



PHYSQ 124

Particules et ondes

Manuel de laboratoire

Campus Saint-Jean

Automne - 2018



PHYSQ 124

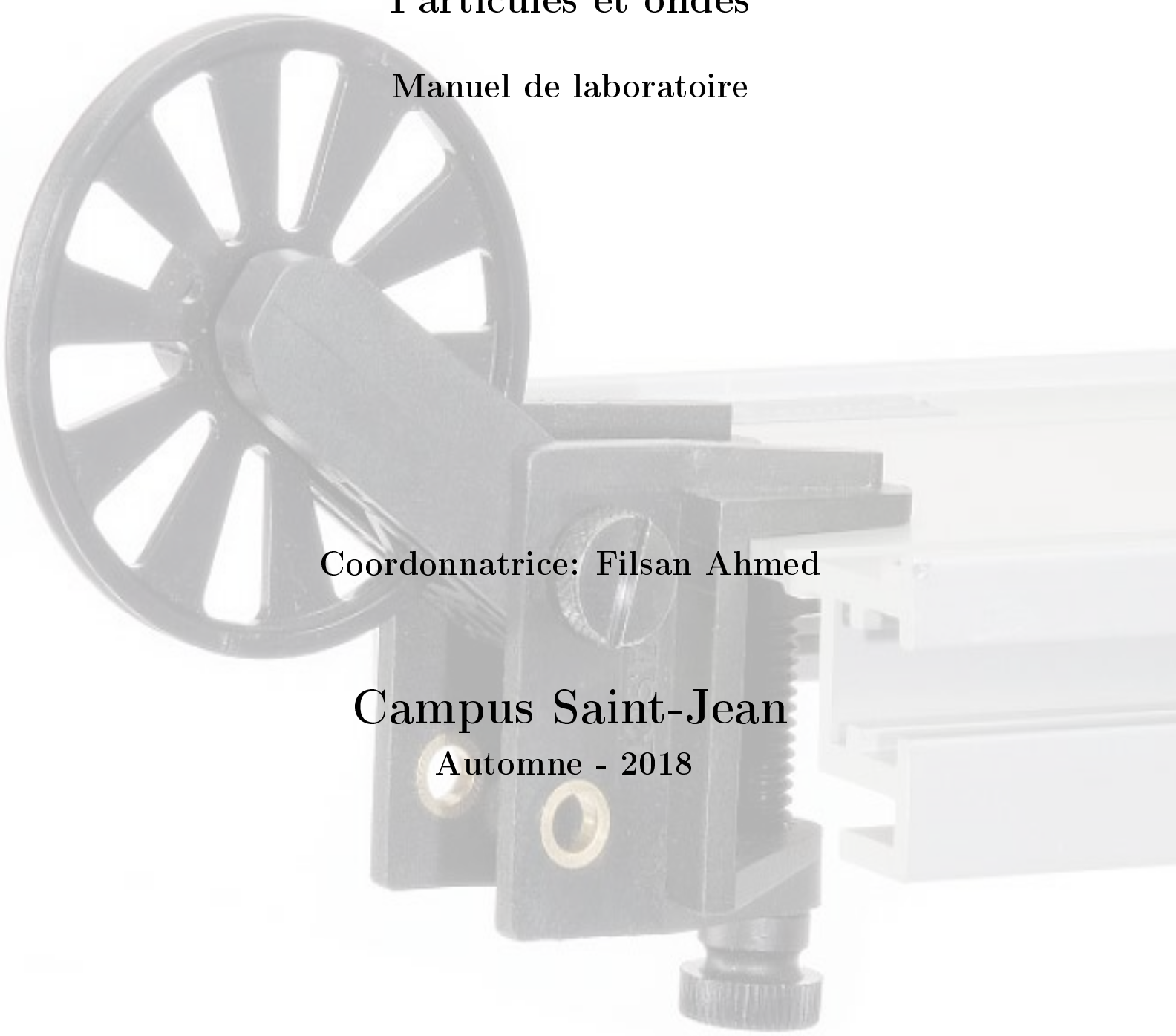
Particules et ondes

Manuel de laboratoire

Coordonnatrice: Filsan Ahmed

Campus Saint-Jean

Automne - 2018



Horaire des laboratoires

Semestre d'automne 2018

Semaine du	Mardi	Jeudi
3 - 7 Septembre	Pas de laboratoire	Pas de laboratoire
10 - 14 Septembre	Pas de laboratoire	Introduction
17 - 21 Septembre	Introduction	Accélération due à la gravité
24 - 28 Septembre	Accélération due à la gravité	Machine d'Atwood
1 - 5 Octobre	Machine d'Atwood	Coefficients de friction
8 - 12 Octobre	Coefficients de friction	Pas de laboratoire
15 - 19 Octobre	Pas de laboratoire	Conservation de l'énergie mécanique
22 - 26 Octobre	Conservation de l'énergie mécanique	Collisions
29 Oct - 2 Novembre	Collisions	Loi de Hooke
5 - 9 Novembre	Loi de Hooke	Pas de laboratoire
12 - 16 Novembre	Semaine de lecture	Semaine de lecture
19 - 23 Novembre	Pas de laboratoire	Ondes stationnaires
26 - 30 Novembre	Ondes stationnaires	Interférence de la lumière
3 - 7 Décembre	Interférence de la lumière	Pas de laboratoire

**FACULTÉ SAINT-JEAN
UNIVERSITY OF ALBERTA
PHYSIQUE 124**

MANUEL DE LABORATOIRE 2018-2019

Table des matières

Introduction

Exemple de rapport scientifique

Expériences

1. Introduction aux calculs d'erreurs et graphiques [rapport court]
2. Accélération due à la gravité [rapport complet]
3. Machine d'Atwood [rapport court]
4. Coefficients de friction [rapport complet]
5. Conservation de l'énergie mécanique totale [rapport complet]
6. Collisions [rapport court]
7. Loi de Hooke [rapport court]
8. Ondes stationnaires [rapport complet]
9. Interférence de la lumière [rapport court]

Annexes

INTRODUCTION

Chers étudiants,

Bienvenue au laboratoire de PHYSQ 124! 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 impaire. 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 de 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 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'*hypothèses*, formulation d'une *théorie*, mesures et *observations*, interprétation des résultats et *vérification des hypothèses*, *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 long 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 long 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

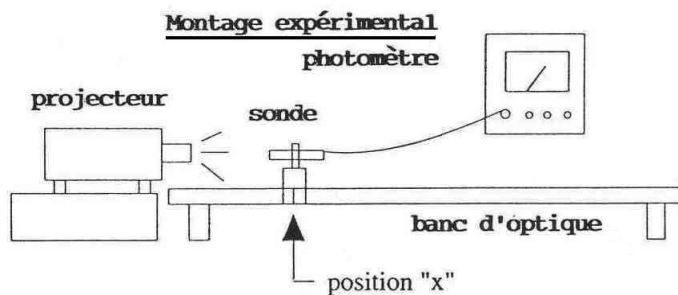
L'équation décrivant l'intensité de la lumière I sortant d'une source ponctuelle est

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

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

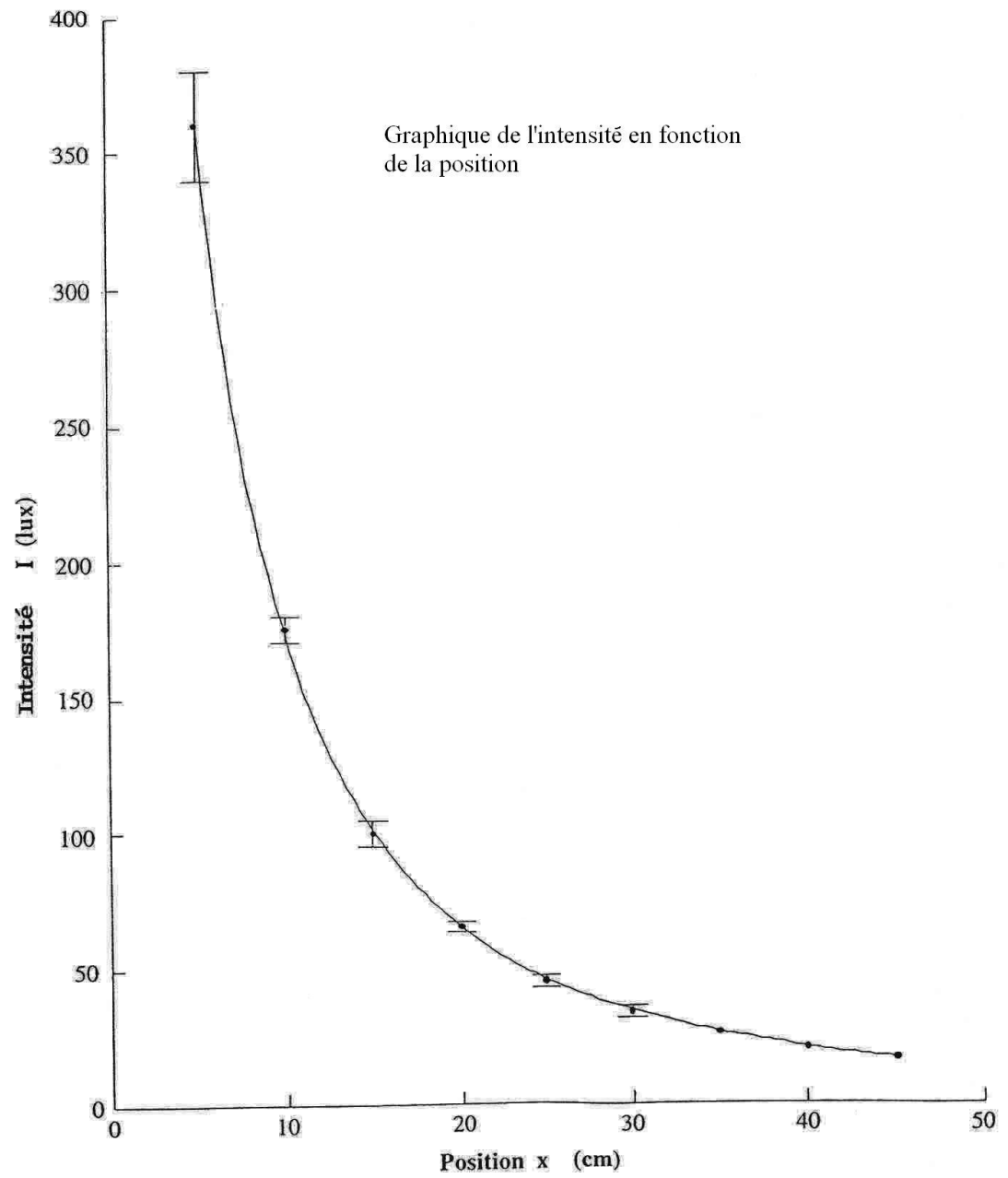
Tableau I: Intensité lumineuse I en fonction de la position x de la sonde photométrique.

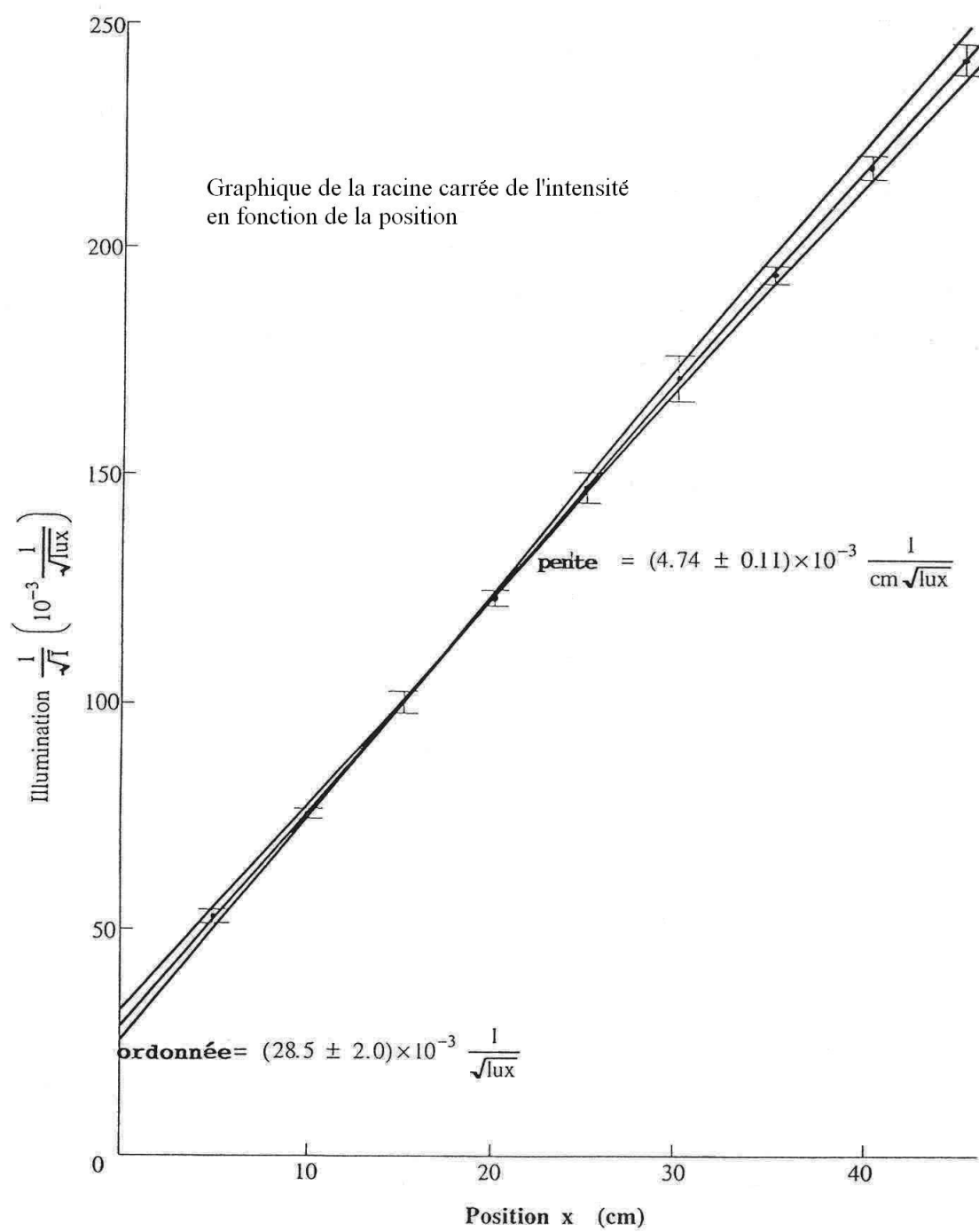
Position $x \pm 0.03$ (cm)	Intensité I (lux)	$1/\sqrt{I}$ $(\frac{10^{-3}}{\sqrt{\text{lux}}})$
5.00	360 ± 20	52.7 ± 1.5
10.00	175 ± 5	75.6 ± 1.1
15.00	100 ± 5	100.0 ± 2.5
20.00	66 ± 2	123.1 ± 1.9
25.00	46 ± 2	147.4 ± 3.2
30.00	34 ± 2	171.5 ± 5.0
35.00	26.5 ± 0.5	194.3 ± 1.8
40.00	21.0 ± 0.5	218.2 ±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

INTRODUCTION AUX RAPPORTS, CALCUL D'ERREURS, GRAPHIQUES ET LINÉARISATION (SÉMINAIRE)

Le but de ce laboratoire d'introduction est de vous apprendre quelques notions de base sur l'utilisation d'une feuille de calcul EXCEL 2010 pour effectuer une analyse simple des données dans les laboratoires, d'acquérir quelques concepts d'erreurs et les techniques pour la rédaction des rapports de laboratoire. Plus de détails sont donnés dans la section chapitre *Annexe* à la fin du manuel.

1 Concept d'erreur

1. On affirme qu'un objet a une longueur de 12 ± 2 cm. Ceci signifie que les longueurs limites inférieure et supérieure valent combien, respectivement?
2. Si vous mesurez la longueur de plusieurs objets avec une règle rétrécie, c.-à-d. la distance entre chaque barre de millimètre vaut en réalité moins qu'un millimètre, l'erreur est-elle aléatoire ou systématique?
3. Si on sait que l'erreur absolue sur un intervalle de temps inconnu vaut 0.4 s, cette information vous permet-elle de calculer l'erreur relative sur cet intervalle de temps? L'erreur relative sera-t-elle plus grande si l'intervalle de temps vaut 0.2 s ou 0.8 s?
4. Un rectangle a un côté de 9.0 ± 0.4 cm et un côté de 4.5 ± 0.5 cm. Calculez l'aire maximale possible en utilisant les valeurs maximales des longueurs. Calculez aussi l'aire minimale possible de façon analogue.

2 Calculs d'erreur

(Les questions ci-dessous sont comme l'exemple suivant: si $x = 2.3 \pm 0.2$ et $y = 0.7 \pm 0.1$, calculez x/y avec l'erreur absolue. Réponse: 3.3 ± 0.8 .)

1. Si $x = 3.40 \pm 0.08$ et $y = 4.29 \pm 0.10$, calculez $x + y$ et l'erreur absolue.
2. Si $x = -8.9 \pm 0.4$ et $y = -9.3 \pm 0.3$, calculez $y - x$ et l'erreur absolue.
3. On mesure une vitesse $v = 45 \pm 1$ m/s pour un objet de masse $m = 250 \pm 5$ g. Quelle est son énergie cinétique, $\frac{1}{2}mv^2$, et l'erreur absolue sur cette énergie?
4. Un objet qui tombe d'une hauteur h du repos atteindra le sol à $h = 0$ avec une vitesse $v = \sqrt{2gh}$, où $g = 9.81 \pm 0.04$ m/s². Si on mesure $h = 9.2 \pm 0.4$ m, que vaut v , avec l'erreur absolue?

3 Graphiques avec Excel

En utilisant *Excel* (ou *Calc*), tracer des graphiques de fonctions cosinus $[x]$, de sinus $[x]$ et de tangente $[x]$ sur une plage de $x = 0$ à 3π radians. Les trois fonctions doivent être tracées sur le même graphique. Il faudrait que les graphiques soient lisibles et représentés proprement, nommez les axes et utilisez une légende ¹.

Voici quelques conseils et astuces, et surtout n'hésitez pas à demander de l'aide à votre instructeur:

a. Dans la première colonne, vous pouvez entrer les valeurs x de 0 à 3π , avec un pas de 0.1. Vous pouvez le faire un par un (non recommandé) ou vous pouvez entrer les trois premiers chiffres comme 0, 0.1 et 0.2 dans les cellules successives, les mettre en surbrillance, sélectionner la petite case en bas à droite (dans *Excel*) et faire glisser la mise en forme vers le bas. *Excel* supposera que vous voulez ajouter 0.1 à chaque cellule successive.

b. Vous pouvez également utiliser une formule pour créer votre colonne x . Les formules dans *Excel* commencent par un signe $=$. Par exemple, si la cellule A2 a "0" dans sa case, dans la cellule A3 vous pouvez taper $= A2 + 0.1$. Taper "entrer". Puis, sélectionnez la cellule A3 et faites glisser la mise en forme vers les cellules suivantes.

c. Dans la deuxième colonne, vous mettrez les valeurs de l'une des fonctions, par exemple $\cos[x]$. Tapez $= \cos (A2)$. Appuyez sur Entrée et vous obtiendrez la valeur $\cos (0)$. Continuer ainsi.

d. Un signe \$ oblige le chiffre ou la lettre subséquente à rester le même. Par exemple, si à l'étape (b) vous aviez tapé $= \$A\$2 + 0.1$, alors chaque cellule dans laquelle vous faites glisser cette équation obtiendra la valeur de $A2 + 0.1$.

e. Les feuilles de calcul supposent que les angles sont en radians. Mais gardez à l'esprit que parfois vous devrez convertir des degrés en radians et revenir à radians ($360^\circ = 2\pi$ radians).

f. Pour tracer un graphique, sélectionnez les données que vous voulez tracer, allez dans l'onglet "Insert" et choisissez le type de graphique que vous voulez. Vous prendrez un nuage de points ("scatter").

g. Une fois que vous avez votre graphique, vous pouvez le formater comme vous le souhaitez. Pratiquement toutes les manipulations graphiques peuvent être effectuées en double-cliquant ou en cliquant avec le bouton droit de la souris sur la partie du graphique que vous voulez modifier, ou en sélectionnant l'onglet Outils de graphique en haut ("design, layout, and format").

¹Adapté de: Experiment 1 -Graphing and Analysis Using Spreadsheets, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

4 Linéarisation graphique

On laisse tomber un objet à partir d'une hauteur indéterminée et on note la hauteur h en fonction du temps t . On obtient le tableau ci-dessous:

temps (s)	hauteur (m)
0.05	1.98
0.10	1.95
0.15	1.89
0.25	1.70
0.30	1.56
0.40	1.22
0.45	1.02
0.50	0.79
0.55	0.53
0.60	0.25

Comme nous le rappellerons dans le cours, la hauteur h est décrite en fonction du temps t par l'équation:

$$h = h_{\max} - \frac{1}{2}gt^2.$$

Les étapes ci-dessous ont pour but de déterminer $h_{\max}$ et la valeur expérimentale de g :

- Dans un tableau *Excel*, reportez le tableau ci-dessus.
- Ajoutez dans votre tableau *Excel* une nouvelle colonne qui montre les valeurs de t^2 . Plutôt que de calculer chaque valeur avec une calculatrice, utilisez *Excel*.
- Tracez un graphique de h en fonction de t^2 , avec titre, identification des axes et leurs unités. Autrement dit, vous prenez $X = t^2$ et $Y = h$.
- À l'aide de *Excel*, trouvez l'équation de votre droite en utilisant la droite la mieux ajustée (en anglais, *best fit*).

La raison pour laquelle nous linéarisons parfois des graphiques de ce type est que les graphiques linéaires sont souvent plus faciles à visualiser et à comprendre que les graphiques non linéaires.

Rappelez-vous qu'une équation linéaire a la forme $y = mx + b$, où m est la pente et b est l'ordonnée à l'origine.

- Exprimez $h_{\max}$ et g en termes de la pente et de l'ordonnée à l'origine de votre graphique.
- L'équation trouvée à l'étape d vous donne la pente et de l'ordonnée à l'origine de votre graphique. En déduire $h_{\max}$ et la valeur expérimentale de g .

g. Enfin, nous utiliserons la fonction LINEST pour obtenir les erreurs sur la pente et sur l'interception pour l'ensemble de données linéaires.

Utilisation LINEST ou DROITEREG

Pour utiliser cette fonction, appuyez sur le petit bouton f_x dans la barre de formule. Sélectionnez “Statiscal” dans “category” et accédez à la fonction Linest. Entrez vos données x et y , et dans les cases Constant et Stats, entrez **1** (logical TRUE). Cela vous donnera juste la pente dans la cellule que vous avez choisi pour LINEST.

Pour obtenir le reste des statistiques, sélectionnez un tableau de cellules 5 (lignes) x 2 (colonnes) , le premier étant celui dans lequel vous avez entré la formule LINEST (contenant maintenant la pente) et appuyez sur F2, puis appuyez sur Ctrl + SHIFT + ENTRÉE. Sur un Mac, appuyez sur CONTROL + U, puis appuyez sur COMMAND + RETURN à la place.

pente	interception
erreur pour la pente	erreur pour l'interception
coefficient de détermination R^2	erreur régression
F-test	dégré de liberté
somme carrés	résidus de la somme des carrés

Tableau 2 : Signification des nombres de la fonction Linest (DROITEREG).

Cependant, nous utiliserons uniquement les données de la pente, l'interception et leurs erreurs dans notre cas. La taille des erreurs vous indiquera le nombre de chiffres significatifs à utiliser lorsque vous reporterez la pente et l'ordonnée à l'origine.

Avant de quitter cette session

- Montrez vos deux graphiques.
- Pour le deuxième graphique, donnez la pente, l'interception et leurs erreurs.
- N'oubliez pas de mentionner à votre instructeur les difficultés que vous avez rencontré.

ACCÉLÉRATION DUE À LA GRAVITÉ

1 Introduction

Les objectifs de cette expérience¹ sont d'effectuer l'analyse graphique du mouvement d'un objet en chute libre et de vous familiariser avec la technique de *linéarisation graphique* à l'aide du logiciel *Microsoft Excel*. Au plan physique, vous vérifierez ainsi la valeur de la constante de gravitation g . Un graphique linéaire est utile puisque les droites sont plus faciles à étudier; elles sont décrites complètement par la pente et l'ordonnée à l'origine.

Essayez de répondre aux questions de la section 3 avant la séance de laboratoire et vous insèrerez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.

2 Théorie - Corps en chute libre

Considérons un corps en chute libre, c.-à-d. la résistance de l'air est négligeable. Et comme la distance de la chute est petite comparée au rayon de la Terre, on peut supposer que l'accélération de l'objet soit constante. Dans le cas d'une accélération constante, a , l'équation suivante décrit le mouvement:

$$d = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

Où: t = temps écoulé depuis l'origine,

d = distance totale parcourue durant le temps t à partir de l'origine,

v_0 = vitesse initiale à l'origine au temps $t = 0$.

Nous utiliserons l'équation (1) avec l'accélération $a = g = 9.81 \text{ m/s}^2$ d'où:

$$d = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

Linéarisation graphique. Cette méthode consiste à redéfinir, si possible, les variables d'une équation non-linéaire de façon à ce que la nouvelle équation et son graphique décrivent une droite: $y = mx + b$.

Exemple (1): La relation $z = 3t^2$ est non-linéaire; il s'agit en fait d'une parabole. Si nous définissons $y \equiv z$ et $x \equiv t^2$, alors nous obtenons l'équation $y = 3x$, qui est une droite de pente égale à 3 et dont l'ordonnée à l'origine vaut zéro. Donc, le graphique de z en fonction de t^2 donnera une droite.

¹Modification et traduction de: Experiment 2 - Acceleration due to gravity, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

Exemple (2): La linéarisation n'est pas toujours aussi triviale. Si nous divisons chaque terme de l'équation (2) par t , nous obtenons

$$\frac{d}{t} = v_0 + \frac{1}{2}gt$$

Ainsi, en définissant $y \equiv \frac{d}{t}$ et $x \equiv t$, cette équation devient

$$y = \frac{1}{2}gx + v_0$$

qui montre que le graphique de d/t en fonction de t sera une droite de pente $\frac{1}{2}g$ et d'ordonnée à l'origine v_0 . Remarquez que toute équation ne peut pas être linéarisée ainsi.

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. On sait que, proche de la surface terrestre, l'accélération gravitationnelle pointe vers le bas. Si, dans l'équation (2), les valeurs de d , v_0 et a sont *positives*, est-ce que l'axe de la coordonnée pointe vers le haut ou vers le bas?
2. Selon la relation entre les variables d et t , il y a différentes façons de tracer le graphique de l'équation (2), $d = v_0t + \frac{1}{2}gt^2$.

Par contre, tous les graphiques ne seront pas forcément linéaires. On vous donne les trois différentes dispositions graphiques de la forme de y en fonction de x :

$$(i) \frac{d}{t^2} \text{ en fonction de } \frac{1}{t}; \quad (ii) \frac{t}{d} \text{ en fonction de } \frac{t^2}{d}; \quad (iii) \frac{1}{t} \text{ en fonction de } \frac{1}{d}.$$

Quels graphiques seront linéaires? Si le graphique est linéaire, quelles quantités correspondent à la pente et à l'ordonnée à l'origine, respectivement? Démontrez clairement comment vous avez obtenu vos réponses en réécrivant l'équation (2).

4 Matériels

- Étincelleur,
- ruban de papier ciré,
- masse attachée au ruban,
- règle.

5 Procédures

1. Manipulations

- a. Le montage expérimental consiste en un objet qui tombe tout en étant attaché à un étincelleur; ce dernier brûle des points sur un papier ciré à des intervalles de temps régulier. Vos données seront donc cet enregistrement d'une série de points brûlés sur une bande de papier ciré. La fréquence de l'étincelleur est de 60 Hertz (c.-à-d. 60 points par sec).
- b. Une fois la manipulation effectuée et que les points sont brûlés sur le ruban, étalez le ruban sur votre table de travail et encerclez les points brûlés pour une identification plus facile. Vous devriez voir un patron régulier sans trop de points qui manquent. Assurez-vous qu'il n'y a pas des points qui manquent sur votre ruban, si c'est le cas recommencez la manipulation.
- c. Choisissez un point près du début de l'enregistrement pour l'origine ($d = 0$, $t = 0$) et identifiez-le par "0". N'utilisez pas le premier point brûlé comme étant l'origine parce que le début de la chute de l'objet n'est pas synchronisé avec la première étincelle. Notez que $v_0 \neq 0$ à l'origine "0". Comme illustré à la figure 1, numérotez successivement les 12 autres points brûlés.

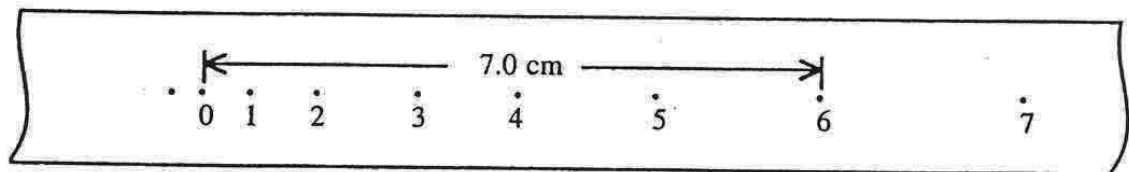


Figure 1: Enregistrement des points brûlés sur le ruban de papier

- Mesurez la distance d entre l'origine choisie "0" et chacun des points numérotés. Par exemple, à la figure 1, la distance au point 6 est $d_6 = 7.0$ cm. Si la fréquence de l'étincelleur est à 60 Hz, alors le temps écoulé est $t_6 = 6 \times \frac{1}{60}$ seconde. Notez les mesures de distance d et de leur temps respectif t comme dans les colonnes 2 et 3 du tableau ci-dessous. Les autres colonnes seront complétées automatiquement par *Excel*.

Tableau: Cinématique d'un objet en chute libre

n	temps t	distance d	$1/t$	d/t^2	t^2/d	t/d
0						
1						
...						

2. Calculs d'erreurs

Erreur pour d

Avec l'erreur de base de $\pm 1/2$ mm pour la mesure effectuée à l'aide d'un mètre, il y a une erreur supplémentaire due au fait que l'étincelle ne passe pas toujours directement de l'aiguille à la bande. l'étincelle "hasardeuse" est à une erreur d'environ $\pm 1/2$ mm. Cela nous donne une erreur combinée de ± 1 mm pour la mesure de la bande d'étincelle.

6 Analyse des données

L'analyse des données expérimentales vous permettra de vérifier l'équation (2) et de mesurer la valeur expérimentale de g avec deux différentes approches:

1. Utilisation directe (colonnes 2 et 3 du tableau ci-dessus) de l'équation (2) pour laquelle *Excel* vous donne une parabole et les paramètres v_0 et g ,
2. Linéarisation (i) de la Question 2, ci-dessus, où on trace $\frac{d}{t^2}$ en fonction de $\frac{1}{t}$ (colonnes 4 et 5 du tableau), pour laquelle la pente et l'ordonnée à l'origine vous donnent v_0 et g ,

Approche 1 - Méthode directe

1. Les variables de l'équation (2) sont d et t . Si un graphique est tracé à partir des valeurs observées de ces variables, on obtiendra une parabole. Créez un graphique de la distance d en fonction du temps t ; autrement dit, tracez le graphique des colonnes 2 et 3 du tableau.
2. Utilisez *Excel* pour tracer la meilleure courbe de la forme $y = Ax^2 + Bx + C$. Indiquez l'équation sur le graphique, pour cela cliquez sur vos points et utilisez la fonction “ add trendline” choisir un polynôme d'ordre 2 et cochez “ Display equation on chart ” afin d'inclure cette équation dans la courbe. Incluez votre graphique dans votre rapport.
3. À partir des coefficients A , B et C de l'équation obtenue par *Excel*, déterminez les valeurs de g et v_0 .

Approche 2 - Linéarisation

1. Transformez l'équation (2) sous la forme linéaire (i) en la divisant par t^2 (c'est à dire $\frac{d}{t^2}$ en fonction de $\frac{1}{t}$). Identifiez les variables x et y .
2. Identifiez les quantités qui correspondent à la pente m et celles à l'ordonnée à l'origine b .
3. Créez un graphique linéaire sous *Excel* pour tracer en fonction des variables obtenues en '1'. Utilisez la meilleure approximation de la courbe afin d'obtenir une droite de la forme $y = mx + b$. Déterminez les valeurs expérimentales de m et b . Incluez votre graphique dans votre rapport.
4. Utilisez vos résultats pour déterminer les valeurs expérimentale de v_0 et g .
5. Comparez votre valeur expérimentale de g à la valeur acceptée: $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.
6. Est-ce que votre valeur expérimentale de v_0 semble raisonnable? Donnez le pourcentage d'écart entre les deux valeurs.

7 Conclusion

Dans la conclusion, résumez brièvement vos observations. Expliquez ce que vous avez trouvé à partir de vos graphiques et résultats, incluez votre graphique dans votre rapport. . Sont-ils cohérents avec la théorie? Suggérez des raisons possibles pour expliquer les écarts.

MACHINE D'ATWOOD

1 Introduction

Le physicien anglais George Atwood (1745-1807) publia en 1784 un ouvrage sur la mécanique de Newton, intitulé *A Treatise on the Rectilinear Motion and Rotation of Bodies: With a Description of Original Experiments Relative to the Subject*. Il y présenta quelques expériences pour illustrer les lois du mouvement uniformément accéléré. Vous effectuerez ici l'une d'elles: l'expérience de la *machine d'Atwood*¹.

Cette expérience est décrite, sous différentes versions, dans la plupart des livres de mécanique classique.

Le montage est illustré à la Figure 1. Le but de cette expérience est d'appliquer les lois de Newton pour comparer l'accélération expérimentale à l'accélération théorique, obtenue à la section suivante.

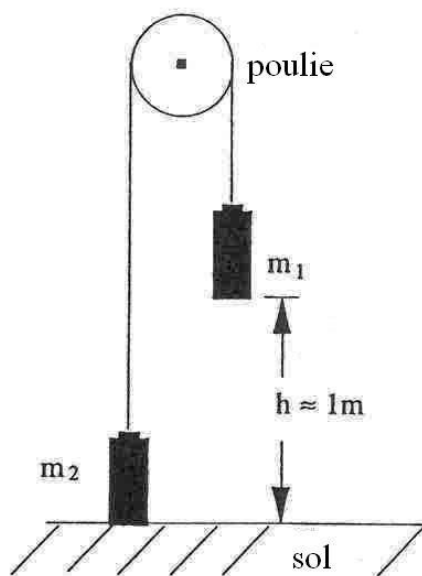


Figure 1: Machine d'Atwood

¹Adapté de: Experiment 4 - Atwood's Pulley, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

2 Théorie

Cette expérience illustre la deuxième et troisième lois de Newton, où la force extérieure est la force de gravitation, $F_{\text{grav}} = mg$. On peut montrer que l'accélération du système de la Figure 1, en fonction des masses m_1 et m_2 , est décrite par la relation:

$$a = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} g. \quad (1)$$

D'après les équations de la cinématique, la distance de chute s d'une masse à partir du repos est donnée par la relation

$$s = \frac{1}{2} at^2. \quad (2)$$

Dans cette expérience, vous ferez varier les masses de sorte que $m_1 + m_2$, i.e. la masse totale, restera constante. Seule $m_1 - m_2$ sera modifiée. Pour ce faire, la masse sera transférée d'un côté à l'autre de façon à garder la masse totale fixe. Ainsi, le temps de chute d'une distance s fixe changera. On ne demande pas d'effectuer de calculs d'erreur ni d'écrire un rapport long; vous remettrez tout simplement vos résultats tel que demandé lors du séminaire.

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. Accélération avec la machine d'Atwood

Démontrez la relation de l'équation (1) pour le système de deux masses illustré à la Figure 1.

Pour ce faire, négligez la masse de la corde (de sorte que $T_1 = T_2 = T$), la friction, et la masse de la poulie. Les deux masses ont la même accélération, a , mais dans des directions différentes. Écrivez la deuxième loi de Newton pour chacune des masses, puis éliminez la tension, T , de vos équations pour obtenir l'équation (1).

2. Tension dans la machine d'Atwood

(a) En utilisant votre démonstration de la précédente question, quelle est l'expression pour la tension dans la corde, T ? Simplifiez votre équation pour obtenir une fraction simple.

(b) Que devient votre expression pour T si vous échangez les valeurs de m_1 et m_2 ?

(c) Que vaut T si $m_1 = 517$ grammes, $m_2 = 500$ grammes, et $g = 9.81 \text{ m/s}^2$?

3. Temps de chute de la machine d'Atwood

La distance de chute s d'une masse à partir du repos est donnée par la relation de l'équation (2).

Utilisez cette équation et l'équation (1) pour exprimer la distance de chute s en termes des masses m_1 et m_2 , du temps de chute t et de la constante g .

4 Matériels

- Deux masses de $500g$ chacune,
- $17g$ de masses fendues
- poulie,
- support,
- clampe,
- chronomètre,
- règle.

5 Procédures

Vous avez deux supports de 500 grammes et de petites masses fendues. Parmi les masses fendues, vous en avez deux de 5.0 grammes, deux de 2.0 grammes, et trois de 1.0 gramme, pour un total de 17.0 grammes.

1. Placez toutes les masses fendues (donc, 17.0 grammes) sur un des supports, que nous appellerons m_1 (masse la plus lourde). Aucune masse fendue est placée sur le deuxième support, appelé m_2 .
2. À l'aide de la balance, pesez la masse m_1 (la plus lourde, avec les masses fendues) et la masse m_2 (la plus légère, sans masse fendue). Ne tenez pas compte de l'erreur sur les masses.
3. Préparez le système tel qu'illustré à la Figure 1. Le dessous de la masse m_1 devrait être à environ 1.0 mètre du sol. Mesurez cette valeur, qui sera s dans l'équations (2). Ne tenez pas compte de l'erreur sur cette distance.
4. Une fois les masses m_1 et m_2 initialement au repos, ou presque, laissez tomber la masse m_1 et mesurez le temps de chute t_a jusqu'au plancher. Répétez une seconde fois pour mesurer un temps t_b . Calculez le temps de chute moyen $t_{\text{moyen}} = \frac{1}{2}(t_a + t_b)$. Reportez vos données dans le tableau ci-dessous.
5. Transférez un gramme à la fois de m_1 à m_2 , de sorte que vous avez maintenant $m_1 - m_2 = 15.0$ grammes. Mesurez de nouveau la distance de chute s , car sa valeur pourrait avoir changé un peu.
6. Continuez à décroître la valeur de m_1 en transférant 1 gramme à m_2 , pour que $m_1 - m_2$ diminue de 2.0 grammes à la fois, et répétez les étapes 2 à 5. Vous aurez ainsi $m_1 - m_2 = 13.0$ grammes, 11.0 grammes, etc. Vous arrêterez lorsque m_1 ne tombera plus d'elle-même, et ce même si $m_1 - m_2 \neq 0$. Notez bien la valeur minimum de $m_1 - m_2$.
7. Déterminez l'accélération a en utilisant les valeurs mesurées de h et t_{moyen} .
8. Une fois toutes ces manipulations effectuées, complétez le tableau ci-dessous sur *Excel*. Vous convertirez ensuite vos résultats en unités SI (m, kg). Passez à la section *Analyse*.

masse		distance	temps		
m_1 (kg)	m_2 (kg)	s (m)	t_a (s)	t_b (s)	t_{moyen} (s)

Tableau des données expérimentales.

6 Analyse

Il vous faut tracer un graphique qui permette de comparer le mouvement de la machine d'Atwood à la prédiction de l'équation (1), donnée par la deuxième loi de Newton. Plus spécifiquement, vous variez l'écart de masses $m_1 - m_2$ et mesurez le temps t requis pour franchir une distance fixe s . La pente d'une droite appropriée (à vous de déterminer laquelle) vous donnera ainsi une valeur expérimentale de la constante gravitationnelle g_{exp} que vous pourrez comparer à la valeur théorique g_{th} . (Utilisez $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.)

1. D'après le paragraphe précédent, quelles quantités correspondent aux variables x et y ? Quelles sont les quantités qui représentent la pente et l'ordonnée à l'origine?
2. Tracez le graphique suggéré ci-dessus. Utilisez une régression linéaire avec *Excel*. Votre graphique doit montrer l'équation de votre droite, de façon à en déduire la pente et l'ordonnée à l'origine.
3. En utilisant votre pente expérimentale m , calculez g_{exp} . Est-ce en accord avec la valeur théorique, g_{th} ?
4. Quelle est l'ordonnée à l'origine, à l'erreur près? Est-ce la valeur expérimentale de l'ordonnée à l'origine est égale à la valeur théorique?
5. Quelle est votre plus petite valeur de $m_1 - m_2$ telle que les masses accélèrent (obtenue à l'étape 7 des manipulations)? Comment interprétez-vous ce résultat?
6. Comment les accélérations que vous avez mesurées dans ce laboratoire changeraient-elles si vous déplaciez encore les mêmes petites masses m_1 à m_2 pour chaque essai, mais que la masse totale du système était beaucoup plus grande (Les accélérations mesurées seraient toutes plus grandes, plus petites ou inchangées)? Justifiez!

7 Résultats et discussion

Incluez les réponses aux questions de la section 3 dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.

Résumez vos résultats!

COEFFICIENTS DE FRICTION

1 Introduction

Cette expérience consiste à mesurer les coefficients de friction statique μ_s et cinétique μ_k entre deux surfaces. On ne demande pas de calcul d'erreur. Vous utiliserez deux méthodes dont vous pourrez comparer les résultats. L'expérience est divisée en trois parties: But général

- la première partie consiste à mesurer les coefficients μ_s et μ_k d'un bloc sur une voïee inclinée, partie I
- la deuxième partie vise à vérifier la valeur de μ_s avec une masse suspendue à un bloc sur une surface horizontale, et partie II
- la troisième partie est la reprise de la partie 1 pour déterminer le μ_s entre un objet de votre choix et une voïe inclinée. partie III

2 Théorie

Lorsque deux surfaces se touchent, les forces qui entrent en jeu sont la *force normale* et la *friction*. La force normale $\mathbf{N}$ est perpendiculaire aux deux surfaces. La friction est parallèle aux deux surfaces. La force normale est obtenue de la deuxième loi de Newton (et non d'une formule comme $F = mg$ ou $F = -kx$). On distingue deux types de friction: *statique* et *cinétique*.

- *Friction statique* $\mathbf{f}_s$: les deux surfaces sont au repos l'une par rapport à l'autre, c.à-d. elles ne glissent pas l'une sur l'autre. Tout comme la force normale, la force de friction statique $\mathbf{f}_s$ est obtenue de la deuxième loi de Newton, et non d'une formule spécifique pour f_s . Pour des surfaces données, la grandeur maximale $f_{s,\max}$ de $\mathbf{f}_s$ est reliée à la force normale $\mathbf{N}$ par la relation

$$f_s \leq f_{s,\max} = \mu_s N,$$

où μ_s est le *coefficient de friction statique*.

- *Friction cinétique* $\mathbf{f}_k$: les deux surfaces glissent l'une sur l'autre. Contrairement à N et f_s , une formule spécifique donne la grandeur de $\mathbf{f}_k$:

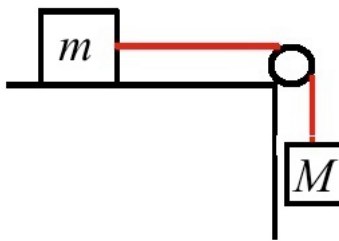
$$f_k = \mu_k N,$$

où μ_k est le *coefficient de friction cinétique*. Généralement, nous avons $\mu_k < \mu_s$.

3 Questions préliminaires

(À compléter avant la séance de laboratoire. Insérez vos réponses dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.)

1. Pourquoi ne peut-on pas écrire les relations ci-dessus sous la forme vectorielle $\mathbf{f} = \mu \mathbf{N}$, plutôt que $f = \mu N$?
2. Un bloc de masse m repose *sans glisser* sur un plan incliné de θ degrés. Les coefficients de friction statique et cinétique entre ce bloc et le plan valent respectivement μ_s et μ_k . Quelle est la force de friction statique f_s en termes de m , g , θ et, possiblement, μ_s ou μ_k ?
3. Un bloc de masse m repose *sans glisser* sur un plan incliné de θ degrés. Le coefficient de friction statique entre le bloc et le plan vaut μ_s . Si on lève le plan lentement, à quel angle (en termes de m et μ_s) le bloc commencera-t-il à glisser? (Indice: à ce moment, nous avons alors $f_s = f_{s,\max} = \mu_s N$.)
4. Suite à la situation de la question précédente, le bloc se met à glisser, de sorte que le frottement est cinétique. En termes du coefficient μ_k , à quel angle le bloc glissera-t-il à vitesse constante? (Indice: utilisez le fait que f_k est alors égal à la composante du poids mg parallèle au plan incliné.) Sachant que $\mu_k < \mu_s$, que doit-on faire, une fois que le bloc a commencé à glisser, pour qu'il continue à vitesse constante?
5. La figure ci-dessous illustre un bloc de masse m au repos sur une surface horizontale de coefficient statique μ_s . Ce bloc est attaché à une corde qui passe par une poulie (de masse et friction négligeables) et est attaché à une masse suspendue. Si M est la grandeur de la masse suspendue requise pour que le bloc commence tout juste à glisser, quel est le coefficient de friction statique μ_s en termes de M et m ?



4 Matériels

- Voie à faible friction,
- chariot avec une masse de $250g$,
- bloc sous le chariot,
- indicateur d'angle,
- un support de masse et de masses supplémentaire,
- poulie,
- un fin de piste et des pieds
- pinces à serre.

5 Procédures

Partie I - Planche inclinée

- Nous étudierons le frottement entre une voie à faible friction et un ensemble bloc-chariot-masse (voir figure 1 ci-dessous, sur lequel des masses métalliques peuvent être ajoutées).

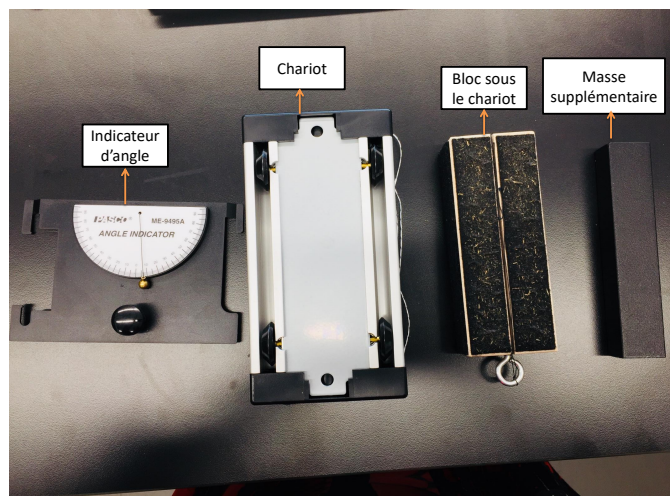


Figure 1: Matériels

Pour l'expérience, vous placerez le bloc sous le chariot comme illustré à la figure 2.



Figure 2: Planche inclinée

- Vous utiliserez le même ensemble chariot-bloc-masse dans les parties I et II. À vous de décider si vous voulez ajouter des masses ou non. Pesez le système choisi.
- L'ensemble sera placé sur une voie munie d'un rapporteur d'angle avec lequel l'inclinaison peut-être mesuré.
- Vous prendrez des mesures avec la partie feutrée sous le bloc et avec la partie bois sous le bloc.
- Placez le système sur une voie, initialement horizontale, dont une extrémité est bloquée par des pinces à serre.

Soulevez lentement une de ses extrémités, comme illustré aux à la figure 2 ci-dessus:

- *Friction statique.* Au moment exact où le bloc commence à glisser, cessez de soulever la voie (même si le bloc accélère ensuite vers le bas) et mesurez l'angle. Recommencez le processus deux fois et vous ferez vos calculs avec l'angle moyen.

Rappel: vous effectuerez ces opérations pour la partie feutrée et pour le bois.

- *Friction cinétique.* Suite à la question 4, l'angle requis pour que le bloc commence tout juste à glisser est un peu plus grand que l'angle auquel le bloc glissera à vitesse constante. Cela implique que lorsque le bloc commence à glisser, vous devez abaisser rapidement la voie pour que le bloc maintienne une vitesse constante. Répétez les étapes précédentes pour trouver l'angle correspondant à une vitesse à peu près constante. Encore ici, prenez trois mesures et vous ferez les calculs subséquents avec l'angle moyen.
- Jusqu'ici, vous avez donc *quatre* résultats: l'angle d'inclinaison moyen pour (1) la friction cinétique et le bois, (2) la friction cinétique et le feutre, (3) la friction statique et le bois, (4) la friction statique et le feutre.

Bois et feutre

Partie II - Planche horizontale

- Dans cette partie, on utilise le même ensemble chariot-bloc-masses et la même planche qu'en partie I.
- Ici, nous ne nous mesurerons que le coefficient de *friction statique*.
- Au lieu d'incliner la planche, une corde est attachée au bloc et on mesure la tension dans la corde en lui attachant des masses, comme à la question 5 de la section 3.
- Comme illustré sur la figure 3 ci-dessous, attachez une corde au bloc. L'ensemble chariot-bloc passe autour d'une poulie pour être reliée à un support pour masses.



Figure 2: Planche horizontale

Remarque: Le support, vide, a une masse de 50 g.

- Assurez-vous que la corde soit bien horizontale. Pour celà, vous pouvez ajuster le niveau de la poulie.
- Ajoutez graduellement des masses jusqu'à ce que la masse totale M soit assez grande pour que l'ensemble de masse m commence à peine à glisser. Déposez les masses doucement, sans les laisser tomber sur le support. Vous devriez placer les masses une à une sur le support. Lorsque le chariot commence à glisser, prenez des petites masses pour savoir la masse exacte nécessaire pour le déplacer. Faites attention de ne pas tirer la corde vers le bas, ni de pousser le chariot. Douceement!
- N'oubliez pas d'inclure la masse du support (50 g) dans la valeur de M , requise pour que le bloc commence tout juste à glisser.

Partie III - Planche inclinée avec un objet quelconque

- Dans cette partie, vous reprendrez les étapes de la partie I afin de mesurer l'angle minimal de mouvement pour un objet quelconque. μ_s
- Par exemple, vous pourriez utiliser des chaussures et comparez une espadrille avec une chaussure plus formelle. Laquelle devrait être plus glissante? Soyez créatifs!
- Nous sommes seulement intéressés à l'angle pour lequel l'objet commence à glisser. Obtenez trois mesures. Ne considérez pas l'angle pour lequel la vitesse est constante.

6 Analyse des résultats

Partie I

- À l'aide de la question 3, déduisez les coefficients de friction statique, μ_s , pour le côté bois et pour le feutré, avec la planche inclinée.
- En procédant de la même façon, trouvez la valeur moyenne du coefficient de friction cinétique μ_k , pour le bois et pour le feutré.
- Est-ce que vos observations indiquent que $\mu_k < \mu_s$?

Partie II

- Pour l'analyse de cette partie, utilisez votre solution pour la question 5.
- Connaissant la masse minimale requise pour faire glisser le bloc, déduisez la valeur du coefficient de frottement statique μ_s .
- Est-ce que vos valeurs de μ_s trouvées dans les parties I et II sont assez proches?
- Comparez les valeurs de μ_s pour le bois et le feutre.

Partie III

- Refaites les calculs de la partie I pour calculer le coefficient de friction statique μ_s entre l'objet utilisé et la planche.
- Comparez la valeur moyenne de μ_s trouvée en partie I avec celle de l'objet choisi. Pouvez-vous expliquer la différence? Est-ce que cela peut avoir une application pratique?

7 Résultats et discussion

Incluez les réponses aux questions de la section 3 dans la section *Analyse des résultats* de votre rapport.
Résumez vos résultats!

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE TOTALE

1 Introduction

Les lois de conservation sont importantes en physique. La plus célèbre est la conservation de l'énergie totale. Dans cette expérience, vous étudierez la conservation de l'énergie mécanique totale (c.-à-d. cinétique et potentielle) à l'aide d'un montage simple: un chariot sur une voie à faible friction auquel une masse est attachée. Ce montage implique le transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique.

Nous vous demanderons un calcul d'erreur; prenez donc bien note de toutes les incertitudes.

2 Théorie

Remarque: Dans ce protocole, ΔX est l'erreur sur X tandis que δX est une différence de X , par ex. longueur, intervalle de temps, etc.

D'après le schéma de la Figure 1, ci-dessous, vous pouvez vérifier que l'énergie mécanique totale du système *avant* la chute est

$$E_i = m_c g h_{ci} + m_m g h_{mi}, \quad (1)$$

étant donné que l'énergie cinétique est nulle, et si on prend $h = 0$ au sol. (Notation: m_c masse du chariot, m_m masse du bloc suspendu, $h_{ci} = h_{cf}$ hauteur du chariot, h_{mi} hauteur initiale de la masse.)

Après que le bloc soit descendu d'une certaine distance, l'énergie totale est:

$$E_f = \frac{1}{2} m_c v^2 + m_c g h_{cf} + \frac{1}{2} m_m v^2 + m_m g h_{mf}. \quad (2)$$

La vitesse finale v est la même pour la masse et le chariot car ils sont reliés par une corde. La hauteur du chariot h_c ne change pas si la voie est au niveau; donc, on a $h_{ci} = h_{cf}$, et l'énergie potentielle du chariot est constante.

De $E_i = E_f$, où on néglige la friction, on obtient:

$$m_m g h_{mi} = \frac{1}{2} m_c v^2 + \frac{1}{2} m_m v^2 + m_m g h_{mf}. \quad (3)$$

En isolant g , on trouve une valeur à vérifier expérimentalement,

$$g_{\text{exp}} = \frac{(m_c + m_m) v^2}{2 m_m (h_{mi} - h_{mf})}. \quad (4)$$

C'est la formule que vous utiliserez pour calculer la valeur expérimentale de la gravité, g_{exp} .



Figure 1. Schéma montrant les hauteurs à mesurer.

3 Questions

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

1. Tracez les droites prédites de l'énergie potentielle E_P , l'énergie cinétique E_K et l'énergie mécanique E sur un graphique de l'énergie en fonction de la hauteur de la masse h_m . Tracez ces trois droites sur le même graphique.
2. En utilisant les équations (1) et (2), effectuez les calculs qui permettent d'obtenir l'équation (4).
3. À partir de l'équation (4), déterminez l'équation permettant de calculer la valeur théorique de la vitesse $v_{\text{théo}}$.
4. Dérivez l'expression algébrique de l'erreur de l'énergie potentielle de la masse $\Delta E_{P,m}$, de l'erreur de l'énergie cinétique du système masse-chariot $\Delta E_{K,m+c}$ et de l'erreur de l'énergie mécanique totale ΔE (l'énergie mécanique totale du système *moins* l'énergie potentielle du chariot).

4 Matériels

- Voie à faible friction,
- chariot muni d'un drapeau (avec l'inscription *Fine Pattern Picket Fence*) et d'une ficelle,
- règle,
- masse,
- photomètre,
- un fin de piste, des pieds pour la mise à niveau
- tablette pour recueillir les données.

Le montage expérimental est illustré à la Figure 2.

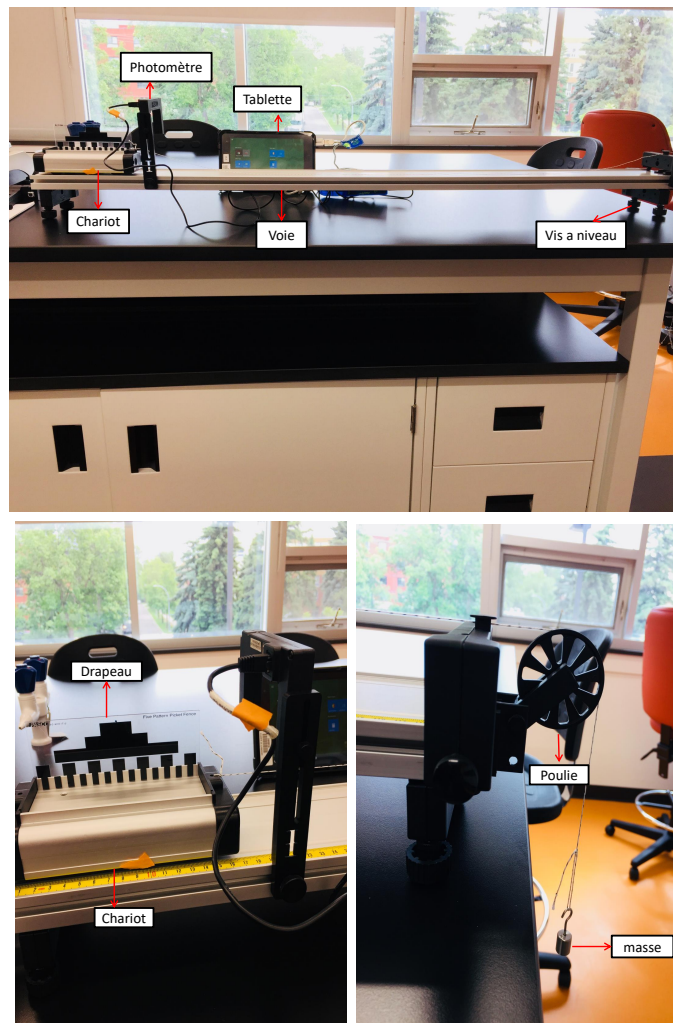


Figure 2. Montage expérimental

5 Procédures

Étape 1: Montage de la manipulation

1. Placez la voie au niveau en ajustant les vis de soutien situées sous la voie (voir Figure 1) de sorte que le chariot demeure pratiquement immobile lorsqu'on le lâche et qu'aucune masse ne lui est attachée. Pour que le chariot ait une énergie potentielle gravitationnelle constante et aucun frottement, vérifiez le niveau dans les deux sens montrés à la Figure 3.

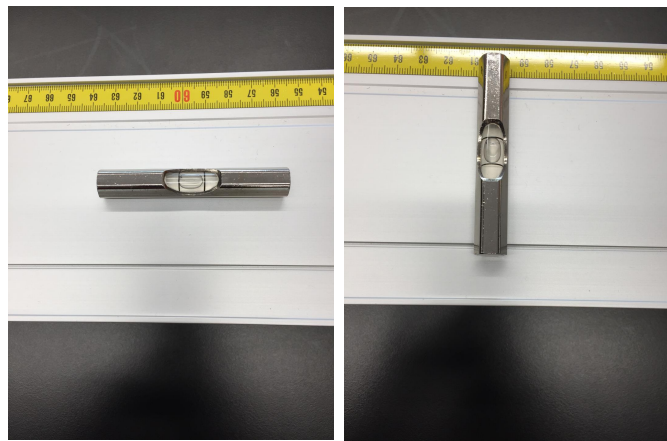


Figure 3. Nivelage de la voie.

2. Fixez le photomètre à la voie. Ajustez la hauteur du photomètre sur le support du photomètre de sorte que le drapeau placé sur le chariot puisse être détecté par le faisceau de photomètre lorsque le chariot roule vers lui.
3. Installez le chariot à l'extrémité gauche de la voie et attachez-y la ficelle reliée à l'autre bout à la petite masse fournie m_m (10 ou 20 grammes). Tel qu'illustré à la Figure 4, la première série de lectures est prise avec le *centre du chariot* aligné initialement avec la position 10 cm et le *photomètre* aligné avec la position 20 cm. Notez l'erreur sur ces positions.

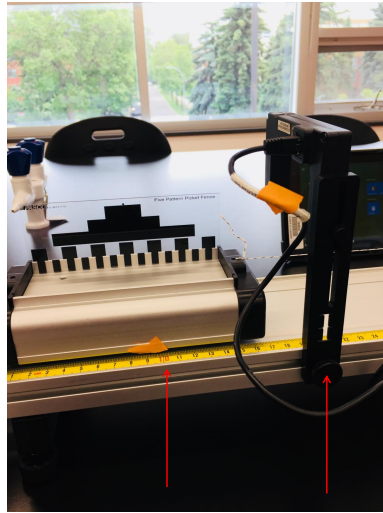


Figure 4. Chariot et photomètre à la position initiale.

4. Insérez le drapeau dans les fentes encastrées sur le dessus du chariot, dirigez la bande pleine vers le plus haut. Mesurez la longueur de cette bande, δd , du “drapeau” avec l’erreur, $\Delta(\delta d)$, montré à la Figure 4 ci-dessus. En fait, cette quantité vous permettra de déterminer la valeur de v_{exp} .
5. Fixez la piste de fin de course à la piste comme dans l’image ci-dessous. La piste de fin de course doit se trouver à l’extrémité droite.

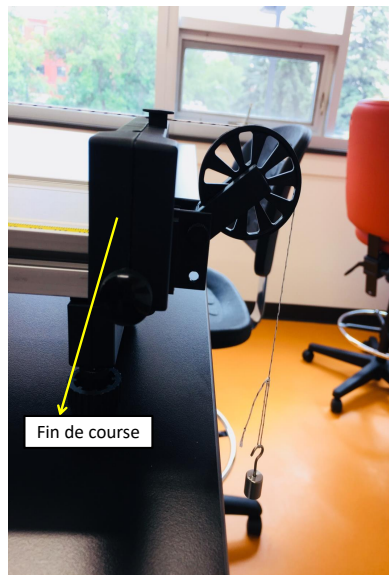


Figure 5. Piste de fin de course.

6. Vous êtes maintenant prêts à prendre vos mesures. Quand vous laisserez tomber la masse attachée à la ficelle, elle entraînera le chariot et la durée du passage du drapeau devant le photomètre sera enregistrée par la tablette. Essentiellement, vous mesurerez ainsi la vitesse du chariot à différentes positions (avec *trois* mesures pour chaque position!), et utiliserez ces données dans l'équation (4) pour trouver g_{exp} .

REMARQUE: Il peut être utile de placer un petit morceau de ruban adhésif ou de faire une petite marque sur la voie en notant la position du bord avant du chariot (le point de référence).

7. Comme le photomètre se trouve à 10 cm de la position initiale du chariot (Figure 4), la durée lue par le photomètre vous donnera donc la vitesse du système chariot-bloc après un déplacement de 10 cm.

Ci-dessous, on vous montre comment utiliser le programme de la tablette relié au photomètre afin de recueillir la durée du passage du chariot devant le photomètre.

1. Pour commencer, cliquez sur le symbole *SPARKVUE*.
2. Vous verrez ensuite la Figure 6 ci-dessous. Cliquez en premier sur *One Photogate or Device*, indiqué par la flèche oblique (figure à gauche), puis sur *Photogate Timing (One Photogate)*, indiqué par la flèche oblique (figure à droite).

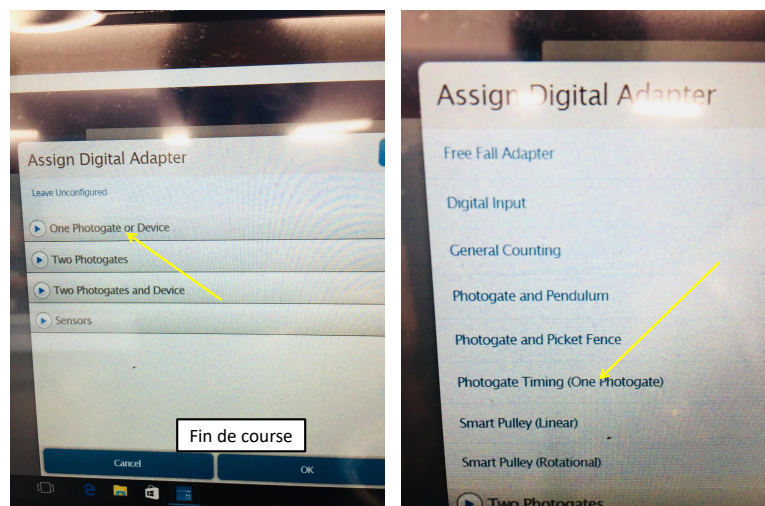


Figure 6. *One Photogate or Device* et *Photogate Timing (One Photogate)*,

3. Vous verrez ensuite l'image ci-dessous qui vous indique la longueur du drapeau . Cliquez sur "Ok".

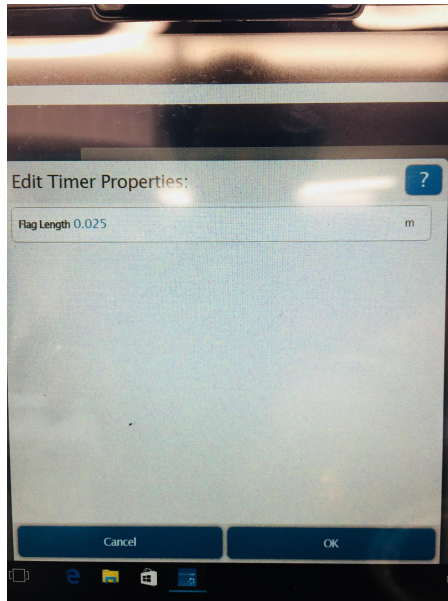


Figure 7. Longueur du drapeau

4. Votre écran montrera l'image de la Figure 8.

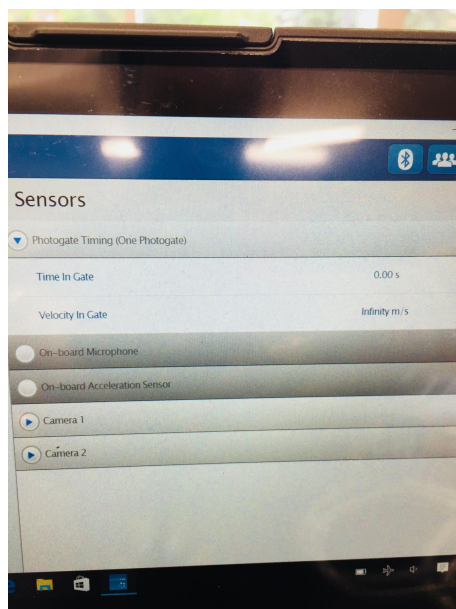
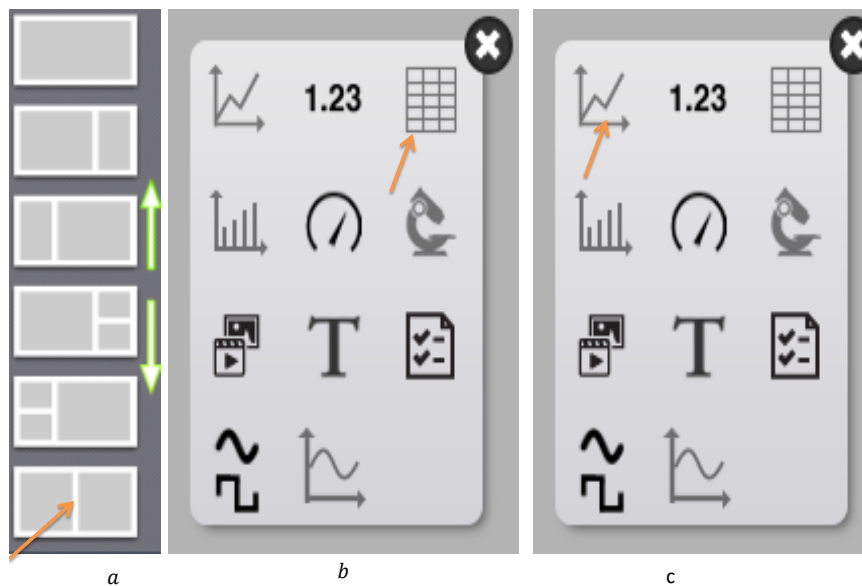


Figure 8. Time in gate et velocity in gate.

5. Cliquez sur *Time in gate*

6. Cliquez sur l'icône  pour créer une nouvelle page.

7. Pour créer un graphique de “Time in gate” et de “Velocity in gate” par rapport au temps, sélectionnez un modèle à partir de la bibliothèque en appuyant sur la flèche de la figure *a* ci-dessous. Pour le premier rectangle choisissez l'anglet de la flèche de la figure *b*, et pour le deuxième celui de la figure *c*.



8. Dans le carré à gauche cliquez sur “Select Measurement” puis choisissez *Time in gate*, faites la même chose avec le deuxième et choisissez *Velocity in gate*.
9. Dans le carré à droite cliquez sur “Select Measurement” et choisissez *Velocity in gate vs time* ou *Time in gate vs time*. Vous êtes maintenant prêts à visualiser le temps de passage et la vitesse du chariot sous le photomètre.
10. Amenez le chariot sous le photomètre (voir Figure 9) et vérifiez que le temps augmente sur le compteur du photomètre (voir Figure 8). La lumière rouge du photomètre devrait être alignée avec le rectangle supérieur. Vous êtes prêts à prendre vos données.



Figure 9. Chariot aligné avec le photomètre, lorsque le compteur est activé.

 tape 2: Collecte de données

1. Mesurez la masse du chariot, m_c , incluant le drapeau et la ficelle. L'incertitude sur la masse du chariot, Δm_c , peut être considérée négligeable. Mesurez aussi la masse, m_m , du bloc suspendu; vous pourrez utiliser une masse de 10 g ou de 20 g. Notez l'incertitude sur la masse, Δm_m .
2. La position initiale du système est lorsque le centre du chariot est aligné avec la position 10 cm de la voie (flèche gauche de la Figure 4). Mesurez alors la hauteur de la masse, h_{mi} , attachée à la ficelle. Notez l'incertitude sur cette mesure Δh_{mi} . Remarquez que la hauteur initiale de la masse, h_{mi} , reste constante; c'est sa hauteur finale, h_{mf} , qui changera entre chaque série de mesures (elle sera réduite de 10 cm à chaque fois).
3. Pour la première série de mesures, vérifiez que le photomètre soit à 10 cm du chariot, donc, à la position 20 cm (flèche droite de la Figure 4).

4. Cliquez sur Record  pour commencer l'enregistrement des données sur le système de SPARKVUE, puis relâchez le chariot, en le laissant rouler librement sur la piste et à travers le photomètre. Le temps de passage, δt , sera enregistré par le logiciel. Ceci vous donnera la vitesse expérimentale v_{exp} , car $v_{\text{exp}} = \frac{\delta x}{\delta t}$, δx étant la longueur du drapeau supérieur, déjà mesurée (et donnée par le programme Figure 7). Répétez pour obtenir un total de trois valeurs du temps de passage δt . Calculez la moyenne du temps de passage, δt , et déterminez son erreur $\Delta(\delta t)$.
 - (a) L'erreur sur la moyenne du temps de passage du drapeau $\Delta(\delta t)$ est égale à l'écart le plus grand de |observée-moyenne|.
 - (b) La valeur de l'erreur ne peut pas être plus petite que l'incertitude de l'instrument utilisé.
5. Attrapez le chariot juste avant qu'il atteigne l'arrêt final, puis arrêtez  l'enregistrement des données. Il ne faut pas que le chariot repasse sous le photomètre car il enregistrera une nouvelle valeur.
6. Répétez les étapes 3 à 5 en changeant la position du photomètre pour que la distance initiale entre le chariot (toujours centré à 10 cm) et le photomètre (position modifiée) augmente par sauts de 10 cm, et donc 20 cm, 30 cm, etc. Vous obtiendrez ainsi le temps de passage δt de neuf différentes hauteurs finales de la masse, h_{mf} . Ne mesurez pas h_{mf} à chaque fois, soustrayez plutôt 10 cm, en tenant compte de l'incertitude.
7. Supprimez les données qui ne vous conviennent pas.
8. Importez les résultats des données en utilisant le bouton , puis " Export Data" et donnez un nom à votre fichier. Vous pourrez également prendre note des valeurs de "Time in gate" et de "Velocity in gate" données par Sparkvue directement sur un tableau d'*Excel*.

6 Analyse

- Pour chaque hauteur de la masse h_m (la hauteur initiale h_{mi} et les hauteurs finales, h_{mf}), déterminez:
 - la vitesse v_{exp} (obtenue à partir de la moyenne des temps donnés par SPARKVUE et la longueur du drapeau) et son erreur Δv_{exp} ,
 - la vitesse théorique $v_{\text{théo}}$, obtenue de l'équation (3) en prenant $g=9.81\text{m/s}^2$,
 - l'énergie potentielle de la masse $E_{P,m}$ et son erreur $\Delta E_{P,m}$,
 - l'énergie cinétique totale du système masse-chariot $E_{K,m+c}$ et son erreur $\Delta E_{K,m+c}$,
 - l'énergie mécanique finale E , et son erreur ΔE , selon l'équation (3), c'est-à-dire *l'énergie mécanique totale du système en omettant l'énergie potentielle du chariot* puisqu'elle est égale avant et après la chute, et
 - la valeur expérimentale de la gravité g_{exp} et son erreur Δg_{exp} .

Reportez toutes vos valeurs sur un tableau d'*Excel*, et inclure ce tableau dans la section observation.

- Sur un graphique de l'énergie en fonction de la hauteur de la masse h_m , tracez les trois droites suivantes:
 - la droite de l'énergie potentielle de la masse $E_{P,m}$,
 - la droite de l'énergie cinétique de masse+chariot $E_{K,m+c}$,
 - la droite de l'énergie mécanique E (l'énergie mécanique totale du système *en omettant l'énergie potentielle du chariot*).

7 Résultats et discussion

Incluez les réponses aux questions de la section 3 dans la section Analyse de votre rapport. Résumez vos résultats!

COLLISIONS EN UNE DIMENSION

1 Introduction

La collision de deux chariots sur une piste peut être décrite en termes de conservation de la quantité de mouvement et, dans certains cas, de conservation de l'énergie. S'il n'y a pas de force externe nette subie par le système de deux chariots, alors nous nous attendons à ce que la quantité totale de mouvement du système soit conservée. Cela est vrai indépendamment de la force qui agit entre les chariots.

Cette expérience étudie la collision de deux objets¹, un objet plus léger de masse m et de vitesses v et v' avant et après la collision, et un objet plus lourd de masse M et de vitesses V et V' avant et après la collision. Seul le mouvement linéaire est considéré dans cette expérience; par conséquent, les vitesses sont des vitesses multipliées par des signes $\pm$. Les collisions élastiques et inélastiques sont réalisées avec deux chariots dynamiques de masses différentes.

2 Théorie

a. Conservation de la quantité de mouvement

La quantité de mouvement d'un chariot dépend de sa masse m et de sa vitesse v :

$$\mathbf{p} \equiv m\mathbf{v} \quad (1)$$

Pour une collision entre deux objets dans une dimension, la conservation de la quantité de mouvement est facilement exprimée par les équations:

$$p_{\text{initial}} = p_{\text{final}}, \quad (2)$$

$$mv + MV = mv' + MV', \quad (3)$$

D'où

$$\Delta \mathbf{p} = p_{\text{final}} - p_{\text{initial}} = 0$$

Cela signifie que la quantité de mouvement totale juste avant la collision est égale à la quantité de mouvement totale juste après la collision. Si la quantité du mouvement d'un chariot diminue, la quantité du mouvement de l'autre chariot augmente du même montant. Ceci est vrai quel que soit le type de collision, et même dans les cas où l'énergie cinétique n'est pas conservée.

¹Adapté de: Pasco, *Collisions in One Dimension*.

b. Collisions élastiques versus inélastiques

Une collision est dite *élastique* lorsque, en plus de la quantité de mouvement totale, l'énergie cinétique totale du système est conservée elle aussi. C'est donc dire qu'il n'y a pas de perte de l'énergie cinétique initiale sous forme de chaleur, ni de transfert en énergie potentielle (due à la déformation des objets), etc. L'énergie reste donc sous forme d'énergie cinétique.

Ainsi, il faut que la relation $K_{\text{initiale}} = K_{\text{finale}}$ soit également vérifiée:

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV'^2. \quad (4)$$

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.)

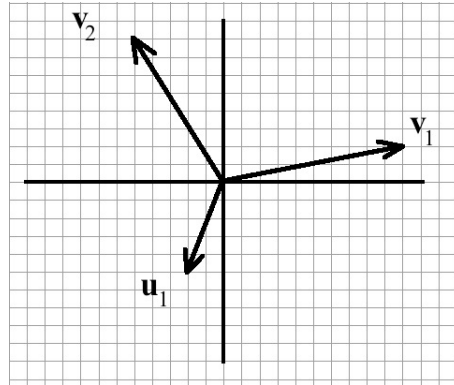
3.1 Exercices 1 - Impulsion et quantité de mouvement

Initialement, un objet de masse $m = 150$ g a une vitesse $\mathbf{v}_i = 19.8$ cm/s à 20° au-dessus de l'axe x . Après une collision, sa vitesse est de $\mathbf{v}_f = 11.2$ cm/s à 30° à gauche de l'axe y vers le haut.

- (a) Quelles sont les composantes de sa quantité de mouvement initiale?
- (b) Quelles sont les composantes de sa quantité de mouvement finale?
- (c) Quelles sont les composantes de son impulsion pendant cette collision?
- (d) Si la collision a duré 25.7 ms, quel est le vecteur force qui a agi sur l'objet?

3.2 Exercice 2 - Collision en deux dimensions

La figure ci-dessous illustre les vitesses de deux objets, de masse $m_1 = 100$ g et $m_2 = 150$ g, avant et après la collision: $\mathbf{v}_1$ est la vitesse de m_1 avant la collision, $\mathbf{v}_2$ est la vitesse de m_2 avant la collision, et $\mathbf{u}_1$ est la vitesse de m_1 après la collision.



- (a) Sachant que chaque unité de la figure vaut 1.0 cm/s, quelles sont les composantes des vecteurs $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2$ et $\mathbf{u}_1$, en cm/s ?
 (b) En utilisant la conservation de la quantité de mouvement,

$$m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = m_1 \mathbf{u}_1 + m_2 \mathbf{u}_2,$$

calculez les composantes, en cm/s, de la vitesse $\mathbf{u}_2$ de m_2 après la collision.

- (c) Calculez l'énergie cinétique totale avant et après la collision et déterminez ainsi si la collision est élastique ou inélastique.

4 Matériels

- Voie à faible friction,
- 2 chariots (rouge et bleu),
- Pieds pour la mise à niveau de la voie,
- 2 Pare-chocs élastiques,
- 2 masses de 250 *g* chacune,
- Balance,
- Tablette pour recueillir les données.

Le montage expérimental est illustré à la figure 1 suivante:

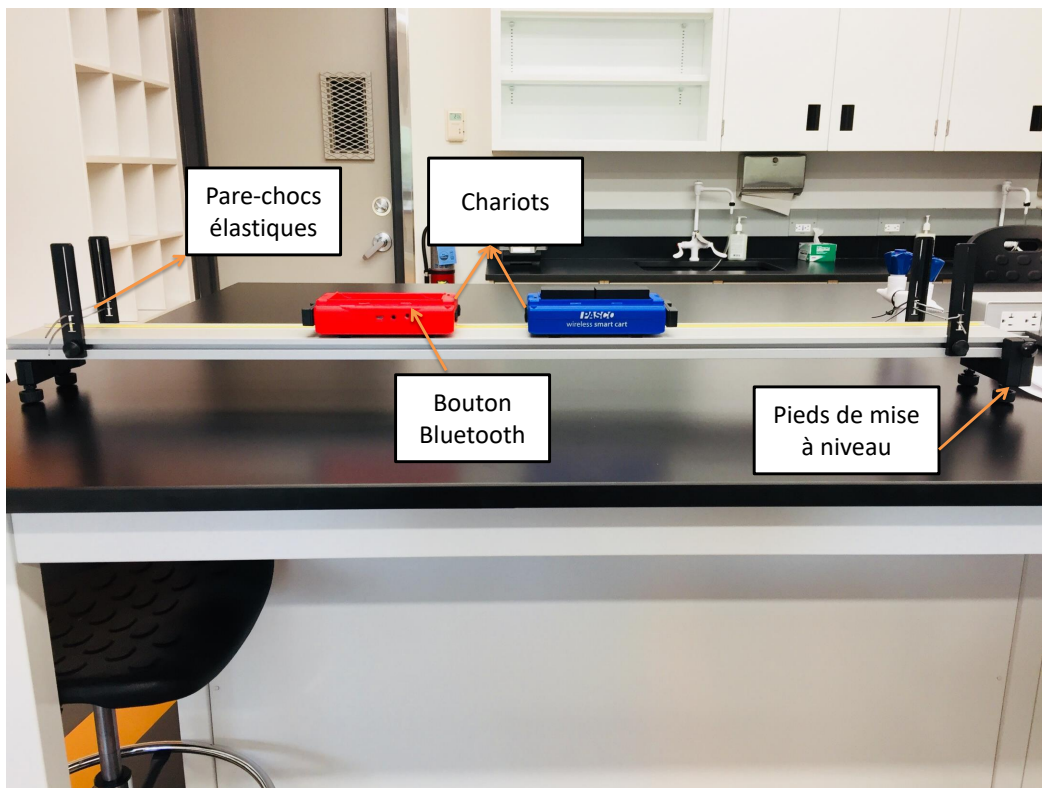


Figure 1. Montage expérimental

5 Procédures

a. Collision 1

- *Montage*

1. Installez les deux pare-chocs élastiques et les pieds réglables tel qu'illustré à la Figure 1.
2. Assurez-vous de mettre la voie à niveau à l'aide des pieds. Lorsque vous placez un chariot au repos sur la piste, donnez-lui une petite poussée dans chaque direction. Il ne devrait pas accélérer dans les deux sens.
3. Lancez le programme SPARKVUE et mettez en marche l'anglet du Bluetooth comme illustré à la Figure 2 . Vérifiez que les bluetooth des deux chariots sont également allumés voir Figure 1.

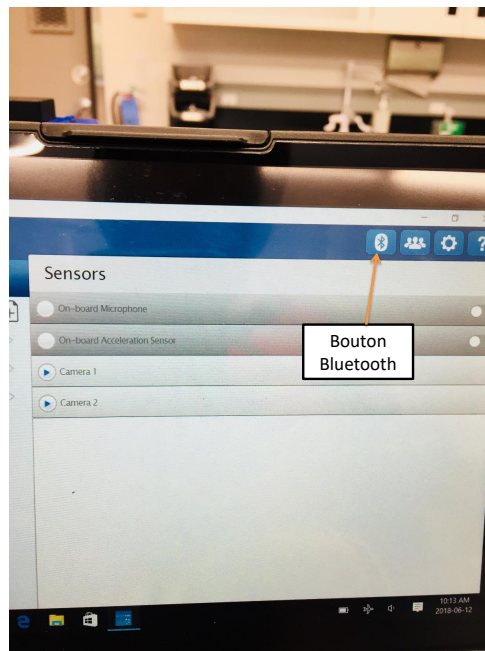
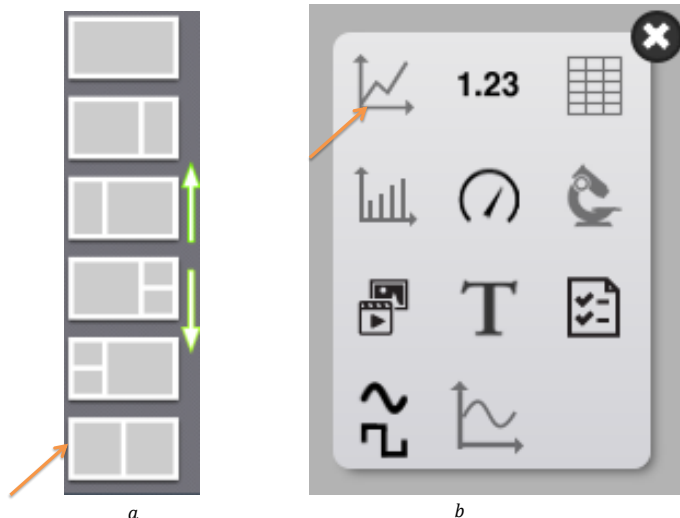


Figure 2

4. Notez le code série de vos deux chariots et ajoutez-le comme appareil de mesure.
5. Cliquez sur $Velocity_1$
6. Réglez le bouton de la fréquence d'échantillonnage  qui se trouve en bas à gauche sur 50 Hz.
7. Cliquez sur l'icône  pour créer une nouvelle page.

8. Pour créer un graphique de la vitesse par rapport au temps des deux chariots, sélectionnez un modèle à partir de la bibliothèque en appuyant sur la flèche de la figure *a* ci-dessous puis sur la flèche de la figure *b*.
9. Appuyez sur “Select Measurement” et choisissez $Velocity_1$ vs. Time, et $Velocity_2$ vs. Time pour le deuxième graphique. Vous êtes maintenant prêts à visualiser la vitesse de chaque chariot.



10. Orientez les chariots de sorte que les extrémités Velcro soient face à face, comme montré à la Figure 3 ci-dessous.



Figure 3. Collision 1

- *Collecte de données*

1. Pésiez la masse du chariot rouge et la masse du chariot bleu.
2. Placez le chariot bleu au milieu de la voie et le chariot rouge près d'une extrémité de la piste. Vérifiez que les côtés en Velcro soient face à face.
3. Cliquez sur Record  et poussez le chariot rouge vers le bleu. Arrêtez  l'enregistrement lorsque le chariot bleu atteint le pare-choc élastiques.
4. Vérifiez que vous obtenez des données propres et lisses avant et après la collision. Im-

portez les résultats des données en utilisant le bouton  , puis enregistrez "Export Data" et nommez-le "collision 1 - essai1".

5. À l'aide de l'outil des coordonnées de SPARKVUE  , obtenez la vitesse du chariot rouge et bleu juste avant la collision (vitesse initiale) et juste après la collision (vitesse finale) pour chaque essai (relevez la vitesse des chariots au même moment). Entrez les valeurs dans le tableau 1 dans la section Analyse des données pour le chariot rouge et bleu respectivement.

Attention: les deux vitesses doivent être positives

6. Répétez les étapes 1 à 5 de collecte des données, en ajoutant au chariot bleu à chaque fois une barre de masse de 250 g. Soit un maximum de masse supplémentaire de 500 g. Vous aurez alors 3 essais dans cette partie.

b. **Collision 2**• *Montage*

1. Enlevez toutes les masses du chariot bleu.
2. Inversez les deux chariots de sorte que les extrémités avec les aimants soient face à face, mais gardez toujours le chariot rouge à gauche.

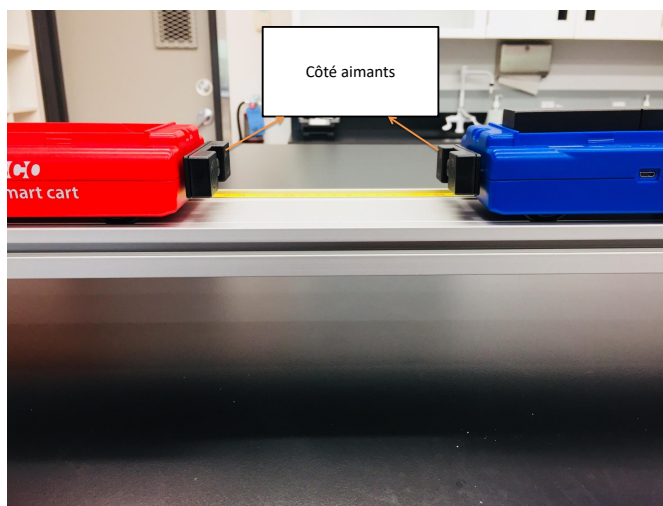


Figure 4. Collision 2

• *Collecte de données*

1. Positionnez les chariots sur la voie comme avant. Cliquez sur Record  et poussez le chariot rouge vers le bleu. Obtenez une bonne série de données et nommez cet résultat "collision 2".
2. À l'aide de l'outil des coordonnées de SPARKVUE, obtenez la vitesse du chariot rouge et bleu juste avant la collision (vitesse initiale) et juste après la collision (vitesse finale) pour chaque essai. Entrez les valeurs dans le tableau 2 dans la section Analyse des données pour le chariot rouge et bleu respectivement.

Note: Ne pas ignorer le signe de la vitesse!

3. Pourquoi les courbes sont-elles plus arrondies au point de collision?

6 Analyse

Utilisez les équations (1), (2), (3) et (4) pour compléter le tableau 2 des résultats suivants. Pour chaque essai des collisions 1 et 2:

1. Tracer un graphique de la vitesse par rapport au temps des chariots rouge et bleu pour chacun des essais.
2. Déterminer la quantité de mouvement (mv) de chaque chariot avant la collision, après la collision et la quantité de mouvement totale avant et après la collision.
3. Déterminer l'énergie cinétique ($\frac{1}{2}mv^2$) de chaque chariot avant, après la collision et l'énergie cinétique totale avant et après la collision.
4. Calculer le pourcentage d'écart entre la quantité de mouvement totale après la collision et la quantité de mouvement totale avant la collision.
5. Calculer le pourcentage d'écart entre l'énergie cinétique totale après la collision et l'énergie cinétique totale avant la collision.
6. Reportez l'ensemble de vos résultats dans vos tableaux 1 et 2 .
7. La quantité de mouvement était-elle conservée ou non; l'énergie cinétique était-elle conservée ou non?
8. Si la quantité de mouvement n'est pas conservée dans votre expérience, expliquez pourquoi.
9. L'énergie cinétique est-elle conservée dans vos collisions? Expliquez. Si l'énergie cinétique n'est pas conservée dans votre expérience, expliquez pourquoi.
10. Quelles sont les sources d'erreurs possibles?

Tableau 1: Données expérimentales pour la collision 1

Essai	m	Vitesse chariot rouge		M	Vitesse chariot bleu	
		avant collision	après collision		avant collision	après collision
	(kg)	(m/s)	(m/s)	(kg)	m/s	(m/s)
1						
2						
3						

Essai	$P (mv)$ chariot rouge		$P (Mv)$ chariot bleu		P totale		% d'écart (P)
	avant collision	après collision	avant collision	après collision	avant collision	après collision	
	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	
1							
2							
3							

Essai	E.cinétique chariot rouge		E.cinétique chariot bleu		E.cinétique totale		% d'écart (E)
	avant collision	après collision	avant collision	après collision	avant collision	après collision	
	(J)	(J)	(J)	(J)	(J)	(J)	
1							
2							
3							

Tableau 2: Données expérimentales pour la collision 2

Essai	m	Vitesse chariot rouge		M	Vitesse chariot bleu	
		avant collision	après collision		avant collision	après collision
	(kg)	(m/s)	(m/s)	(kg)	(m/s)	(m/s)
1						

Essai	$P\ (mv)$ chariot rouge		$P\ (Mv)$ chariot bleu		P totale		% d'écart (P)
	avant collision	après collision	avant collision	après collision	avant collision	après collision	
	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	$(kg.m/s)$	
1							

Essai	E.cinétique chariot rouge		E.cinétique chariot bleu		E.cinétique totale		% d'écart (E)
	avant collision	après collision	avant collision	après collision	avant collision	après collision	
	(J)	(J)	(J)	(J)	(J)	(J)	
1							

LOI DE HOOKE

1 Introduction

La loi de Hooke est un exemple de mouvement harmonique simple, qui est à la base de l'étude du mouvement ondulatoire. Cette expérience contient trois parties: (1) domaine d'élasticité d'un ressort et mesure de sa constante de Hooke, (2) relation entre la constante de Hooke, la période et la masse, et (3) constante de Hooke de ressorts en série et en parallèle. Vous n'aurez pas besoin de faire de calculs d'erreur.

2 Théorie

La loi de Hooke est une approximation qui stipule que lorsqu'un ressort est étiré d'une distance x de sa position d'équilibre, il exercera une force de rappel égale à

$$F = -kx \quad (1)$$

sur l'objet qui l'étire. La constante de proportionnalité k est appelée *constante de Hooke*. La Partie 1 de cette expérience consiste à mesurer la constante de Hooke k dans l'équation (1) et à déterminer le *domaine d'élasticité*, c.-à-d. l'ensemble des valeurs de x pour lesquelles la loi de Hooke est valide.

Partie 1

Selon la loi de Newton, $F = ma$, on voit que si un objet de masse m est attaché au ressort et qu'on le laisse osciller, alors sa position est donnée par¹

$$x(t) = x_m \cos(\omega t), \quad (2)$$

où x_m est l'*amplitude* de l'oscillation, et la *fréquence angulaire* ω (en rad/s) est donnée par

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3)$$

Vu que la fréquence angulaire ω est aussi reliée à la période T par $T = \frac{2\pi}{\omega}$, l'équation (3) mène à la relation

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} m. \quad (4)$$

La Partie 2 de cette expérience consiste à vérifier une relation semblable à (4), entre T , m et k , mais avec une légère modification tenant compte de la masse m_r du ressort.

Partie 2

Nous vérifierons aussi que lorsqu'un bloc est attaché à deux ressorts (de constantes k_1 et k_2) en *parallèle*, ces deux ressorts sont équivalents à un ressort de constante k_p :

$$k_p = k_1 + k_2. \quad (5)$$

¹Si vous connaissez les dérivées, la preuve est simple: avec la force donnée par l'équation (1), la loi de Newton devient $m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$, d'où $\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$, dont l'équation (2) est une solution avec ω donnée par (3).

Enfin, lorsqu'un bloc est attaché à deux ressorts en *série*, l'ensemble est alors équivalent à un ressort de constante k_s donnée par

$$k_s^{-1} = k_1^{-1} + k_2^{-1}. \quad (6)$$

La Partie 3 de l'expérience a pour but de vérifier les équations (5) et (6).

Partie 3

3 Matériels

- Différents types de ressort,
- masses,
- support de masse,
- ferrure de suspension,
- barre à crochets,
- mètre à mesurer,
- chronomètre.

4 Procédures

Pour les Parties 1 et 2, le matériel requis est un trépier avec une règle, un ressort à boudin, un chronomètre, et cinq masses de 50 g.

4.1 Partie 1: Mesure de la constante de Hooke et validité de la loi de Hooke

Considérez un bloc de masse m suspendu à un ressort dont la position à l'équilibre est représentée par x_0 (Figure 1(a)), et la position de l'étirement par x (Figure 1(b)):

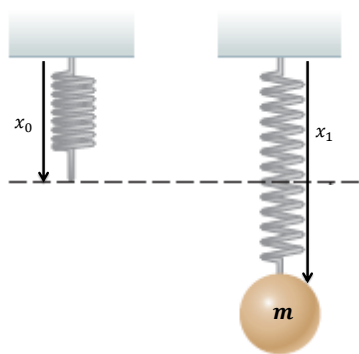


Figure 1(a)

Figure 1(b)

La force exercée sur le ressort par le bloc vaut

$$F = mg, \quad (7)$$

où vous prendrez $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Le *domaine d'élasticité* du ressort est l'ensemble des valeurs de l'élongation $x - x_0$ telles que l'élongation est proportionnelle à la force exercée par le ressort:

$$F = -k(x - x_0), \quad (8)$$

qui devient $F = -kx$ si l'origine est placée au point x_0 . Les unités de k sont des N/m (en unités SI). L'équation (8) implique que le graphique de F en fonction de $x - x_0$ sera une droite dont la pente est $-k$ et l'ordonnée à l'origine est zéro.

Pour vérifier l'équation (8), vous mesurerez la position x pour différentes valeurs de F , donnée par l'équation (7), où m est la masse accrochée au ressort. Attachez chaque masse contenue dans la liste du tableau 1 ci-dessous et mesurez pour chacune la position au repos de l'extrémité inférieure du ressort x . Faites attention de retenir le plateau quand vous en retirez des masses, pour éviter que les autres masses bondissent.

masse m (g)	position x (cm)	force $F = m \times 9.81$ (N)	élongation $x - x_0$ (m)
50			
100			
150			
200			
250			

Tableau 1: Partie 1

4.2 Partie 2: Relation entre la constante de Hooke et la période

Si un objet de masse m est attaché à un ressort et qu'il est déplacé d'une faible distance puis relâché, il entrera en *oscillation harmonique simple* (si l'élongation du ressort est dans le domaine d'élasticité). Si la masse du ressort est négligeable, les oscillations auront une période T donnée par l'équation (4). Par contre, pour un ressort réel de masse m_r , nous admettrons, sans le démontrer, que la période est plutôt donnée par

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} \left(m + \frac{m_r}{3} \right). \quad (9)$$

Le but de cette partie est de déterminer les valeurs de k et m_r avec une linéarisation graphique de l'équation (9). Vous varierez la masse m et mesurerez les périodes T correspondantes.

Commencez l'expérience en accrochant 50 g au ressort, et en l'étirant d'environ 2 cm hors de sa position d'équilibre. Relâchez la masse et, après quelques oscillations, mesurez le temps requis pour effectuer cinquante oscillations. Faites attention de compter "zéro" au moment où vous faites démarrer votre chronomètre. Aussi, évitez que l'aiguille du plateau ne frotte contre la règle. Répétez la procédure en augmentant la masse de 50 g, jusqu'à un maximum de 250 g. Enregistrez les mesures dans le tableau 2 ci-dessous:

masse m (g)	temps de 50 oscillations t (s)	période $T = \frac{t}{50}$ (s)	période au carré T^2 (s ²)
50			
100			
150			
200			
250			

Tableau 2: Partie 2

4.3 Partie 3: Ressorts en série et en parallèle

Pour la Partie 3, le matériel requis est une ferrure de suspension (pièce triangulaire à la Figure 2), barre à crochets (Figures 3 et 4), masses avec crochet, et ressorts de différentes couleurs ($k_{\text{rouge}} = 10 \text{ N/m}$, $k_{\text{bleu}} = 20 \text{ N/m}$, $k_{\text{vert}} = 40 \text{ N/m}$).

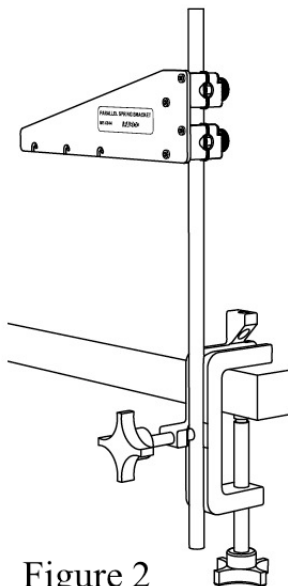


Figure 2

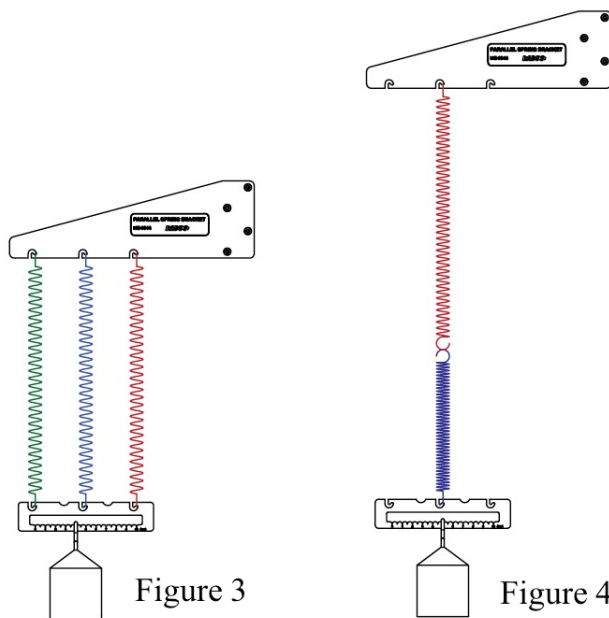
Les manipulations seront plus simples que dans les Parties 1 et 2. Elles n'impliquent pas de graphiques. Les valeurs de k seront obtenues directement de la relation

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x},$$

où $\Delta x = (x_2 - x_1)$ est le changement d'élongation qui résulte d'un changement de force. $\Delta F = (m_2 - m_1)g$, les indices 1 et 2 se réfèrent aux deux mesures différentes.

La masse initiale m_1 inclut la barre à crochet et une autre masse ajoutée initialement pour que la barre à crochet soit horizontale et les ressorts légèrement étirés. Mesurez ainsi les valeurs de k_{rouge} , k_{bleu} et k_{vert} .

Réalisez le montage de la Figure 3 afin de mesurer la constante k pour les ressorts en parallèle. Faites la même mesure pour la Figure 4, qui a les ressorts bleu et rouge en série.



5 Analyse des résultats

5.1 Partie 1: Mesure de la constante de Hooke et validité de la loi de Hooke

Tracez un graphique de F (sur l'axe y) en fonction de $x - x_0$ (sur l'axe x) sur *Excel*, de façon à pouvoir déterminer le domaine d'élasticité. Il ne s'agit que d'identifier le domaine de x pour lequel les points semblent former une droite. Donnez la pente de la droite, en déduire la constante k .

5.2 Partie 2: Relation entre la constante de Hooke et la période

Linéarisez l'équation (9). Puis, tracez un graphique de T^2 en fonction de m pour pouvoir déterminer la constante k et la masse du ressort m . Grâce à *Excel* en déduire l'équation de la droite afin d'obtenir la pente et l'ordonnée à l'origine. Quelles sont les quantités correspondant à la pente et l'ordonnée à l'origine? En déduire les valeurs de k et m_r . Quel est le pourcentage d'écart entre la valeur de k trouvée ici est celle de la première partie?

5.3 Partie 3: Ressorts en série et en parallèle

Calculez le pourcentage d'écart des valeurs mesurées de k_{rouge} , k_{bleu} et k_{vert} par rapport aux valeurs théoriques respectives. Utilisez les valeurs théoriques pour calculer k_p (Figure 3) et k_s (Figure 4). Calculez les pourcentages d'écart des valeurs expérimentales de k_p et k_s avec les valeurs théoriques.

ONDES STATIONNAIRES

Cette expérience contient deux parties qui ont pour but l'étude de deux types d'ondes stationnaires : sur une corde (Partie I)¹ et dans un tuyau fermé (Partie II)². On ne demande pas de calcul d'erreur.

1 Première partie: Ondes stationnaires sur une corde

1.1 Théorie

La première partie consiste à utiliser la méthode d'*analyse dimensionnelle* (section 1.1.1, ci-dessous) pour trouver la relation entre la longueur d'onde λ et la tension T de la corde pour des ondes stationnaires transversales (sur une corde), et ensuite la vérifier expérimentalement à l'aide de la linéarisation graphique.

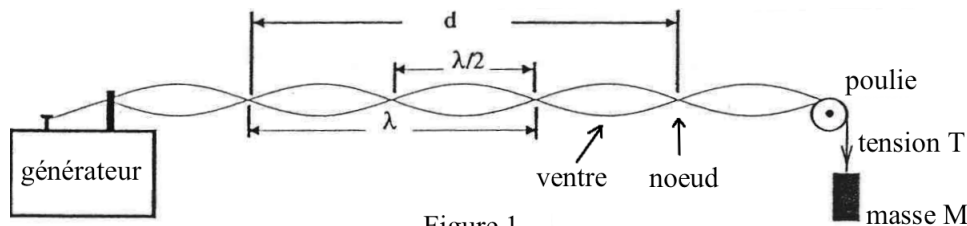


Figure 1

La Figure 1 illustre le montage pour une onde stationnaire sur une corde. Si une des extrémités de la corde est fixe (à droite de la Figure 1), et que l'autre extrémité est en oscillation harmonique simple de fréquence f (à gauche de la Figure 1), une onde stationnaire sera générée si la longueur de la corde est égale à un nombre entier de $\lambda/2$, avec λ telle que la vitesse de l'onde est égale à

$$v = \lambda f. \quad (1)$$

Les points stationnaires (c.-à-d. toujours au repos) sont appelés des *noeuds*. Deux noeuds successifs sont séparés d'une distance $\lambda/2$. Les points où l'amplitude est maximale s'appellent *ventres* ou *antinoeuds*.

La relation entre la longueur d'onde λ , la fréquence f , la densité linéique de masse μ et la tension dans la corde T peut être déduite avec une analyse dimensionnelle. Cette méthode vous permettra de trouver les exposants l , m et n dans la relation

$$\lambda = k\mu^l f^m T^n, \quad (2)$$

où k est une constante sans dimension.

Vous trouverez l'annexe d'une analyse dimensionnelle à la page 8.

¹Adapté de: Experiment 7 - Standing Waves on a String, *Physics Laboratory Manual - Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

²Adapté de: Experiment 8 - Speed of Sound in Air, *Physics Laboratory Manual - Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

1.2 Questions préliminaires

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

1. Utilisez la méthode d'analyse dimensionnelle décrite dans l'annexe pour déterminer les exposants l , m et n qui apparaissent dans l'équation (2). Considérez pour ce faire les puissance de temps, longueur et masse. Écrivez cette équation sous la forme d'une racine, comme à l'équation (11).
2. L'équation obtenue à la question (1) peut être vérifiée par linéarisation graphique. Considérez λ en fonction de $\sqrt{T}$. Quelles sont les quantités de l'équation obtenue à la question (1) qui correspondent à la coordonnée y ? À la coordonnée x ? À la pente m ? Et à l'ordonnée à l'origine b ?

1.3 Procédures

Un générateur à impulsions est utilisé pour créer des ondes stationnaires sur une corde. Le générateur vibre à une fréquence d'environ $f = 60$ Hz. La tension T dans la corde est égale au poids de la masse attachée à la corde.

1. Préparez le montage de la Figure 1 et attachez une masse $M = 100$ g à la corde.
2. Placez un interrupteur d'ondes de façon à contenir un nombre *impair* (trois ou plus) de ventres. Si la corde oscille dans plusieurs plans, ajustez lentement l'interrupteur d'ondes jusqu'à ce que des ondes verticales stables s'instaurent.
3. Mesurez la longueur d de N ventres de l'onde stationnaire. N'utilisez pas le premier ventre près du générateur d'ondes parce que la tige du générateur vibre et le noeud n'apparaît qu'à quelques centimètres.
4. Répétez l'étape 3 pour différentes valeurs de M avec des écarts de 50 g, jusqu'à une masse maximale $M = 400$ g. Écrivez vos données sous la forme d'un tableau (comme ci-dessous) contenant M , le nombre de ventres N , la distance de N ventres d , la longueur d'onde λ , et le carré de la tension $\sqrt{T}$.

Note: $f = 60 \text{ sec}^{-1}$ $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$ $\mu = \text{_____ kg/m}$

M (kg)	N	d (m)	λ (m)	T (N)	$\sqrt{T}$ (N ^{1/2})

5. Mesurez la masse m_c et la longueur totale de la corde L . Déterminez ensuite μ à l'aide de la définition $\mu = m_c/L$.

1.4 Analyse des résultats

1. Construisez le graphique pour tester la relation prédite dans les questions de la section 1.2. Calculez la pente. Quelle est l'ordonnée à l'origine? Utilisez ces résultats pour déterminer la valeur expérimentale de k dans l'équation (2).
2. D'après vos résultats, est-ce que k est un entier? Récrivez l'équation (2) en substituant les valeurs de k, l, m et n .

1.5 Questions

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

1. Trouvez une expression pour la vitesse v de l'onde en termes de μ (et autres variables).
2. Votre valeur expérimentale k_{exp} est-elle égale à un entier?

2 Deuxième partie: Ondes stationnaires dans un tuyau fermé

2.1 Théorie

Cette partie³ a pour but de mesurer la vitesse du son dans l'air à l'aide de la résonance dans un tuyau *fermé*, c.-à-d. ouvert seulement à une extrémité. Contrairement à la Partie 1, il s'agit ici d'ondes *longitudinales*, plutôt que d'ondes transversales.

On considère que la relation (1) est encore valide entre la vitesse du son, v , sa fréquence f et de sa longueur d'onde λ . La longueur d'onde λ peut être déterminée expérimentalement à l'aide des ondes stationnaires, tel qu'illustré à la Figure 2, ci-dessous.

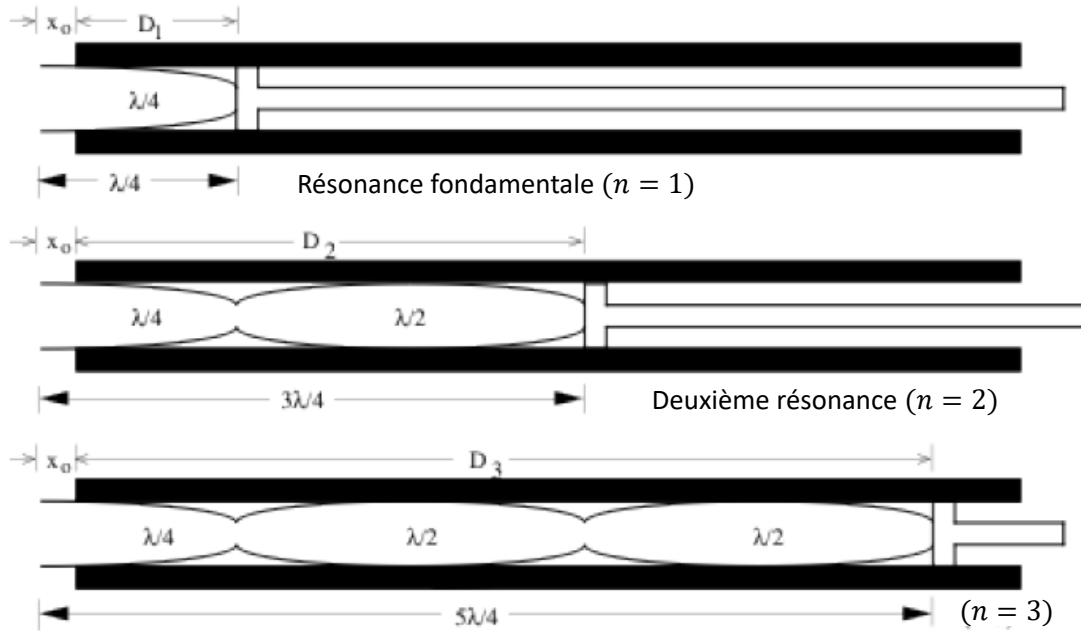


Figure 2: Distances successives des ondes dans un tuyau fermé.

Pour une onde sonore d'une fréquence donnée (par exemple, par un diapason), la longueur d'onde sera fixe et une onde stationnaire sera établie seulement pour des longueurs de tuyau spécifiques, tel qu'illustré à la Figure 2.

³Adapté de: Experiment 8 - Speed of Sound in Air, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

Pour une longueur d'onde donnée λ , ces résonances sont établies quand la longueur L_n de la colonne d'air est un *multiple impair de quarts de la longueur d'onde*⁴ :

$$L_n = (2n - 1) \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

Remarquez qu'en pratique, la longueur totale L_n d'une colonne d'air est plus grande que la longueur D_n de la chambre d'air à l'intérieur du tuyau parce que le centre du ventre à l'extrémité ouverte est situé à l'extérieur du tuyau d'une distance x_0 . De la Figure 2, nous voyons que le décalage x_0 est tel que que

$$L_n = D_n + x_0. \quad (4)$$

Dans un cas idéal, le terme de correction x_0 ne dépend pas de l'ordre de résonance n ni de la fréquence f .

À l'aide des équations (1) et (4), nous pouvons exprimer D_n en termes de la vitesse v et de la fréquence f pour des résonances successives n :

$$D_n = (2n - 1) \frac{v}{4f} - x_0 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

autrement dit,

$$D_1 = \frac{v}{4f} - x_0, \quad D_2 = \frac{3v}{4f} - x_0, \quad D_3 = \frac{5v}{4f} - x_0, \dots$$

En mesurant la distance de la chambre à air D_n pour différentes valeurs de n et à différentes fréquences f , un graphique peut être tracé à partir de l'équation (5) linéarisée, et ainsi déterminer la vitesse du son v et le terme de correction inconnu x_0 .

2.2 Questions préliminaires

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

1. Linéarisez l'équation (5) de sorte que le graphique aura la forme $y = mx + b$. Si l'équation (5) décrit D_n en fonction de $\frac{(2n-1)}{4f}$, identifiez les quantités physiques qui correspondent à x , à y , à la pente m et à l'ordonnée à l'origine b .
2. À l'aide de votre réponse à la question 1, exprimez v et x_0 en termes de la pente m et de l'ordonnée b .
3. En termes de la longueur d'onde λ , quelle est la distance entre deux noeuds successifs? Autrement dit, de combien faut-il changer la longueur du tuyau pour passer d'une résonance donnée à la résonance suivante?
4. Expliquez brièvement pourquoi il doit y avoir un noeud à l'extrémité fermée du tuyau.

⁴Remarque: ici, les modes seront donc numérotés $n = 1, 2, 3, \dots$ alors que dans le cours, nous numérotions ces mêmes modes $n = 1, 3, 5, \dots$. Peu importe la numérotation utilisée, les longueurs de tuyau possibles sont $L = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$

5. Déterminez le rapport L_2/L_1 pour les deux premières résonances $n = 1, 2$, pour un tuyau fermé comme ici.
6. Si un tuyau était *fermé aux deux extrémités* (avec une source sonore à l'intérieur), quel serait le rapport L_2/L_1 pour les deux premières résonances? Dessinez le patron de l'onde stationnaire pour L_1 et pour L_2 .

2.3 Procédures

Vous utiliserez un long tuyau muni d'un piston mobile ainsi qu'un diapason de fréquence connue. Vous pourrez varier la longueur de la colonne d'air en déplaçant le piston aux positions des ondes stationnaires, c-à-d. aux résonances. Une échelle sur le tuyau vous permettra de mesurer la longueur de la colonne d'air.

1. Un maillet en caoutchouc vous servira à frapper *doucement* le diapason, qui vibrera alors à sa fréquence fondamentale, indiquée sur le diapason. Ne le frappez pas trop fort car il produirait aussi le premier harmonique, de fréquence $2f$ (à un octave plus élevé que le mode fondamental du diapason), faussant ainsi vos résultats.
2. Frappez le diapason et tenez-le près de l'ouverture du tuyau, tout en déplaçant le piston dans le tuyau. Pour certaines longueurs du tuyau, une résonance (un son fort) sera entendue. Pour chaque diapason, obtenez ainsi les longueurs D_1 , D_2 , et D_3 , illustrées à la Figure 2. Si la fréquence fondamentale du diapason est la seule présente, les longueurs D_n seront dans un rapport de 1:3:5.
3. Mesurez le diamètre intérieur du tuyau. Le rayon R du tuyau sera relié au décalage x_0 .
4. Mesurez aussi la température du laboratoire, proche de l'ouverture du tuyau. Elle est reliée à la vitesse du son dans le tuyau.

2.4 Analyse des résultats

1. Faites un tableau de vos données pour f , n , D_n . Au besoin, vous y ajouterez des colonnes pour inclure les variables calculées. Vous y identifierez aussi les variables x et y de la droite $y = mx + b$.
2. Tracez le graphique linéaire suggéré par vos réponses aux questions 1 et 2 de la section 2.2.
3. Déterminez les valeurs expérimentales pour la vitesse du son v_{exp} et le facteur de correction $x_{0,\text{exp}}$ à partir de votre graphique.
4. La vitesse du son v_0 dans l'air sec à 0 °C (273.15 K) est 331.3 m/s. Elle augmente avec la température; nous utiliserons un facteur de correction pour calculer la vitesse théorique du son $v_{\text{théo}}$ en fonction de la température T (en degrés K):

$$v = (331.3 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273.15}} \quad (T \text{ en K}) \quad (6)$$

Utilisez votre mesure de T pour calculer la vitesse théorique du son $v_{\text{théo}}$.

5. Comparez les deux valeurs de vitesse, v_{exp} et $v_{\text{théo}}$. Quel est le pourcentage d'écart entre vos deux valeurs? On ne demande *pas* de calcul d'erreur.
6. Un calcul théorique montre que x_0 est relié approximativement au rayon intérieur du tuyau, R , par la relation :

$$x_{0,\text{théo}} \approx 0.6R. \quad (7)$$

Comparez cette valeur théorique $x_{0,\text{théo}}$ à votre valeur expérimentale $x_{0,\text{exp}}$. Quel est le pourcentage d'écart entre vos deux valeurs? On ne demande *pas* de calcul d'erreur.

Analyse dimensionnelle: méthode et exemple d'un pendule simple

En général, il faut vérifier si vos unités (c.-à-d. dimensions) sont correctes lorsque vous analysez un problème de physique. Les dimensions doivent être les mêmes dans chaque terme d'une équation.

Pour illustrer cette méthode, considérons un autre problème: la relation entre la période T d'un pendule simple en fonction de sa longueur L et de la constante gravitationnelle g . Supposons la forme générale

$$T = cL^m g^n,$$

où m et n sont des nombres réels, que nous cherchons à déterminer, et c étant une constante sans dimension.

Puisque l'unité de T est le *temps*, celle de L est une *longueur* et celle de g est une *accélération*, alors les unités de l'équation citée ci-dessus sont

$$\begin{aligned} [T] &= [L]^m \times [g]^n, \\ (\text{temps})^1 &= (\text{longueur})^m (\text{longueur} \times \text{temps}^{-2})^n. \end{aligned} \quad (8)$$

En égalant les puissances de *temps* du côté gauche de l'équation (8) avec celles du côté droit, nous obtenons

$$1 = -2n. \quad (9)$$

En égalant les puissances de la *longueur* du côté gauche, où $(\text{longueur})^0 = 1$, nous trouvons

$$0 = m + n. \quad (10)$$

En résolvant les équations (9) et (10), nous trouvons

$$m = \frac{1}{2}, n = -\frac{1}{2},$$

d'où la relation

$$T = cL^{\frac{1}{2}} g^{-\frac{1}{2}} = c \sqrt{\frac{L}{g}}. \quad (11)$$

Ainsi, la méthode d'analyse dimensionnelle permet de trouver la forme correcte juste en analysant les unités des quantités physiques impliquées. Cependant, elle ne donne pas la valeur de la constante c (qui est égale à 2π).

INTERFÉRENCE DE LA LUMIÈRE

Remarque importante concernant la sécurité:

N'utilisez *jamaïs* le collimateur et le télescope pour déplacer le spectromètre, car ça désalignerait l'appareil! Aussi, n'ajustez pas le spectromètre sans être informés de la procédure.

Sécurité

1 Introduction

Cette expérience¹ démontre la nature ondulatoire de la lumière en présentant l'interférence d'ondes lumineuses. La première partie de cette expérience est une version de l'expérience des deux fentes de Young effectuée en 1801. Elle a été utilisée pour établir la théorie ondulatoire de la lumière. La deuxième partie illustre comment un réseau de diffraction peut être utilisé pour analyser un spectre de lumière.

Partie I

Partie II

2 Théorie

2.1 Partie I. Interférence de Young, produite par deux fentes

L'interférence de Young peut être produite en illuminant deux fentes, S_1 et S_2 , avec une lumière cohérente (Figure 1 (a)). Ces fentes minces se comportent comme des sources ponctuelles qui produisent des ondes sphériques. La superposition de ces ondes produit des régions d'interférence constructive (max) et des régions d'interférence destructive (min). Si un écran est placé à une certaine distance de la fente double, un patron d'interférence y est observé (Figure 1(b)).

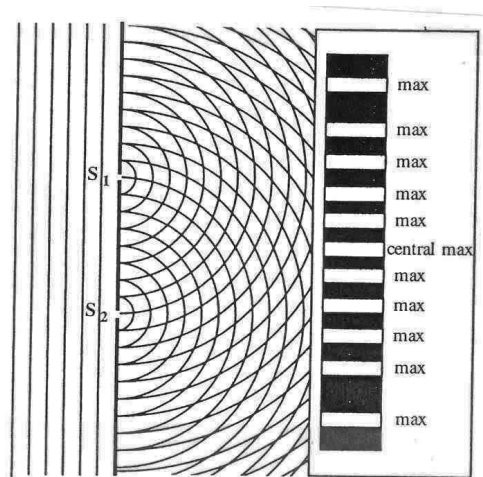


Figure 1: (a) Interférence des ondes (b) Franges sur l'écran

¹Adapté de: Experiment 9 - Interference of Light, *Physics Laboratory Manual- Phys 124/126*, Department of Physics, University of Alberta.

La position des franges brillantes et sombres peut être calculée en utilisant la différence de marche $\Delta r \equiv r_2 - r_1$ des rayons de chacune des deux fentes par rapport à l'écran. En vous référant à la Figure 2, la différence de marche Δr entre les rayons r_2 et r_1 est

$$\Delta r = r_2 - r_1 \simeq d \sin \theta, \quad \text{avec } d \ll L, \quad (1)$$

où d est la distance entre le centre de chaque fente, θ est l'angle des rayons par rapport à l'axe central (maximum central) et L est la distance entre la fente double et l'écran.

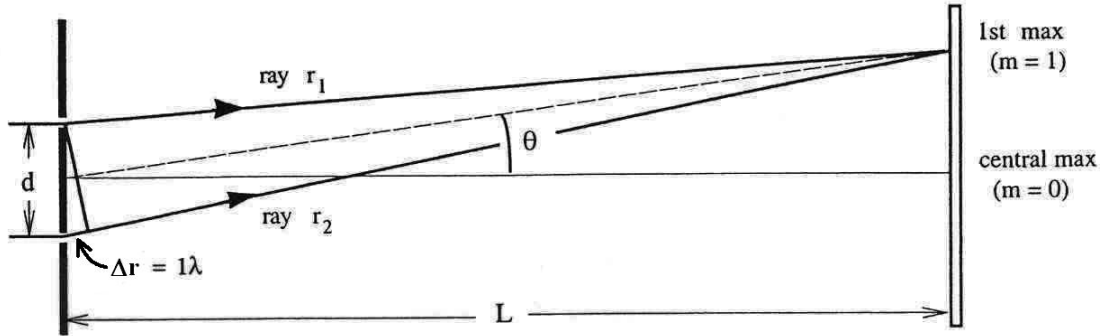


Figure 2: Différence de marche entre deux rayons.

Une frange brillante sera sur l'écran si les ondes qui arrivent à cet endroit sont telles que la différence de marche Δr est un nombre entier de la longueur d'onde: $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ donnée par:

$$[\text{franges brillantes}] \quad \Delta r = m\lambda = d \sin \theta, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

où m est l'ordre de la frange. Le maximum de l'ordre $m = 0$, ou *maximum central*, est la frange brillante centrale où $\Delta r = 0$, et donc, $\theta = 0$. Les deux maxima de l'ordre $m = \pm 1$ sont les franges brillantes de chaque côté du maximum central, et ainsi de suite pour les ordres plus élevés ($m = \pm 2, \pm 3, \dots$). Les franges sombres se produisent lorsque la différence de marche Δr est $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$, et sont décrites par

$$[\text{franges sombres}] \quad \Delta r = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda = d \sin \theta, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

2.2 Partie II. Réseau de diffraction

Un réseau de diffraction est un très grand nombre de fentes également espacées. Lorsque la lumière arrive sur le réseau de diffraction, chaque fente agit comme une source d'ondes diffractées qui interfèrent. Une frange centrale brillante et des franges d'ordres élevés peuvent être observées lorsque la lumière diffractée arrive sur un écran éloigné, comme à la Figure 3.

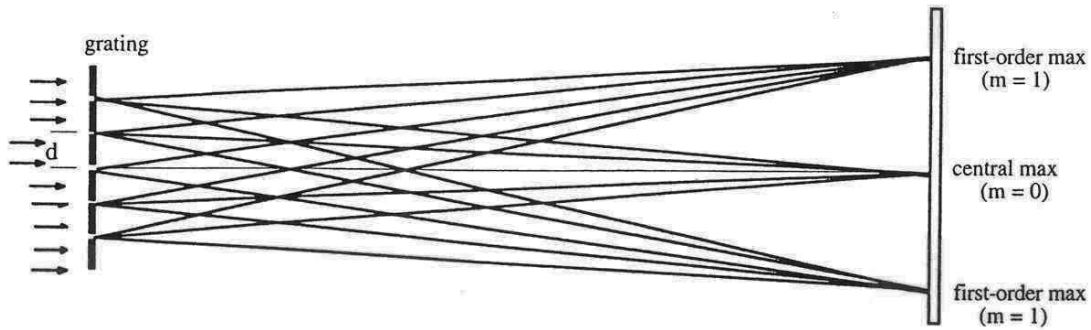


Figure 3: Les maxima central et du premier ordre (franges brillantes) formés en utilisant un réseau de diffraction

Les franges brillantes sont formées lorsque *toutes* les fentes se superposent de manière constructive. Dans ce cas, la différence de marche Δr est la même que celle de l'interférence de deux fentes: les franges brillantes sont observées aux positions données par

$$[\text{maxima}] \quad m\lambda = d \sin \theta, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

où d est la distance entre les fentes (aussi appelée le *pas du réseau*) et θ est l'angle par rapport au maximum central ($m = 0$).

Si la source de la lumière incidente est constituée de plusieurs fréquences, alors chaque longueur d'onde produira un maximum brillant (raie ou ligne du spectre) à différent angle, et ce à chacun des ordres $m \neq 0$. Le schéma d'un spectre visible inconnu est illustré à la Figure 4.

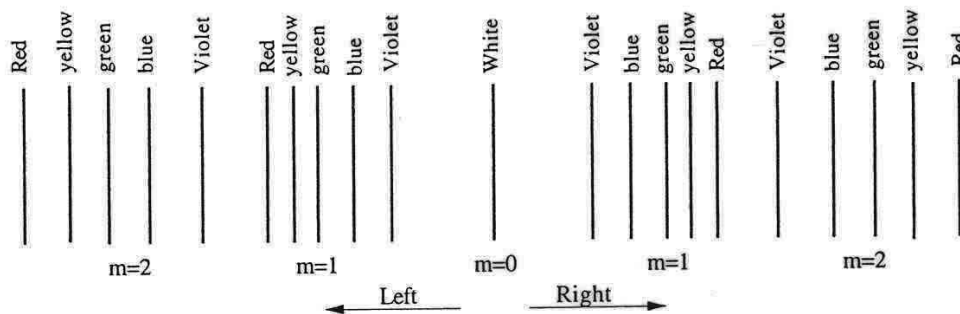


Figure 4: Représentation de trois ordres successifs d'un spectre inconnu

Spectromètre

Les franges produites par un réseau de diffraction sont généralement observées à l'aide d'un spectromètre (Figure 5). Le collimateur sert à produire une lumière plane dont les rayons parallèles sont dirigés vers le réseau. Le télescope fait la mise au point des ondes émergentes de la lumière sur le plan focal de l'oculaire du télescope. La frange observée est alors centrée dans l'oculaire. Pour ce faire, deux lignes minces en forme de croix gravées dans l'oculaire sont utilisées. La position de la frange centrée est mesurée en utilisant une échelle angulaire située sur le contour de la table du spectromètre.

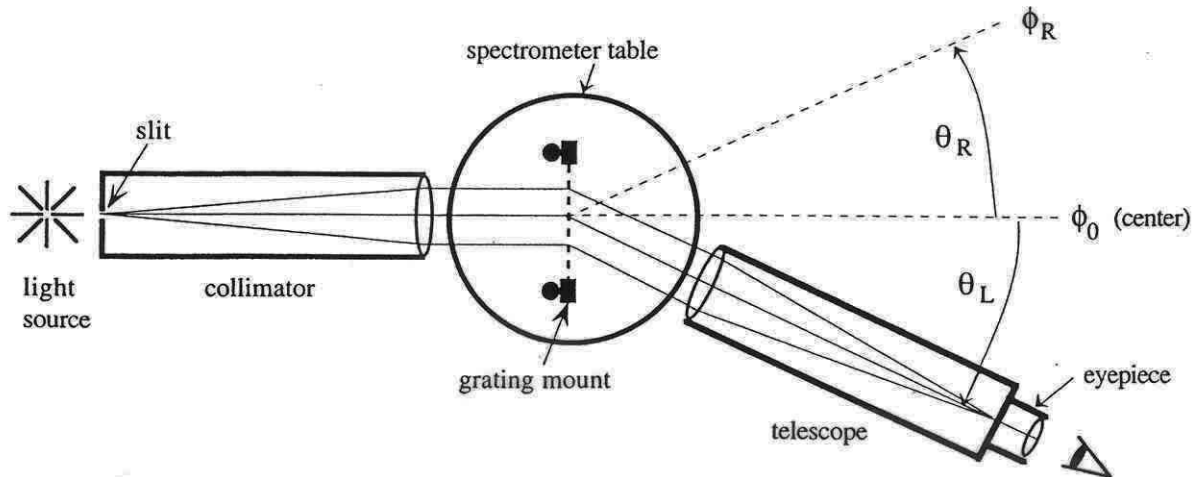


Figure 5: Mesure des angles à l'aide d'un spectromètre

3 Procédures

3.1 Partie I. Interférence de Young

Attention! Ne regardez pas directement le faisceau de la lumière du laser, ceci pourrait endommager votre vue!

Sécurité

Le montage expérimental² contient un laser, une fente double et un écran, illustrés à la Figure 2. La longueur d'onde λ est spécifiée sur l'appareil ($\lambda_{\text{HeNe}} = 632.8 \text{ nm}$).

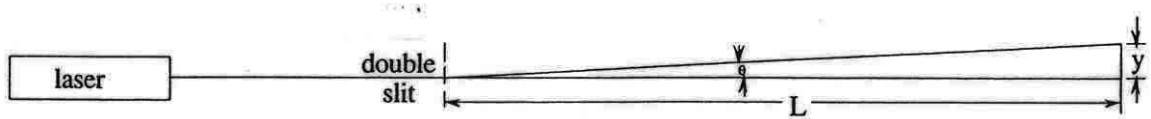


Figure 6: Interférence d'une fente double

- Mesurez la distance L entre l'écran et la fente double.
- Identifiez le maximum central (où $m = 0$) et les franges des ordres $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Le montage et les distances sont illustrés à la Figure 6. La distance entre le centre et un max est y . Puisque l'angle est petit, nous pouvons utiliser l'approximation suivante:

$$\frac{y}{L} = \tan \theta \cong \sin \theta \quad (5)$$

où y est la distance entre le maximum $m = 0$ et le $m^{\text{ième}}$ maximum (voir la Figure 6). En substituant dans l'équation (2), on obtient

$$m\lambda = d \left(\frac{y_m}{L} \right). \quad (6)$$

qui implique que, pour des petits angles, les franges sont uniformément espacées.

Mesurez la séparation y_m entre le plus grand nombre de maxima que vous pouvez compter et voir clairement de chaque côté du centre $m = 0$. En utilisant l'équation (6), déterminez la séparation des deux fentes $d \pm \Delta d$.

²Il y a seulement un montage dans le laboratoire. Alors chaque groupe d'étudiants fera ses observations à tour de rôle.

3.2 Partie II. Réseau de diffraction

Avertissements:

- Allumez la lampe d'hélium pour la laisser chauffer et ne la fermez pas avant d'avoir complètement fini l'expérience.
- Ne soulevez *jamais* le spectromètre en le tenant par le collimateur et le télescope, ceci désalignerait l'appareil! Sécurité

Ajustement du spectromètre

Une mise au point du spectromètre doit être faite. Après cet ajustement, *aucun changement* ne devrait être nécessaire. *Au besoin, demandez de l'aide de votre instructeur.* Il est important d'ajuster votre spectromètre pour que de la lumière plane soit obtenue. Si vous portez normalement des lunettes, portez-les lors de ce réglage.

1. Familiarisez-vous avec le fonctionnement du spectromètre (Figure 7). Identifiez:

- le *télescope*, avec la vis de mise au point, l'anneau d'ajustement des deux lignes internes en forme de croix, la vis micrométrique pour le déplacement et la vis de blocage du télescope,
- le *collimateur*, vis de mise au point et vis d'ajustement de l'ouverture de la fente,
- le *support* du réseau de diffraction sur le plateau rotatif,
- la *table rotative*, l'échelle principale des angles de la table et son vernier, la vis micrométrique de déplacement et la vis de blocage de la table. Apprenez à lire les angles, au 0.1° près, lorsque la ligne du vernier coïncide avec la ligne de l'échelle principale.

2. Assurez-vous que le télescope soit à sa position la plus courte. Afin de faire la mise au point pour la lumière plane, regardez un objet éloigné à travers la fenêtre du laboratoire et obtenez une image claire en ajustant la longueur du télescope. De plus, assurez-vous qu'il n'y ait pas de mouvement relatif entre l'image de l'objet et celle de la croix lorsque vous déplacez votre tête de gauche à droite. Ce mouvement relatif est dû à la parallaxe.

Remarque: *Une fois que le télescope a été réglé pour la lumière plane, il ne devrait pas être ajusté de nouveau durant l'expérience.*

3. Placez la lampe à l'hélium près de la fente du collimateur. Faites la mise au point du collimateur (et non celle du télescope!) afin de voir une image claire de la fente dans le télescope.

4. La précision est limitée par la résolution du spectromètre (0.1°) et la largeur de la fente du collimateur. Une fente étroite est nécessaire pour des mesures précises; par contre, elle peut donner une image trop pâle. Si cela se produit, la fente peut être élargie un peu, puis rétrécie (à environ $\frac{1}{2}\text{mm}$) avant la lecture finale de l'angle.

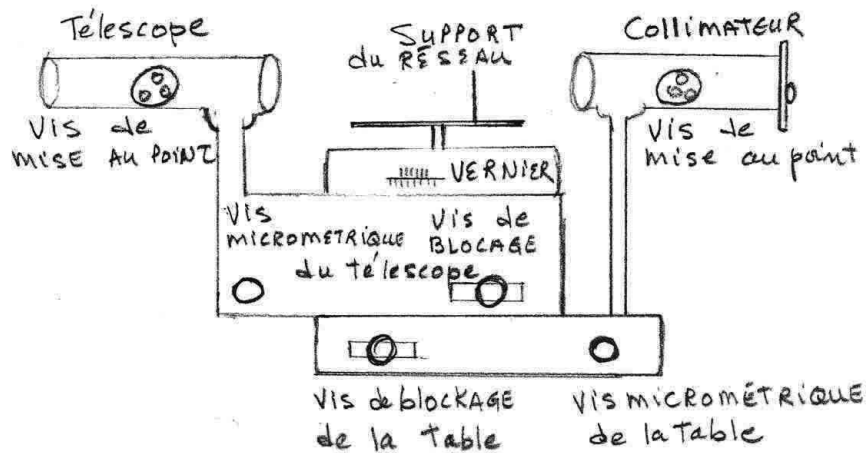


Figure 7: Vue latérale d'un spectromètre

Placez la lampe d'hélium à l'entrée de la fente du collimateur. Alignez la lampe, le collimateur et le télescope de façon à former une *ligne droite* lorsque vous regardez la fente dans le télescope. Installez délicatement le réseau de diffraction sur son support, perpendiculairement à la ligne lampe-collimateur-télescope. Serrez la vis de blocage de la table afin que la table du spectromètre ne puisse plus être bougée. La vis de blocage du télescope doit être dévissée pour permettre de bouger horizontalement (gauche-droite) le télescope.

Pour voir le spectre de diffraction du premier ordre, tournez le télescope vers la droite ou vers la gauche, jusqu'à ce que les lignes ou raies du premier ordre soient visibles. Selon le réseau de diffraction, la rotation sera de 15° à 20° à partir de la ligne centrale ($m = 0$). Si les lignes spectrales sont trop pâles, ajustez premièrement la position de la lampe et élargissez un peu la fente en utilisant la vis située à l'extrémité du collimateur.

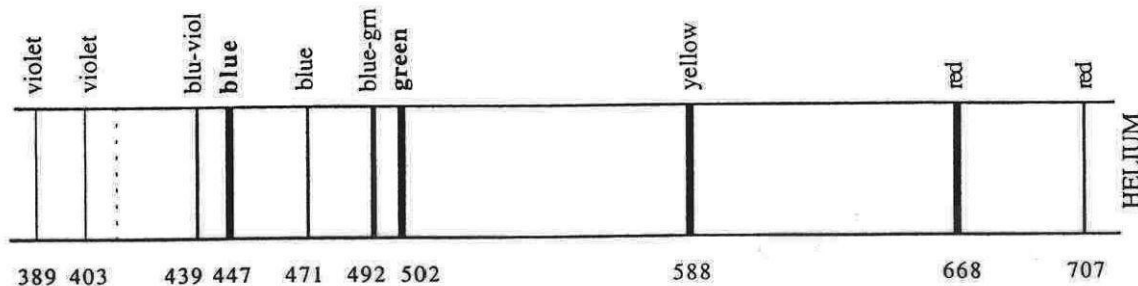


Figure 8: Spectre de l'hélium qui montre les principales lignes,
l'intensité relative et les longueurs d'onde en nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

1. Placez le télescope de façon à voir le maximum central au centre du télescope. Tournez

l'oculaire du télescope jusqu'à ce qu'une des lignes minces de la croix soit parallèle à la fente. Centrez cette ligne sur le maximum central. Notez la position de la raie de diffraction de l'ordre zéro ϕ_0 ($m=0$).

- Identifiez le plus grand nombre possible des lignes spectrales du premier ordre avec la Figure 8. Centrez la ligne de la croix du télescope sur la première raie visible et notez sa position ϕ , puis calculez l'angle de diffraction θ . Compilez les données et les résultats dans un tableau semblable au Tableau 1 illustré à la section 4.

Attention: l'angle mesuré de la table ϕ n'est pas le même que l'angle de diffraction θ .

Lorsque vous calculez des fonctions trigonométriques à l'aide d'*Excel*, les angles doivent être exprimés en radians. Pour convertir un angle des degrés en radians, utilisez la fonction *Excel* =RADIANS (*angle en degrés*).

- Tournez le télescope jusqu'au deuxième ordre du spectre. Choisissez une des raies brillantes de ce spectre. Notez sa couleur et sa position ϕ . Déterminez le rapport entre le sinus de l'angle de diffraction du premier ordre et celui du deuxième ordre. Est-ce que ce rapport est égal, à erreur près, au rapport théorique selon l'équation (2)?

4 Questions et analyse des résultats

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

1. Dans l'expérience de la fente double, un laser de longueur d'onde 632.8 nm permet d'obtenir des franges sur un écran placé à 1.000 ± 0.002 m de la fente double. Un total de neuf franges brillantes ont été observées dans une disposition symétrique autour du maximum central. La distance mesurée entre les deux franges les plus éloignées est de $\Delta y = 2.5 \pm 0.1$ cm. Calculez la valeur de la séparation $d \pm \Delta d$ entre les deux fentes. Montrez toutes les étapes intermédiaires de vos calculs. *Remarque:* 1 nm = 10^{-9} m. Partie I
2. Calculez le pourcentage d'écart entre $\sin \theta$ et $\tan \theta$ pour une frange brillante à 2.0 cm du maximum central, si la position de l'écran est à 1.00 m de la fente double. Pouvez-vous en conclure que l'angle est assez petit pour utiliser l'approximation des petits angles? Partie I
3. Incluez vos calculs pour obtenir d_{exp} (de la question 1) dans votre rapport. Partie I
4. Donnez l'expression algébrique de l'erreur Δd_{exp} (de la question 1) et incluez-la dans votre rapport. Partie I
5. Comparez votre valeur expérimentale d_{exp} et la valeur théorique d_{th} inscrite sur la roulette. Sont-elles égales, à erreur près? Partie I
6. Tracez le graphique de $\sin \theta$ en fonction de $m\lambda$. Selon l'équation (4), identifiez les quantités qui correspondent à la pente et celles à l'ordonnée à l'origine de ce graphique. Comparez votre valeur des lignes par mm expérimentale à celle citée par le fabricant. Est-ce que ces valeurs sont égales, à erreur près?

Tableau 1: Angles de diffraction en utilisant une lampe à ou au _____

$\phi_0 = ______ \pm 0.1^\circ$

Réseau = _____ lignes/mm

Longueur d'onde	Angle de diffraction		$\sin \theta$	$\Delta(\sin \theta)$
λ	θ°	θ_{rad}	(rad)	(rad)
	± 0.2	$\pm ?$		
(m)	(degrés)	(radians)		

7. Incluez les calculs vous permettant de trouver le pas du réseau, ou le nombre de lignes par mètre. Partie II
8. Comparez votre réponse précédente au nombre théorique de 600 lignes/mm. [Remarque: si le pas d'un réseau (c.-à-d. la distance entre deux fentes successives) vaut d mm, alors il y a $\frac{1}{d}$ lignes/mm.] Partie II
9. Incluez votre graphique, y compris l'équation de la droite. Identifiez et calculez la pente (et l'erreur) et l'ordonnée à l'origine (et l'erreur). Partie II

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.

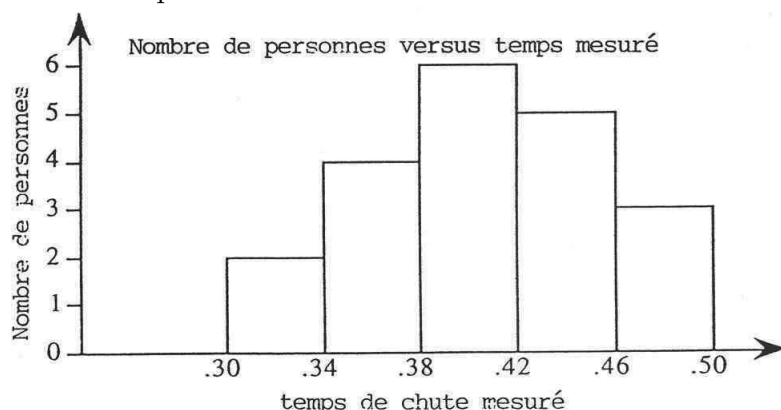
Nous jugeons qu'il y a une erreur totale d'environ 0.5 mm à chaque côté de la table, de sorte qu'au total, l'erreur combinée est d'environ 1 mm. Cet estimé est arbitraire mais raisonnable. On dira donc, par exemple, que "la largeur de la table est de 77.9 ± 0.1 cm."

2.2 Erreur sur une mesure répétée

Nature de l'erreur aléatoire

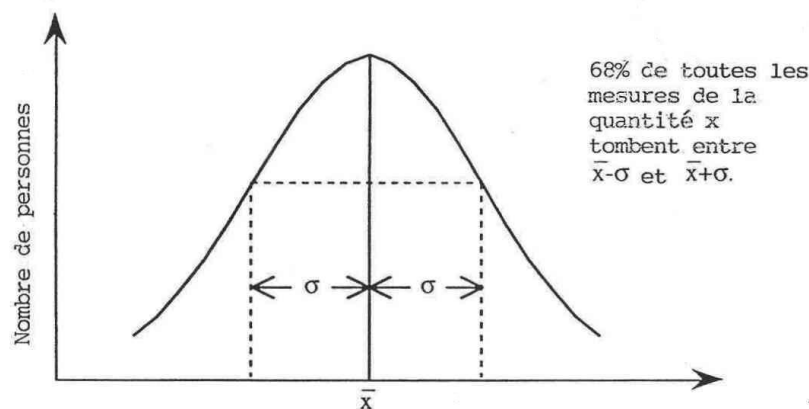
Supposons que l'on veuille mesurer le temps requis par une efface pour tomber du haut d'une table jusqu'au sol. À l'aide d'un chronomètre, nous répétons la mesure trois fois, et obtenons les résultats: 0.36 s, 0.45 s, et 0.32 s. Nous réalisons ensuite qu'il est difficile de déterminer exactement quand 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 $4.057 \text{ m} \pm 1\%$. 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).

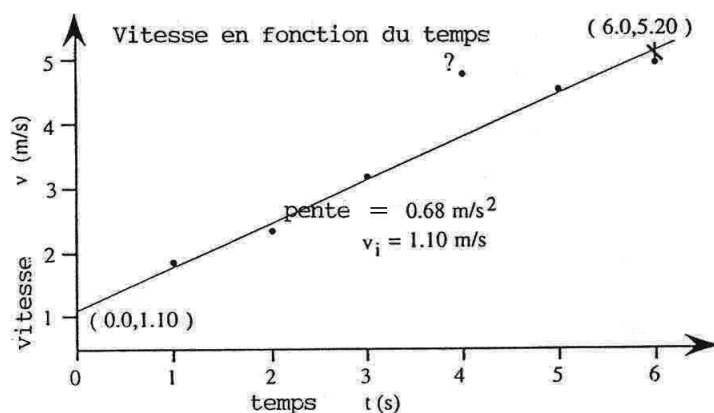
De la même façon, il est préférable d'écrire 0.0036 (deux chiffres significatifs) comme 3.6×10^{-3} , 0.00360 (avec trois chiffres significatifs) comme 3.60×10^{-3} , et 0.003600 (avec quatre chiffres significatifs) comme 3.600×10^{-3} . Quant aux incertitudes, il est préférable d'écrire 0.0036 ± 0.0002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

- a. Donnez à chacun de vos graphiques un titre court qui décrit bien ce qu'il représente.
- b. Graduez les axes clairement, tout en indiquant les unités.
- c. 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*).



- d. 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.
- e. 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:

$$y = mx + b,$$

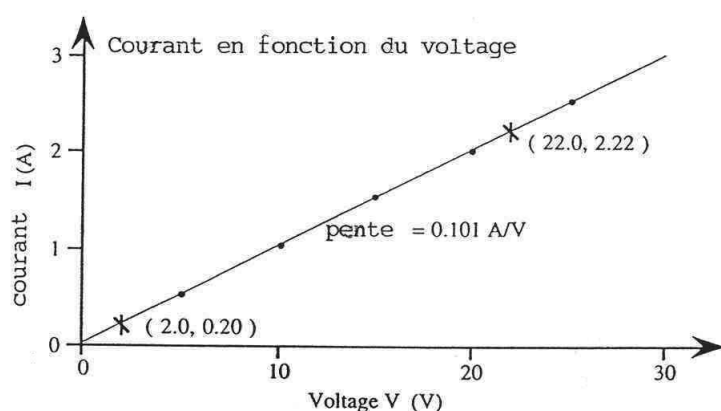
où y représente la variable dépendante (axe vertical), x est la variable indépendante (axe horizontal), m est une constante (la *pente* de la droite), et b est une seconde constante, qui représente l'intersection de la droite avec l'axe des y (*i.e.* l'*ordonnée* à l'origine).

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

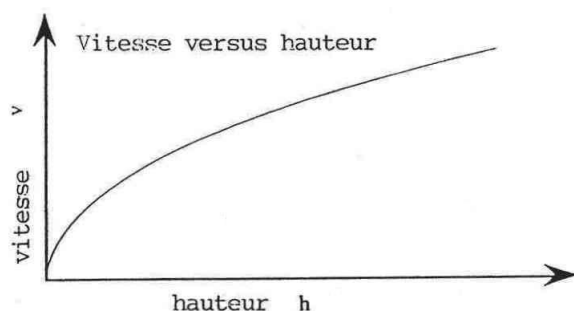
Lorsque le graphique associé à des données expérimentales est une courbe quelconque (non droite), il peut être difficile de trouver une relation fonctionnelle entre les différentes quantités physiques représentées sur le graphique. Cependant, dans certains cas il est possible de *linéariser* un graphique, 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:

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

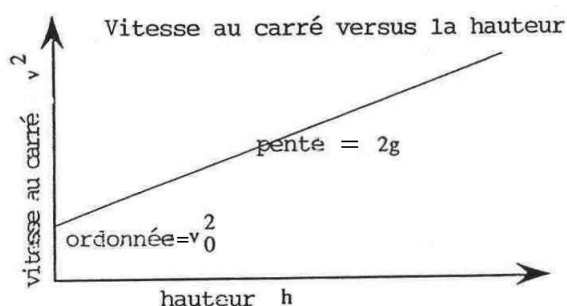
Vu que v est une fonction de h , nous recueillons des données pour v en fonction de différentes valeurs de h . Un graphique de v en fonction de h donnerait le graphique non-linéaire suivant:



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

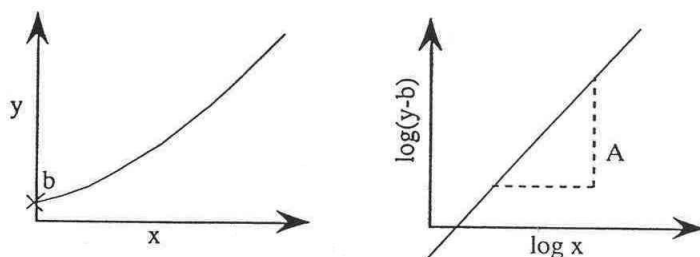
Nous allons illustrer ici un changement de variable qui s'applique aux *relations de puissance*, qui ont la forme

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

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, $\log(m)$.

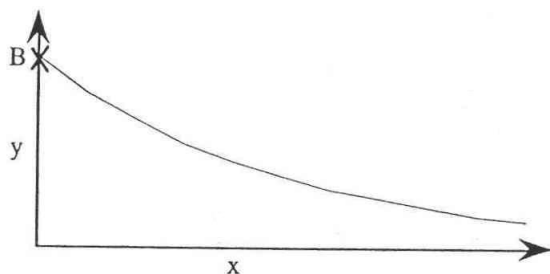


Si le graphique log-log n'est pas encore linéaire, c'est que la relation entre y et x n'est pas une relation de puissance (comme un polynôme, par exemple), et nous devons avoir recours à une autre méthode pour analyser la courbe.

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:

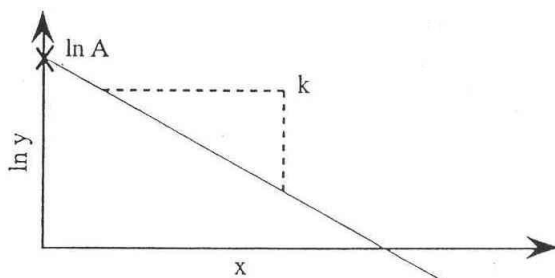
$$y = Ae^{kx}. \quad (2)$$



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 :



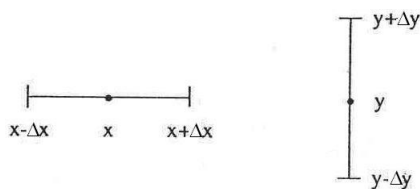
qui nous donne une pente de pente k et d'ordonnée à l'origine $\ln A$.

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

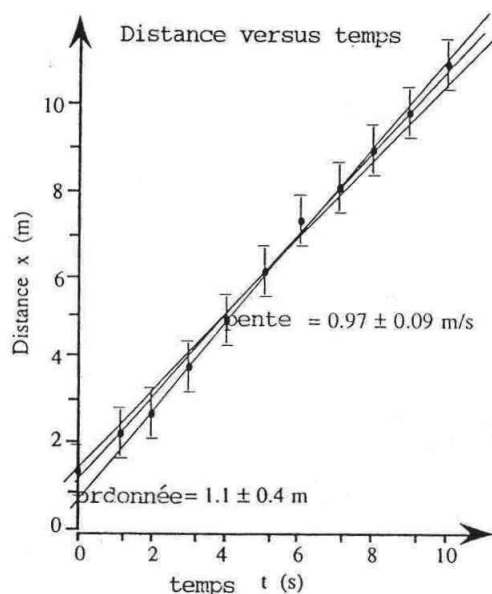
PENTE MOYENNE=0.97 m/s

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.

