)^{3/2}}. \quad (3)$$

Dans l'équation (3), le symbole N représente le nombre d'enroulements, R le rayon de la bobine, I le courant dans la bobine, x_c la position du centre de la bobine, et x la position où l'on calcule B .

2.3 Bobines de Helmholtz

Si une seconde bobine, semblable à la première, est placée parallèlement à la première, le long du même axe (voir Figure 4) et qu'une distance R (égale au rayon de chaque bobine) sépare les deux bobines, on appelle cette paire *bobines de Helmholtz*.

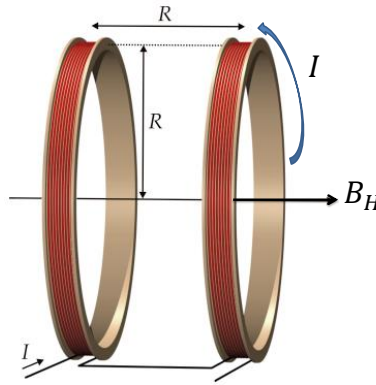


Figure 4: Bobines de Helmholtz

Comme vous le montrerez en exercice, on peut voir à l'aide de l'équation (3) que le champ magnétique le long de l'axe et à *mi-chemin* entre ces bobines est donné par

$$B_H = \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{\mu_0 N I}{R}. \quad (4)$$

3 Questions préliminaires

(Essayez d'y répondre avant la séance de laboratoire. Vous insérerez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

3.1 Fil conducteur droit

Un câble horizontal de ligne à haute tension se trouve à 26.0 m au-dessus du sol. Si un courant de 800 A circule à 20° à l'est du nord, quel sera le champ magnétique (grandeur et direction) généré par ce courant au niveau du sol?

3.2 Boucle de courant

- Prouvez l'équation (2) en utilisant l'équation (3) qui est plus générale.
- Avec Excel ou autre, tracez une graphique de B en fonction de x pour l'équation (3) pour une boucle centrée à $x_c = 0$ cm, de rayon $R = 11$ cm, avec $N = 250$ enroulements et parcourue par un courant égal à $I = 30$ mA. Tracez cette courbe pour environ $-40 < x < 40$ cm.
- Pour la boucle décrite en B, que vaut le champ B au point $x = 0$ cm?

3.3 Deux boucles de courant

Calculez le champ créé par deux boucles, en utilisant l'équation (3). À la position $x = 0.0$ cm, on place le centre d'une boucle de rayon $R = 15$ cm, avec $N = 200$ enroulements et parcourue par un courant $I = 40$ mA dans le sens horaire vu de la droite (c.-à-d. x positif). À la position $x = 28.0$ cm, on place le centre d'une seconde boucle de rayon $R = 20$ cm, avec $N = 400$ enroulements et parcourue par un courant $I = 30$ mA dans le sens horaire vu de la droite (c.-à-d. $x > 28.0$ cm). Quelle est la grandeur du champ magnétique B au point $x = 10.0$ cm sur l'axe des deux boucles? Ce champ pointe vers les x négatifs ou positifs?

3.4 Bobines de Helmholtz

- Prouvez l'équation (4) à l'aide de l'équation (3) pour deux boucles parcourues par des courants dans le même sens.
- Quel est l'analogue de l'équation (4) si les courants sont dans des sens opposés? Autrement dit, quel est le champ magnétique B le long de l'axe à mi-chemin entre ces bobines si un courant est dans le sens horaire et l'autre courant, dans le sens anti-horaire?

4 Expérience: Champ B en fonction de I dans des bobines de Helmholtz

1. Chaque bobine a le même nombre d'enroulements N . Le but de l'expérience est de déterminer la valeur de N en mesurant B_H au point milieu entre les deux bobines en fonction de I et en linéarisant l'équation (4). La pente nous permettra de calculer N et de le comparer avec la valeur donnée par le fabricant.
2. Placez les deux bobines en position parallèle et *séparées d'une distance égale au rayon des bobines R* . Pour ce faire, assurez-vous que les bobines soient bien au centre des rectangles blancs dessinés sur la base métallique.
3. Il y a deux types de bobines que vous pouvez utiliser pour cette expérience: 200 enroulements et 500 enroulements. *N'utilisez qu'UN des deux.*

Bobine avec 200 enroulements (Figure 5). On trouve sur chaque bobine trois prises de courants: deux blanches et une noire. Branchez ensemble les prises blanches externes respectives des deux bobines par un fil conducteur. Branchez ensuite la source de courant à la prise blanche interne de chacune des bobines, c.-à-d. branchez le $+$ à une bobine et le $-$ à la seconde bobine. La prise noire n'est pas utilisée.

Bobine avec 500 enroulements (non illustrée). Chaque bobine compte deux prises de courants, une blanche et une noire. Branchez ensemble les prises blanches des deux bobines par un fil conducteur. Branchez ensuite la source de courant à la prise noire de chaque bobine, c.-à-d. branchez le $+$ à une bobine et le $-$ à l'autre bobine.

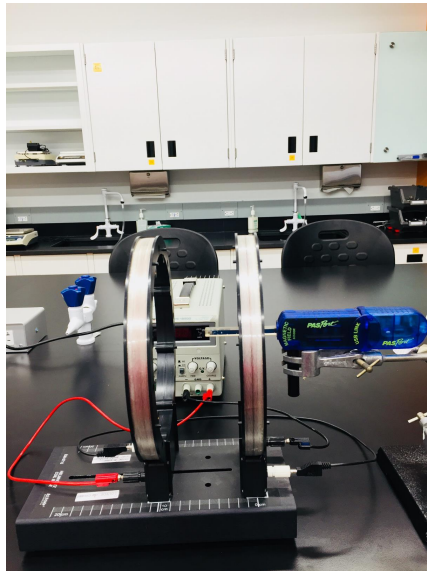


Figure 5: Bobine à 200 enroulements

4. Avant d'allumer la source de courant, assurez-vous que les deux boutons du voltage soient en position du voltage le plus élevé, c'est-à-dire tournés vers la droite (ces boutons sont situés sur le côté droit de l'appareil, #3 et #4 à la Figure 6). Vérifiez aussi que l'appareil soit ajusté à la petite échelle du courant en vous assurant que le bouton #6 soit à la position enfoncée.
5. Branchez la source de courant et appuyez sur le commutateur vert (#13 à la Figure 6) pour mettre l'appareil en marche. Vérifiez que l'affichage soit au mode AMPS (#2 à la Figure 6).
6. Ajustez le courant I à environ 0.000 A en utilisant les boutons pour le courant qui sont situés sur le côté gauche de l'appareil (#8 pour les grands ajustements et #7 pour les petits).

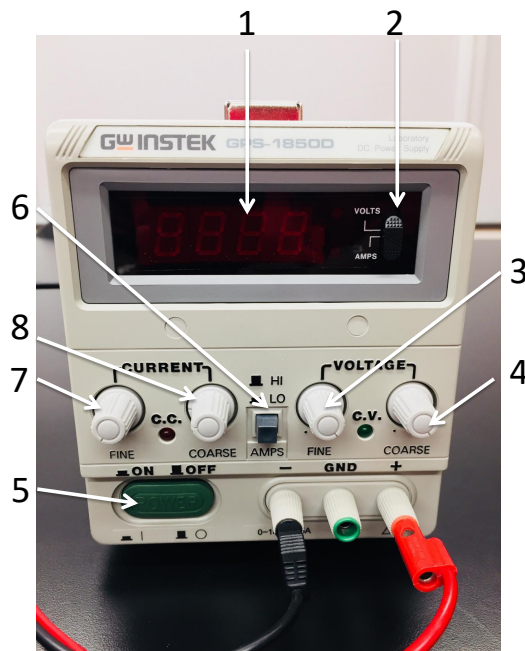


Figure 6: Source de courant

7. Branchez le dispositif bleu *Pasport* au détecteur de champ magnétique qui est un autre dispositif bleu (montré à la Figure 5). Placez l'extrémité de la sonde de Hall au centre des bobines aussi précisément que possible.
8. Cliquez sur l'icône de Sparkvue et suivez les étapes.
9. Cliquez sur enregistrez. Si la valeur de B_H est négative, inversez les fils branchés à la source de courant.
10. *Bobines avec 200 enroulements.* Faites varier le courant I par sauts de 0.100 A jusqu'à 1.000 A.
Bobines avec 500 enroulements. Faites varier le courant I par sauts de 0.050 A jusqu'à 0.500 A.
Peut importe les bobines utilisées, prenez les mesures du courant I et du champ magnétique B_H à chaque fois.

À partir de vos résultats, vous tracerez le graphique de B_H en fonction de I . Avec l'équation (4), déduisez-en la valeur du nombre d'enroulements N , en prenant le rayon des bobines indiqué sur celles-ci. Comparez votre valeur expérimentale de N à la valeur théorique du fabricant, indiquée sur les bobines.

ANNEXES

Table des matières

1	Introduction au calcul d'erreur	2
2	Détermination de l'erreur sur une mesure	3
2.1	Erreur sur une mesure individuelle	3
2.2	Erreur sur une mesure répétée	4
2.3	Types d'erreurs	5
3	Calcul d'erreur	6
3.1	Erreur sur une somme et une différence	6
3.2	Erreur sur un produit et un quotient	6
3.3	Erreur sur une puissance	7
3.4	Erreur sur une fonction générale	7
4	Chiffres significatifs	9
5	Analyse graphique	12
5.1	Construction d'un graphique	12
5.2	Utilisation des graphiques	13
5.3	Analyse d'un graphique	13
5.4	Erreurs sur les graphiques	17

1 Introduction au calcul d'erreur

La section *Analyse d'erreur* de vos rapports de laboratoire est basée essentiellement sur deux étapes: (1) la détermination expérimentale de l'incertitude (ou l'*erreur*) sur une mesure, et (2) le calcul d'erreur.

La vitesse de la lumière dans le vide est *exactement* égale à

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s},$$

car le mètre a été redéfini ainsi, en 1984. Nous prendrons donc $c_{\text{theor}} = c$. Si des étudiants effectuent une expérience qui leur donne

$$c_{\text{exp}} = 298\,740\,015 \text{ m/s},$$

alors l'erreur sur leur résultat est $\Delta c = c_{\text{theor}} - c_{\text{exp}} = 1\,052\,443 \text{ m/s}$. Cependant, une telle éventualité, où la valeur d'une quantité est connue très exactement, est extrêmement rare. Par conséquent, il est souvent impossible d'obtenir la valeur exacte de l'erreur sur une mesure expérimentale. La plupart du temps, tout ce que nous connaissons de l'erreur est *son existence*, et nous ne pouvons qu'évaluer approximativement sa grandeur.

Typiquement, deux expérimentateurs différents détermineront deux incertitudes différentes (mais proches l'une de l'autre); *il n'y a pas d'incertitude correcte, universelle, ou rigoureusement précise!* Le scientifique doit donc y mettre sa touche personnelle. Par contre, une fois que l'on connaît le résultat d'une mesure et l'incertitude sur cette mesure, le calcul d'erreur sur une quantité qui dépend de cette mesure est assez systématique, et il ne consiste qu'à appliquer des règles relativement simples. Ces règles sont expliquées à la section 5. Avant de discuter du processus d'évaluation d'une *mesure expérimentale*, mentionnons la définition de *mesure*:

Une **mesure** est l'association d'une grandeur physique à un nombre, par comparaison avec une grandeur étalon.

Une autre définition, pratiquement indissociable de la mesure, et celle d'*erreur*:

L'**erreur** sur un résultat expérimental est une évaluation de l'ensemble des valeurs possibles que peut prendre la quantité d'intérêt.

Pour en avoir une idée concrète, supposons que, le 17 mai 2011, vous soyez particulièrement intéressés à connaître votre *hauteur* très précisément. Si vous rencontrez un physicien pour la déterminer, il va probablement vous mesurer plusieurs fois au cours de la journée, déterminer la mesure maximale (c.-à-d. 158.8 cm), la mesure la plus basse (c.-à-d. 157.2 cm), la moyenne arithmétique $(158.8+157.2)/2=158.0$, et il affirmera donc: "Le 17 mai 2011, votre vraie taille se situait quelque part entre 157.2 cm et 158.8 cm". Il vous donnera probablement le résultat écrit sous la forme suivante:

$$h = 158.0 \pm 0.8 \text{ cm}.$$

En général, le résultat de n'importe quelle mesure fiable consistera en un ensemble de valeurs contenues dans un certain intervalle $[Q - \Delta Q, Q + \Delta Q]$ avec les unités appropriées. On écrira

$$Q \pm \Delta Q$$

pour représenter que $Q - \Delta Q \leq Q \leq Q + \Delta Q$. On a donc en général trois éléments:

1. la valeur moyenne Q ,
2. l'incertitude, ou erreur, ΔQ ,
3. les unités.

2 Détermination de l'erreur sur une mesure

2.1 Erreur sur une mesure individuelle

La meilleure façon de déterminer l'erreur sur une mesure est d'examiner de manière critique chaque étape du processus de mesure, et de juger la fiabilité des appareils de mesure. Par exemple, les facteurs suivants peuvent être pris en considération: l'interpolation entre les divisions de l'échelle; la prise d'une lecture ou de la position d'un objet le long d'une échelle; la parallaxe (*i.e.* lorsque l'échelle est regardée sous un certain angle); une lecture qui change; la précision de l'appareil de mesure; la sensibilité d'un appareil; les fluctuations des conditions expérimentales (c.-à-d. température); le facteur humain, ou précision de l'expérimentateur dans ses manipulations: ses réactions, réflexes, alignement, etc.

Une règle générale est de prendre en première approximation l'incertitude comme étant *la moitié de la plus petite division sur l'échelle*. Ensuite, les autres facteurs doivent être évalués et inclus, si approprié.

Supposons que nous désirions mesurer la largeur d'une table à l'aide d'un mètre. Nous devons tenir compte des facteurs suivants:

1. le coin de la table est légèrement arrondi;
2. le mètre est divisé en mm;
3. l'angle avec lequel l'échelle est regardée;
4. l'imprécision du mètre.

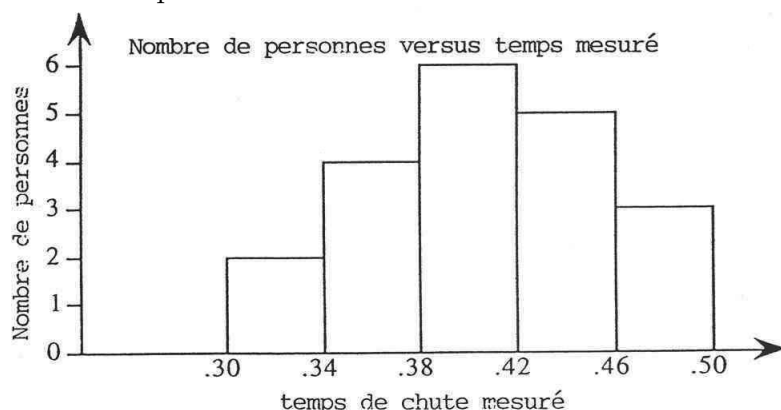
Nous jugeons qu'il y a une erreur totale d'environ 0.5 mm à chaque côté de la table, de sorte qu'au total, l'erreur combinée est d'environ 1 mm. Cet estimé est arbitraire mais raisonnable. On dira donc, par exemple, que "la largeur de la table est de 77.9 ± 0.1 cm."

2.2 Erreur sur une mesure répétée

Nature de l'erreur aléatoire

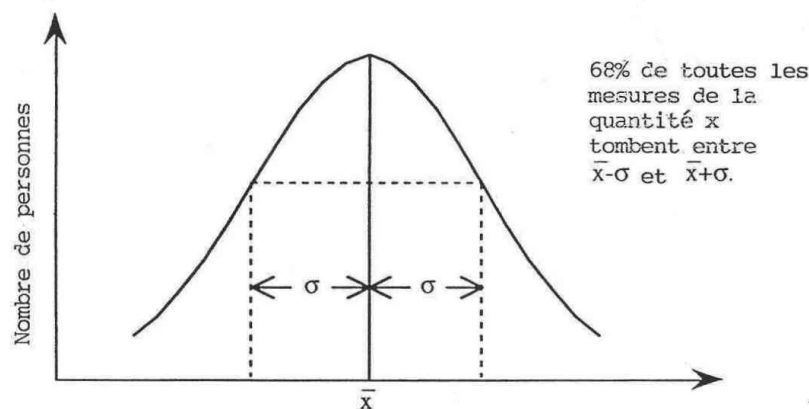
Supposons que l'on veuille mesurer le temps requis par une efface pour tomber du haut d'une table jusqu'au sol. À l'aide d'un chronomètre, nous répétons la mesure trois fois, et obtenons les résultats: 0.36 s, 0.45 s, et 0.32 s. Nous réalisons ensuite qu'il est difficile de déterminer exactement quand démarrer et quand arrêter le chronomètre. Si nos réflexes sont lents, alors l'erreur s'en trouve accrue.

Pour réduire l'erreur autant que possible, nous demanderons donc à vingt autres personnes de mesurer le temps de chute. Leurs résultats sont contenus dans l'histogramme ci-dessous:



Cet histogramme montre que deux personnes ont obtenu une valeur entre 0.30 et 0.34 s, quatre entre 0.34 et 0.38 s, six entre 0.38 et 0.42 s, cinq entre 0.42 et 0.46 s, et trois entre 0.46 et 0.50 s. Les données pourraient être exprimées à l'aide d'une graduation plus fine de l'axe des abscisses c.-à-d. en montrant plutôt le nombre d'observations dans des intervalles de 0.01 s ou 0.001 s.

Si nous augmentons le nombre de personnes, et diminuons la taille de la graduation de l'axe des abscisses, nous obtenons à la limite une courbe lisse: la distribution *gaussienne* ou *normale*:



En pratique, on ne peut pas prévoir exactement si une expérience aléatoire conduira à une telle distribution des résultats.

2.3 Types d'erreurs

Erreur limite

Lorsque nous écrivons nos mesures sous la forme $Q \pm \Delta Q$, nous devons distinguer les différents types d'erreurs que ΔQ peut représenter. Premièrement, nous parlons d'*erreur limite* lorsque ΔQ représente l'erreur maximale possible sur la valeur observée de Q . Cette incertitude est évaluée en jugeant de la pire erreur qui peut exister. Ce procédé requiert de l'intuition et de l'expérience. Il s'agit d'une sorte de "garantie" de validité de notre résultat, et sa valeur dépend en grande partie de la personne qui l'évalue. (Il existe un type d'erreur, appelé *erreur standard*, qui résulte d'un calcul statistique de l'erreur suite à des mesures répétées d'une même quantité.

Erreurs aléatoire et systématique

Une erreur *aléatoire* est causée par un facteur incontrôlable qui conduit habituellement à une distribution gaussienne. Supposons maintenant que l'on mesure le temps de chute d'une efface du haut d'une table, et que le chronomètre utilisé avance trop rapidement. Même si nous obtenons encore dans ce cas une distribution gaussienne, la valeur moyenne ne représente pas le vrai temps de chute. Il s'agit alors d'une *erreur systématique*. En principe, il s'agit d'une erreur sur laquelle l'expérimentateur a le contrôle (c.-à-d. en choisissant des appareils de mesure plus fiables), mais il se peut aussi que l'erreur soit impossible à détecter.

Erreur absolue et erreur relative

L'erreur peut être exprimée sous forme d'*erreur absolue*, telle que 4.057 ± 0.003 m, ou comme une *erreur relative*, telle que 4.057 m $\pm 1\%$. En résumé,

si l'**erreur absolue** sur une mesure de la quantité z est Δz , alors l'**erreur relative** sur z est $\frac{\Delta z}{z}$, et le pourcentage d'erreur vaut $(\frac{\Delta z}{z} \times 100)$.

En général il ne faut pas se laisser décourager par une très grande erreur relative. Selon le contexte, il se peut que votre résultat soit utile quand même. Par exemple, supposons que vous ayez un thermomètre précis à 0.5 °C. Si vous mesurez une température de 30 °C, alors l'erreur relative n'est que de 2% , et vous savez que le temps est très confortable. Cependant, s'il fait 0.1 °C, vous savez que ce n'est pas le temps idéal pour se baigner, et ce malgré une erreur relative de 500% .

Finalement, l'*écart* est la différence entre le résultat d'une expérience et un résultat plus communément acceptée, que l'on appelle parfois "valeur vraie".

3 Calcul d'erreur

Une fois qu'on connaît la valeur d'une quantité Q (incluant son erreur ΔQ), nous sommes généralement intéressés à évaluer une fonction $f(Q)$. Le but du calcul d'erreur est de connaître l'incertitude Δz , sur z .

L'ensemble de règles suivantes permet de procéder au calcul d'erreur pour la plupart de situations que vous rencontrerez dans ce cours. La justification de ces relations est obtenue à l'aide du concept de dérivée et de différentielle. Veuillez prendre note que dans tout ce qui suit, l'erreur absolue est positive.

3.1 Erreur sur une somme et une différence

Addition: si $z = x + y$, et que les erreurs sur x et y sont respectivement Δx et Δy , alors

$$z = x + y \longrightarrow \Delta z = \Delta x + \Delta y.$$

Soustraction: si $z = x - y$, alors

$$z = x - y \longrightarrow \Delta z = \Delta x + \Delta y.$$

Comme cette expression est un peu surprenante (qui ne s'attendait pas à obtenir plutôt $\Delta z = \Delta x - \Delta y$?), nous allons expliquer comment elle a été obtenue. Comme $x \pm \Delta x$, la valeur de x est située quelque part entre $x_{\min} = x - \Delta x$ et $x_{\max} = x + \Delta x$, et de même pour y . Calculons les écarts suivants:

$$\begin{aligned} z_1 &= x_{\max} - y_{\max} = x + \Delta x - (y + \Delta y) = (x - y) + (\Delta x - \Delta y), \\ z_2 &= x_{\max} - y_{\min} = x + \Delta x - (y - \Delta y) = (x - y) + (\Delta x + \Delta y), \\ z_3 &= x_{\min} - y_{\max} = x - \Delta x - (y + \Delta y) = (x - y) - (\Delta x + \Delta y), \\ z_4 &= x_{\min} - y_{\min} = x - \Delta x - (y - \Delta y) = (x - y) - (\Delta x - \Delta y). \end{aligned}$$

Nous voyons que z_{\max} est donné par $z_2 = (x - y) + (\Delta x + \Delta y)$ et que z_{\min} est donné par $z_3 = (x - y) - (\Delta x + \Delta y)$, de sorte que $\Delta z = \Delta x + \Delta y$.

En résumé, *l'erreur absolue sur une somme ou une différence est égale à la somme des erreurs absolues!*

3.2 Erreur sur un produit et un quotient

Multiplication par une valeur exacte: si $z = kx$, alors

$$\Delta z = kx \longrightarrow \Delta z = |k|\Delta x.$$

où $|k|$ est la valeur absolue du nombre *exact* k (c.-à-d. $\Delta k = 0$).

Multiplication de deux variables: si $z = xy$, alors

$$z = xy \longrightarrow \frac{\Delta z}{|z|} = \left(\frac{\Delta x}{|x|} + \frac{\Delta y}{|y|} \right).$$

Division: si $z = x/y$, alors

$$z = \frac{x}{y} \longrightarrow \frac{\Delta z}{|z|} = \left(\frac{\Delta x}{|x|} + \frac{\Delta y}{|y|} \right).$$

En résumé, *l'erreur relative sur un produit ou un quotient est égale à la somme des erreurs relatives!*

3.3 Erreur sur une puissance

Puissance: si $z = x^n$, alors

$$z = x^n \longrightarrow \frac{\Delta z}{|z|} = |n| \frac{\Delta x}{|x|}.$$

3.4 Erreur sur une fonction générale

Plusieurs lois physiques sont représentées par des fonctions trigonométriques, exponentielles, logarithmiques, hyperboliques, etc. Nous verrons un peu plus loin comment calculer les incertitudes sur de telles fonctions. Mais pour commencer, décrivons une méthode simple qui nous permette de contourner les calculs compliqués tout en nous donnant une bonne idée de l'incertitude résultante.

Calcul d'erreur direct

Supposons que nous ayons

$$z = f(x)$$

avec $x \pm \Delta x$, quelle est donc l'incertitude Δz sur la quantité z ? On a donc que $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$, avec $x_{\min} = x - \Delta x$ et $x_{\max} = x + \Delta x$. Nous déterminons Δz en évaluant $f(x)$ aux valeurs extrêmes x_{\min} et x_{\max} . Soit

$$\begin{aligned} f(x + \Delta x) &= z + \Delta z^+, \\ f(x - \Delta x) &= z - \Delta z^-, \end{aligned}$$

desquelles nous obtenons

$$\begin{aligned} \Delta z^+ &= f(x + \Delta x) - z = f(x + \Delta x) - f(x), \\ \Delta z^- &= z - f(x - \Delta x) = f(x) - f(x - \Delta x). \end{aligned}$$

Si la précision est assez bonne, nous devrions avoir $\Delta z^+ \approx \Delta z^-$, qui nous donnera alors notre Δz .

Exemple. Supposons que $\theta = 15^\circ 35' \pm 20'$, avec la relation

$$z = 3 \sin \theta.$$

Nous avons que

$$15^\circ 15' \leq \theta \leq 15^\circ 55',$$

d'où

$$\begin{aligned} \sin(15^\circ 15') &= 0.26303, \\ \sin(15^\circ 35') &= 0.26864, \\ \sin(15^\circ 55') &= 0.27424. \end{aligned}$$

Nous pouvons en calculer

$$\begin{aligned} z - \Delta z^- &= 3 \times 0.26303 = 0.78909, \\ z &= 3 \times 0.26864 = 0.80592, \\ z + \Delta z^+ &= 3 \times 0.27424 = 0.82272, \end{aligned}$$

ce qui donne $\Delta z^+ = 0.01680$ et $\Delta z^- = 0.01683$. Nous pouvons donc prendre comme incertitude absolue

$$\Delta z = 0.017,$$

et nous aurons pour z :

$$z = 0.806 \pm 0.017,$$

ou encore

$$z = 0.81 \pm 0.02.$$

4 Chiffres significatifs

Le nombre de *chiffres significatifs* dans la valeur d'une mesure ou du résultat d'un calcul en indique la précision. Il s'agit des chiffres qui, dans la valeur mesurée ou calculée, sont *connus avec certitude en plus du premier chiffre incertain*. Par exemple, des mesures peuvent ne compter qu'un chiffre incertain: le dernier. Ce dernier chiffre, quoique non exact, joue toutefois un rôle important et compte donc comme un chiffre significatif. Considérons le nombre 15.627, précis à 2%. L'incertitude est donc d'environ 0.3, de sorte que les trois décimales 0.627 sont incertaines. Nous n'allons donc garder que le 6, car les 2 et 7 sont incertains. De façon similaire, quand les dixièmes d'un nombre sont incertains, il est inutile de spécifier les centièmes ou les millièmes!

L'incertitude Δx sur la mesure d'une quantité x ne peut pas, par définition, posséder une précision infinie. Les facteurs qui jouent dans l'estimation de Δx ont été discutés précédemment. En général, Δx aura dans vos rapports de laboratoire un seul chiffre significatif, parfois deux. Le nombre de chiffres significatifs dans une mesure est, en général, différent du nombre de chiffres significatifs apparaissant dans l'incertitude.

Règle générale, le dernier chiffre significatif dans la quantité x et dans l'incertitude Δx devrait occuper la même position décimale. (Voir le point e, ci-dessous).

Exemple

Supposons qu'en mesurant la position d'une extrémité d'une corde avec un mètre à mesurer, la plus petite graduation soit 0.1 cm. Si on ignore les autres sources d'erreur, l'incertitude est égale à 0.05 cm. Si l'extrémité se trouve entre 16.2 et 16.3 cm, vous pouvez estimer qu'elle se trouve à 16.26 cm, puisque $\Delta x = 0.05$ cm vous permet de garder deux décimales (lorsque vous utilisez des cm). Cette mesure a donc *quatre* chiffres significatifs, avec le dernier étant approximatif. La valeur prendra donc la forme

$$16.26 \pm 0.05 \text{ cm.}$$

Si l'on considère d'autres sources d'erreurs, de sorte que l'incertitude totale soit 0.1 cm, nous n'aurions alors qu'une seule décimale dans notre mesure (en cm) et la valeur écrite deviendra

$$16.3 \pm 0.1 \text{ cm.}$$

qui compte maintenant trois chiffres significatifs.

a. Nombre de chiffres significatifs dans un nombre

Nous avons mentionné un peu plus haut que souvent, seul le dernier chiffre (d'un nombre représentant une quantité physique) devrait être incertain. En principe, ceci pourrait indiquer que le nombre de chiffres à gauche de ce chiffre sont significatifs, mais il faut aussi tenir compte de la présence de décimales et de zéros.

Les zéros situés à droite de chiffres non nuls sont significatifs alors que ceux situés à gauche ne le sont pas.

En effet, les zéros situés à gauche ne font que jouer le rôle de la notation scientifique. Nous en dirons plus à ce propos au point **e**, ci-dessous. Par exemple, 0.00345 compte trois chiffres significatifs, car ce nombre pourrait aussi bien s'écrire 3.45×10^{-3} . De même, 0.045000 a cinq chiffres significatifs: 4-5-0-0-0. Finalement, les six chiffres qui constituent le nombre 1340.00 sont significatifs.

b. Calculs

Pour déterminer le nombre de chiffres significatifs d'une valeur calculée à partir de mesures expérimentales, il faut premièrement déterminer l'incertitude sur la valeur finale en utilisant les règles de calcul d'erreurs données dans la section 1, plus haut. L'incertitude sur toutes vos mesures n'a qu'un (parfois deux) chiffre significatif, mais ils peuvent occuper diverses positions décimales. Ainsi, l'incertitude calculée ne peut avoir qu'un ou deux chiffres significatifs, mais la position décimale de ce chiffre déterminera le nombre de décimales que le résultat contiendra, étant donné que la règle générale ci-dessus doit toujours être satisfaite.

Lorsque vous effectuerez des calculs, gardez toujours en mémoire les conventions suivantes, qui sont un peu basées sur le principe que "la force d'une chaîne est déterminée par son chaînon le plus faible":

Pour les additions et les soustractions, l'expression finale doit être arrondi au même nombre de décimales que dans la valeur originale qui en compte le moins.

Exemples: $20.5 + 31.73 = 52.2$, $43.6 - 0.024 = 43.6$

Parfois, il est plus commode d'arrondir au même nombre de décimales avant d'effectuer l'opération arithmétique.

Pour les multiplications et les divisions, le résultat final doit contenir autant de chiffres significatifs que la valeur originale qui en contient le moins.

Exemples: $46.71 / 2.83 = 16.5053 = 16.5$, $2.345 \times 1.92 = 4.5024 = 4.50$

Lorsque vous effectuer plusieurs opérations consécutivement, vous devriez garder plus de décimales ou de chiffres significatifs, afin d'avoir une valeur finale correcte.

c. Exemples contenant des incertitudes

Soit $x_1 \pm \Delta x_1 = 50.35 \pm 0.05$ cm, et $x_2 \pm \Delta x_2 = 60.2 \pm 0.1$ cm.

Exemple d'addition. Si $z = x_1 + x_2$, alors $\Delta z = \Delta x_1 + \Delta x_2 = 0.05 + 0.1 = 0.2$ cm.

D'autre part, $z = x_1 + x_2 = 50.35 + 60.2 = 110.55$. La valeur de z ne doit contenir qu'une seule décimale, et donc $z = 110.6$ cm. Le résultat final s'écrit donc comme

$$x_1 + x_2 = 110.6 \pm 0.2 \text{ cm.}$$

Veuillez noter que z contient quatre chiffres significatifs, alors que x_2 n'en compte que trois. Pour les valeurs avec incertitude, la *règle générale* énoncée plus haut a priorité sur les règles pour les valeurs absolues énoncées ci-dessous.

Exemple de soustraction. Si $z = x_2 - x_1$, on a $z = 60.2 - 50.35 = 9.85 = 9.9$ cm, et le résultat final est (le Δz ayant été calculé dans l'exemple précédent)

$$x_2 - x_1 = 9.9 \pm 0.2 \text{ cm.}$$

Exemple de multiplication. Si $z = x_1 x_2$, en utilisant la règle du produit, nous calculons $\Delta z = |z| \left(\frac{\Delta x_1}{|x_1|} + \frac{\Delta x_2}{|x_2|} \right) = 8.05 = 8$ cm (puisque Δx_1 et Δx_2 n'ont qu'un chiffre significatif). D'autre part, $z = 3031.07 = 3031$ cm, et la valeur finale se lit donc

$$x_1 x_2 = 3031 \pm 8 \text{ cm.}$$

Exemple de division. Avec $z = x_1/x_2$, on a $\Delta z = |z| \left(\frac{\Delta x_1}{|x_1|} + \frac{\Delta x_2}{|x_2|} \right) = 0.00222 = 0.002$ cm (car on ne garde qu'un chiffre significatif), et comme $z = 50.35/60.2 = 0.83638 = 0.836$, nous devons écrire le résultat final comme suit:

$$\frac{x_1}{x_2} = 0.836 \pm 0.002 \text{ cm.}$$

d. Nombres exacts.

Les nombres exacts peuvent avoir un nombre illimité de décimales. Par exemple, dans $\frac{2}{3} = 0.666\cdots$, tous les 6 sont significatifs.

e. Nombres très grands ou très petits

Les chiffres significatifs sont indiqués plus clairement en utilisant la notation en puissance de dix (appelée également *notation scientifique*). Prenez note que lorsque des mesures ou des valeurs sont exprimées dans la notation scientifique, les incertitudes doivent être exprimées dans la même puissance de dix.

Supposons, par exemple, qu'un ancien ou une ancienne de la Faculté Saint-Jean affirme recevoir un salaire annuel de 110 000 dollars. À strictement parler, ce nombre semble contenir six chiffres significatifs, mais certains zéros peuvent être entachés d'incertitude. Si le salaire exact est de 113 257 dollars, alors on peut affirmer que seuls les deux premiers chiffres (1-1) sont significatifs. Si on affirme que le montant est de 110 000.00 dollars, alors il est très probable que l'on ait huit chiffres significatifs; on ne se serait pas donné le mal d'écrire les décimales si non, ce qui fait que les six zéros sont significatifs. Ainsi, pour être rigoureux, il est préférable d'utiliser la notation scientifique. Ainsi, 1.1×10^6 contient deux chiffres significatifs, alors que 1.100×10^6 en contient quatre (comme si, dans notre exemple, le salaire réel était de 110 083 dollars, les trois derniers zéros du 110 000 dollars étant alors incertains).

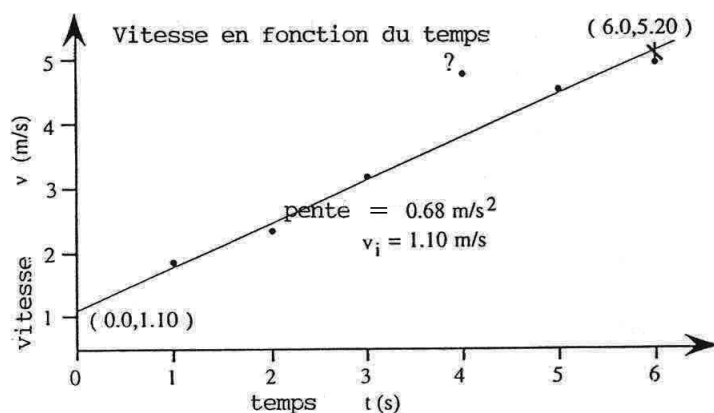
De la même façon, il est préférable d'écrire 0.0036 (deux chiffres significatifs) comme 3.6×10^{-3} , 0.00360 (avec trois chiffres significatifs) comme 3.60×10^{-3} , et 0.003600 (avec quatre chiffres significatifs) comme 3.600×10^{-3} . Quant aux incertitudes, il est préférable d'écrire 0.0036 ± 0.0002 plutôt sous la forme $(3.6 \pm 0.2) \times 10^{-3}$.

5 Analyse graphique

Les graphiques sont utilisés dans le but de faciliter l'analyse des données obtenues en laboratoire. La majorité des rapports scientifiques contiennent des graphiques. Par conséquent, il est important d'apprendre à les construire de façon efficace, et à les utiliser correctement pour interpréter la signification physique des données expérimentales.

5.1 Construction d'un graphique

- Donnez à chacun de vos graphiques un titre court qui décrit bien ce qu'il représente.
- Graduez les axes clairement, tout en indiquant les unités.
- À partir de vos données, déterminez l'étendue des valeurs numériques des points à tracer. Ensuite, choisissez l'échelle appropriée de façon à ce que votre graphique couvre la page le plus possible. Rappelez-vous que si un aspect de votre graphique vous dérange (c.-à-d. la courbe n'occupe qu'une infime fraction de tout l'espace disponible), il y a probablement lieu de modifier l'échelle. L'échelle est en général différente pour les deux axes. Aussi, l'axe n'est pas obligé de commencer à l'origine (on introduit dans ce cas une *brisure d'axe*).



- Employez la méthode appropriée pour tracer les données:
 - Identifiez les points du plan sur le graphique en plaçant les points aux endroits corrects. Les points doivent être assez gros pour être encore visibles après que l'on ait tracé une courbe qui passe par ces points.
 - Sur les graphiques illustrant les erreurs, les barres d'erreur sont centrées sur le point.
- Une fois tous les points tracés, examinez la forme générale de la courbe. Si les points tendent à former une droite, tracez alors une droite passant par autant de points que possible, de façon à

ce qu'il y ait approximativement autant de points au-dessus de la droite qu'en dessous. Négligez les points qui semblent totalement en dehors de la droite (vous pouvez les identifier à l'aide d'un point d'interrogation). La méthode est semblable si le graphique prend la forme d'une courbe quelconque.

5.2 Utilisation des graphiques

Un graphique est une façon élégante de présenter les données expérimentales. Certains résultats qui peuvent être obtenus des graphiques sont:

- En traçant une courbe continue par les points, on peut obtenir avec assez de précision les *points intermédiaires*. On peut vérifier ces points à l'aide d'autres mesures expérimentales.
- La forme de la courbe peut donner des indices quant à la *fonction* reliant les quantités physiques d'intérêt. Encore ici, d'autres mesures expérimentales peuvent permettre de confirmer ou d'infirmer cette identification.
- Quand une certaine relation entre deux variables peut être *prédite par la théorie*, un graphe illustre clairement et rapidement les régions où les données expérimentales s'écartent de cette relation.
- Un graphique peut être utilisé pour déterminer la valeur d'une variable hors de la région du graphique, en *extrapolant* la courbe dans la région désirée (*i.e.* en l'étendant selon la tendance générale que cette courbe prend dans la région dont on possède les données). Cette procédure est plus précise si la courbe est une droite.

5.3 Analyse d'un graphique

Ligne droite

La *droite* est le graphique le plus facile à analyser, car la relation fonctionnelle entre les différentes variables prend la forme:

$$y = mx + b,$$

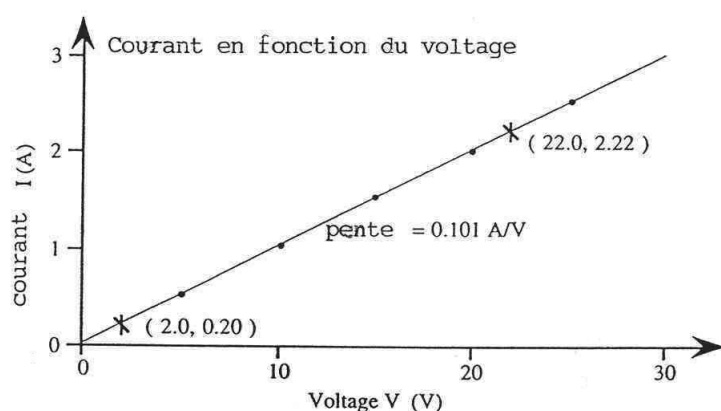
où y représente la variable dépendante (axe vertical), x est la variable indépendante (axe horizontal), m est une constante (la *pente* de la droite), et b est une seconde constante, qui représente l'intersection de la droite avec l'axe des y (*i.e.* l'*ordonnée* à l'origine).

Exemple

Supposons que vous désiriez étudier le comportement du courant électrique I qui circule dans une résistance, en fonction de la différence de potentiel V aux bornes de cette résistance. Vous pourriez alors effectuer une expérience où vous mesureriez le courant pour différentes valeurs de V . Supposez que les valeurs ainsi obtenues soient les suivantes:

Voltage V (volts)	Courant I (ampères)
5	0.51
10	1.02
15	1.48
20	2.02
25	2.48

Vous devriez tracer ensuite le graphique correspondant à ce tableau, en traçant I (sur l'axe y) en fonction de la variable indépendante V (sur l'axe x). Le graphique résultant a la forme suivante:



Ce graphique est linéaire et, par conséquent, il est décrit par l'équation

$$I = mV + b.$$

D'après le graphique, vous voyez que $b = 0$, de sorte que la fonction ci-dessus se réduit à

$$I = mV.$$

Il ne s'agit donc que de déterminer, à l'aide du graphique, la valeur de la pente m , en tenant compte de l'incertitude expérimentale. Pour ce faire, nous choisissons deux points de la droite assez éloignés l'un de l'autre (pas nécessairement des points expérimentaux), et calculons le rapport de l'écart des ordonnées à l'écart des abscisses. Les deux points choisis ci-dessus sont $(22.0, 2.22)$ et $(2.0, 0.20)$. La pente est donnée par

$$m = \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{(2.22 - 0.20) \text{ amperes}}{(22.0 - 2.0) \text{ volt}} = 0.101 \frac{\text{amperes}}{\text{volt}}.$$

L'unité volt/ampères est tout simplement l'unité de résistance: "ohm". Sachant que la pente représente $1/R$ (où R est la résistance), nous comparons $1/\text{pente} = 9.90 \text{ ohms}$ à la valeur connue

de la résistance, qui vaut 10 ohms. Comme ces deux valeurs coïncident à 1% près, nous pouvons écrire l'équation de la droite comme

$$I = \frac{V}{R}.$$

Nous avons donc utilisé un graphique comme méthode d'analyse des données pour investiguer la relation mathématique entre la différence de potentiel V et le courant I .

Graphiques non-linéaires et changements de variables

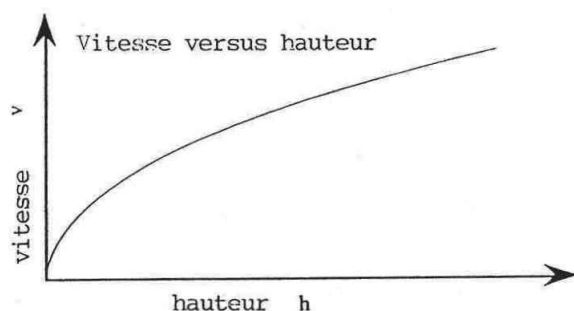
Lorsque le graphique associé à des données expérimentales est une courbe quelconque (non droite), il peut être difficile de trouver une relation fonctionnelle entre les différentes quantités physiques représentées sur le graphique. Cependant, dans certains cas il est possible de *linéariser* un graphique, c'est-à-dire de changer de variables de façon à obtenir une droite, en termes des nouvelles variables. Nous illustrons ci-dessous cette méthode à l'aide de quelques cas particuliers.

Méthode de changement de variables

Supposez que nous ayons à vérifier expérimentalement l'équation du mouvement d'un corps en chute libre:

$$v^2 = 2gh + v_0^2. \quad (1)$$

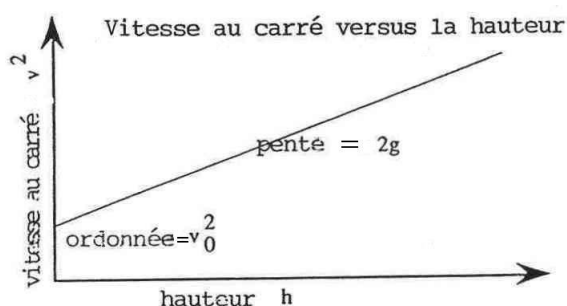
Vu que v est une fonction de h , nous recueillons des données pour v en fonction de différentes valeurs de h . Un graphique de v en fonction de h donnerait le graphique non-linéaire suivant:



En plus de ne pas être une droite, cette courbe ne passe pas par l'origine, mais plutôt par le point $(0, v_0)$. Par contre, si nous convertissons les données expérimentales de façon à tracer plutôt le graphique de $y = v^2$ en fonction de $x = h$, nous obtenons une droite dont la pente m est égale à $2g$, et dont l'ordonnée à l'origine b vaut v_0^2 . Nous avons donc introduit un changement de variables où la variable v^2 est sur l'axe y . Comme $2g$ et v_0^2 sont des constantes, nous avons la relation

$$v^2 = (\text{constante}) \times h + (\text{constante}),$$

ce qui correspond au format $y = mx + b$:



Ce graphique linéaire serait donc la vérification expérimentale de l'équation (1), et pourrait être utilisé pour déterminer g et v_0 .

Un autre exemple d'application de la méthode de changement de variables est lorsqu'on veut tester l'équation $F = ma$, où F est gardée constante pendant toute l'expérience. La relation entre a et m est $a = F(1/m)$, de sorte que si on trace a en fonction de $1/m$, le graphique résultant est une droite dont la pente vaut F .

Graphique log-log pour les relations de puissance

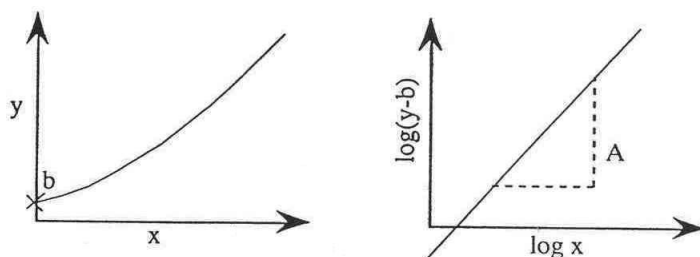
Nous allons illustrer ici un changement de variable qui s'applique aux *relations de puissance*, qui ont la forme

$$y = mx^A + b,$$

où A est un nombre réel fixe. Ce type de relation apparaît fréquemment en physique, et son graphique est une courbe. En général, il est pratiquement impossible de déterminer la puissance A simplement en traçant y en fonction de x . Une méthode simple consiste à isoler $y - b$ et à prendre le logarithme de chaque côté de l'équation, en utilisant la loi des logarithmes:

$$\log(y - b) = \log(mx^A) = \log(m) + A \log(x).$$

La valeur de b est l'ordonnée à l'origine du graphique de y en fonction de x (*i.e.* lorsque $x = 0$). On peut conclure, en regardant l'équation (5.3), que le graphique de $\log(y - b)$ en fonction de $\log(x)$ est une droite dont la pente est A , et l'ordonnée à l'origine, $\log(m)$.

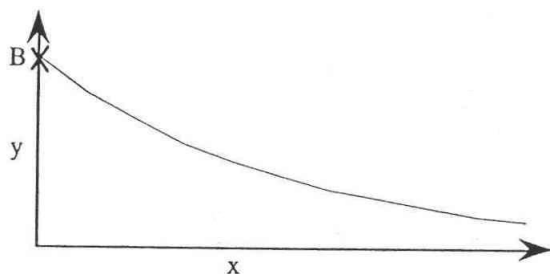


Si le graphique log-log n'est pas encore linéaire, c'est que la relation entre y et x n'est pas une relation de puissance (comme un polynôme, par exemple), et nous devons avoir recours à une autre méthode pour analyser la courbe.

Graphique semi-log pour les relations exponentielles

Une autre relation très commune en physique est celle où les variables sont reliées par une fonction exponentielle:

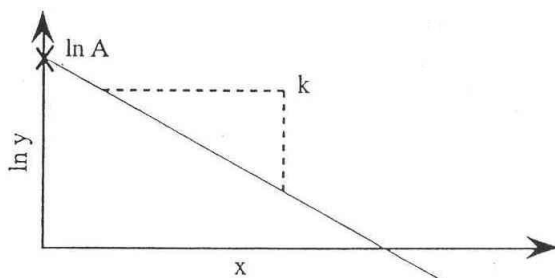
$$y = Ae^{kx}. \quad (2)$$



En calculant le logarithme népérien des deux côtés de l'équation (2), nous obtenons

$$\begin{aligned} \ln y &= \ln(Ae^{kx}), \\ &= \ln A + \ln(e^{kx}), \\ &= \ln A + kx = kx + \ln A. \end{aligned}$$

Ici, nous traçons donc $\ln y$ en fonction de x :



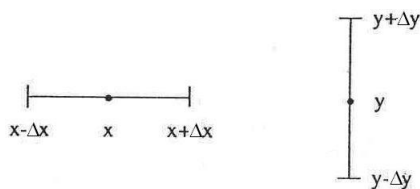
qui nous donne une pente de pente k et d'ordonnée à l'origine $\ln A$.

5.4 Erreurs sur les graphiques

Barres d'erreur

Tel que mentionné un peu plus loin (dans la section sur l'analyse d'erreur), toute mesure comporte une erreur. Cette erreur devrait être représentée sur votre graphique de données expérimentales. Ceci est fait de façon à ce que les résultats calculés à partir de votre graphique incluent l'incertitude appropriée dans leur valeur.

Les erreurs sont présentées sur un graphique sous la forme de *barres d'erreur*:



Erreur sur la pente et l'ordonnée à l'origine

Une fois que vous avez tracé tous les points sur votre graphique (avec les barres d'erreurs), une droite doit être tracée passant par chaque barre d'erreur. Toute ligne qui passe par toutes les barres d'erreur est valide. Si votre graphique semble être une courbe, alors fiez-vous aux barres d'erreur comme guide pour la courbe qui passe par la moyenne des points.

Cependant, si vos données et les erreurs donnent lieu à une ligne droite, certaines lignes peuvent être tracées par les barres d'erreur. La *droite maximum* est la droite qui touche toutes les barres d'erreur et qui a la plus grande pente. La *droite minimum* est la droite qui a la plus petite pente. La *droite moyenne* est la meilleure ligne droite qui tend vers la moyenne des fluctuations aléatoires des données. (Voir graphique plus bas.)

PENTE MAX=1.06 m/s

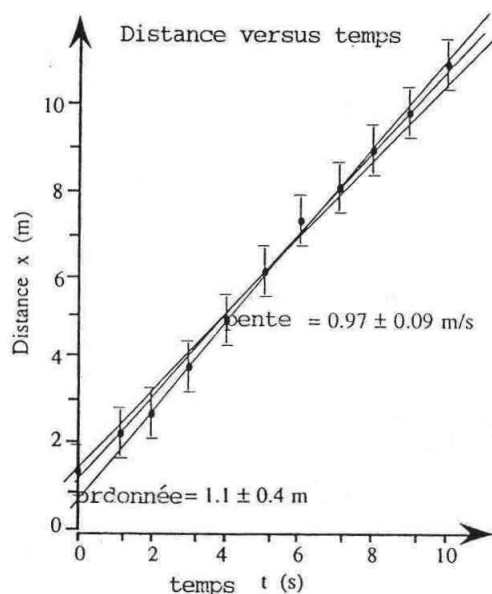
PENTE MOYENNE=0.97 m/s

PENTE MIN=0.90 m/s

PENTE MOYENNE-MAX=0.09 m/s

PENTE MOYENNE-MIN=0.07 m/s

En prenant 0.09 m/s comme incertitude sur la pente, nous concluons que la pente la plus probable est 0.97 ± 0.09 m/s. Ceci signifie que toutes les valeurs de pente entre 0.88 et 1.06 sont acceptables, mais que celles proches de 0.97 m/s sont plus probables. De la même façon, si les ordonnées à l'origine sont 0.8 m, 1.1 m et 1.5 m, alors l'ordonnée la plus probable est 1.1 ± 0.4 m.



Cas particuliers de lignes droites

Graphiques linéaires avec barres d'erreur négligables

Si la plupart des données forment une ligne droite, mais que les barres d'erreur sont trop petites, vous devriez retracer le graphique sur une surface plus grande.

Graphique linéaires de dispersion plus grande que les barres d'erreur

Cette situation suggère que la limite d'erreur estimée pour l'incertitude reliée à l'appareil de mesure est probablement plus petite que l'erreur sur la mesure elle-même. On devrait prendre plusieurs mesures afin de déterminer l'erreur aléatoire et confirmer que les données suivent effectivement une droite. En pratique, vous n'avez qu'à tracer les droites maximum et minimum, en utilisant la dispersion comme guide. La dispersion vous donnera également un bon estimé de l'incertitude sur la pente et sur l'ordonnée à l'origine.

