

CAHIER DE TRAVAUX PRATIQUES 2023

SUJETS

NB : les éventuelles erreurs présentes dans les énoncés de TP seront publiées sur Moodle, dans une rubrique dédiée; pensez à la consulter régulièrement. **Il ne vous sera donné qu'un et un seul fascicule par personne, vous pouvez le conserver tout au long du semestre, et y consigner de façon concise et soignée vos notes et commentaires personnels relatifs aux séances de travaux pratiques.**

Ce fascicule appartient à

NOM :

PRÉNOM :

GROUPE :

Numéro d'id. :

À PROPOS DES INCERTITUDES

Pourquoi les incertitudes? — Obtenir un résultat expérimental E et le comparer au résultat T d'un modèle théorique n'autorise **aucune conclusion si E n'est pas accompagné d'une évaluation justifiée de l'incertitude-type $u(E)$.**

Exemple : après avoir passé trois semaines à travailler sur la théorie d'un problème d'électrocinétique, la théoricienne Zygomette prédit que la tension aux bornes d'un dipôle est $T = 0V$. L'expérimentateur Bobley Ponge réalise l'expérience et mesure $E = 0,01V$.

Sur cette base, **peut-on dire que les résultats expérimentaux et théoriques sont en accord?** Tenez-vous bien¹ car la réponse est « non en aucune façon! »

On a bien entendu envie de dire que l'écart absolu entre expérience et théorie (ici, $|E - T| = 0,01V$) est « petit ». Mais petit devant quoi? Devant $10V$ ou $1V$, certes. Mais certainement pas devant $1mV$. Et encore moins devant $0!$

La solution consiste-t-elle à raisonner en termes d'écart *relatifs* plutôt qu'absolus? Mais dans cet exemple, l'écart relatif entre expérience et théorie ($|E - T|/T$) est infini!

Qu'il soit exprimé de façon relative ou absolue, l'écart entre un résultat expérimental et un résultat théorique (vulgairement appelé la *gourance*) ne permet pas à lui seul de conclure quoi que ce soit quant à la validité du modèle ni de la mesure.

Mais alors, que faire?— Dans notre exemple, en examinant les conditions expérimentales et les appareils employés, Bobley est en mesure de développer un raisonnement fondé sur des hypothèses (« je suppose que le bruit électronique dans le circuit est de nature gaussienne et a tel écart-type »; « je fais confiance à la documentation fournie par le constructeur qui indique bla bla bla »; « je procède à 100 mesures indépendantes et j'évalue ainsi la variabilité naturelle du résultat »; « j'applique la loi de propagation des incertitudes pour en déduire bla bla bla » etc). Il annonce alors (par exemple) $E = 0,010 \pm 0,020V$, en précisant *quelles hypothèses il a faites* pour aboutir à l'incertitude-type $u(E) = 0,020V$.

Maintenant que les incertitudes de mesures ont été estimées, Zygomette et Bobley peuvent employer un test statistique (par exemple un test en Z) pour quantifier la compatibilité entre leurs approches respectives (modèle théorique d'un côté, expériences + hypothèses d'un autre). Ils sont alors en mesure de conclure *provisoirement* que prédiction théorique et mesures expérimentales sont en accord. La conclusion est *provisoire* car en physique, conclure à la compatibilité entre approches n'est jamais un absolu : d'autres expériences, ultérieures, peuvent mener à des conclusions différentes. L'histoire de la physique est remplie d'exemples de théories d'abord validées par l'expérience, puis remises en question par d'autres expériences. Cependant conclure que « l'expérience n'est pas en accord avec la théorie » n'est pas un échec en soi. Il s'agit d'une occasion d'améliorer le modèle, de mieux en cerner ses limites. C'est une démarche **essentielle** dans le raisonnement physique.

Rigueur mathématique et rigueur physique — La vie est simple dans le monde merveilleux des mathématiques : les choses y sont vraies ou fausses. À la question « *combien font un plus un?* » il n'y a qu'une bonne réponse : deux². En physique, en termes d'incertitudes, **LA** bonne réponse n'existe pas, ou plus exactement elle n'est pas unique : deux personnes peuvent tout

1. « Enfin, tenez-vous mieux » comme aurait dit Pierre Desproges.

2. sauf pour les personnes binaires qui trouvent 0.

à fait valablement proposer deux raisonnements différents qui aboutissent à deux évaluations différentes de l'incertitude. Ainsi, le résultat expérimental ne se réduit pas à la seule valeur numérique $E \pm u(E)$: il est impératif (et presque plus important que la valeur numérique) d'indiquer brièvement quel raisonnement et quelles hypothèses ont conduit à cette estimation.

Citons ici Gaston Bachelard : « (...) de cet objet mal défini, le savant s'approche. Et d'abord il s'apprête à le mesurer. Il discute les conditions de son étude; il détermine la sensibilité et la portée de ses instruments. *Enfin, c'est sa méthode de mesure plutôt que l'objet de sa mesure que le savant décrit.* »³

« **Gaston le Bachelard, c'est bien joli, mais je fais quoi concrètement?** » — Suivez le cours, préparez et faites les TP de Physique Expérimentale 1 ! Pendant vingt séances, vous réaliserez des expériences simples (pas forcément simplistes) pour apprendre à faire une mesure comme un physicien (mesure d'une grandeur, estimation des incertitudes associées, comparaison à l'aide de tests statistiques, tracé d'un graphique expérimental, ajustement linéaire, etc). Au cours du semestre, apprenez à utiliser la feuille de route ci-dessous qui récapitule en, au maximum, cinq étapes une méthode générale qui vous sera utile dans votre vie d'expérimentateur :

- établir la liste des sources d'incertitudes (graduation et appréciation du phénomène) et éliminer en justifiant celles que l'on juge négligeables;
- évaluer, en expliquant le raisonnement suivi, celles qu'on ne juge pas négligeables (à ce stade, vous devrez par exemple être capables de justifier le fameux $\sqrt{3}$, si sa présence est pertinente, donc avoir **lu et compris le document Notes de cours**);
- le cas échéant, appliquer la loi de propagation des incertitudes;
- le cas échéant, utiliser les outils numériques d'ajustement (e.g. `linfitxy`) évaluant une incertitude, à un seuil de confiance déterminé, sur les paramètres d'ajustement;
- le cas échéant, effectuer un test statistique pour comparer deux mesures entre elles ou une mesure à un modèle théorique, puis conclure.

Après ce semestre, vous devrez pouvoir évaluer les incertitudes associées à chaque mesure **en quelques minutes** en justifiant l'estimation **en quelques lignes, pas plus**. Par définition, l'erreur ne peut pas être connue avec certitude. Il ne faut donc pas chercher à l'estimer en étant trop tatillon. En revanche, il ne faut pas se contenter d'évaluations au doigt mouillé. Le juste milieu est de préciser simplement, de façon concise, les hypothèses faites et l'enchaînement logique permettant d'obtenir une évaluation de l'incertitude. Dans la grande majorité des cas, le raisonnement sera du type : « *j'estime que la valeur vraie X est nécessairement comprise entre X_1 et X_2 , je suppose que la répartition est uniforme sur cet intervalle, et j'applique la loi de propagation des incertitudes pour obtenir $u(X) = \dots$ » ". **Lors de l'examen de TP, vous aurez certainement à évaluer des incertitudes et à justifier votre raisonnement.***

Au-delà de l'objectif (louable, mais à court terme) de réussir l'examen de TP, retenez bien pour toute la suite de vos études comme pour votre vie future de citoyen confronté à des questions scientifiques (énergie, gestion des ressources, réchauffement climatique, politique de santé publique, sondages, etc) que **maîtriser les incertitudes dans la présentation d'un résultat expérimental est essentiel à la démarche scientifique.**

3. Gaston Bachelard, *La formation de l'esprit scientifique*.

TRAVAUX PRATIQUES 1

MESURE DE DISTANCES, SURFACES, VOLUMES

PROPAGATION DES INCERTITUDES

INCERTITUDES DE TYPE B

Objectifs de la séance

- Étudier un cas où l'incertitude est de type B
- Comprendre qu'il peut y avoir plusieurs sources d'incertitude lors d'un mesurage et que l'une d'elles peut dominer les autres.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 8 inclus doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP1* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

1.1. — Préparation : propagation des incertitudes

Question 1

On considère un parallélépipède rectangle (c'est-à-dire un pavé droit) de longueur L et de largeur ℓ . Donner l'expression de l'aire A en fonction de L et ℓ .

Question 2

On effectue un mesurage de la longueur $L = L_0 \pm u(L)$ et un de la largeur $\ell = \ell_0 \pm u(\ell)$. Donner en justifiant l'expression de l'incertitude-type $u(A)$ sur le calcul de l'aire A .

Question 3

On mesure l'épaisseur du pavé et on trouve $e = e_0 \pm u(e)$. Donner en justifiant l'expression du volume V et de l'incertitude-type $u(V)$ associée.

Question 4

Soient deux grandeurs A et e dont on réalise un mesurage : $A_0 \pm u(A)$ et $e_0 \pm u(e)$. On appelle β le nombre réel positif tel que $u(A)/A_0 = \beta u(e)/e_0$. On calcule alors une grandeur $V = Ae$. Quelle est la condition sur β pour que l'incertitude relative sur e contribue à moins de 50% de l'incertitude relative sur V : $\left| \frac{u(e)}{e} \right| \leq 0,50 \left| \frac{u(V)}{V} \right|$?

1.2. — Expériences

1.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent

- une pièce en bois ;
- une feuille avec des carreaux de 3 cm de côté ;
- une règle en plastique ;
- un réglet métallique.

1.2.2. — Mesurage d'une distance

Question 5

Mesurer la longueur L de la pièce en bois à l'aide de chaque instrument de mesure. Justifier à chaque fois la valeur la plus probable L_0 et l'incertitude-type $u(L)$ associée.

Question 6

Dire en justifiant quel est l'instrument de mesure le plus adapté au mesurage de L dans ce TP. Pour répondre à cette question, il faut bien entendu utiliser les mesures faites à la question précédente. Il sera également utile de comparer les règles en plastique et les réglets métalliques de plusieurs paillasses.

1.2.3. — Mesurage d'une aire

Question 7

On appelle ℓ la largeur de la pièce en bois. À l'aide de l'instrument approprié, mesurer ℓ et donner la valeur la plus probable ℓ_0 et l'incertitude-type $u(\ell)$.

Question 8

Estimer l'aire A de la pièce de bois et l'incertitude-type $u(A)$ associée à partir des mesures de L et ℓ .

1.2.4. — Mesurage d'un volume**Question 9**

Mesurer l'épaisseur e de la pièce de bois. En déduire le volume V de la pièce et donner sa valeur la plus probable V_0 et l'incertitude-type $u(V)$.

1.2.5. — Source dominante d'incertitude**Question 10**

Estimer l'incertitude relative $u(X)/X_0$ pour chaque grandeur L , ℓ , e , A , V et remplir le tableau de mesures. Commenter les valeurs des incertitudes relatives.

Question 11

En reprenant le formalisme de la question 4, que vaut β d'après vos mesures? Est-ce que l'incertitude relative sur e contribue à moins de 50% de l'incertitude relative sur le volume V ?

TRAVAUX PRATIQUES 2

MESURE D'UNE DURÉE

INCERTITUDES DE TYPE A

MOYENNE, ÉCART-TYPE

HISTOGRAMME

(PREMIÈRE PARTIE)

Objectifs de la séance

- Étudier un cas où l'incertitude est de type A
- Tracer l'histogramme d'un ensemble de mesures
- Calculer la moyenne et l'écart-type d'un ensemble de mesures
- Mesurer une durée à l'aide d'un chronomètre

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 8 inclus doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP2* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

2.1. — Préparation

Dans ce TP, on cherche à mesurer une durée en utilisant un chronométrage manuel. On dispose d'une page web (https://lesia.obspm.fr/perso/raphael-galicher/images/LED_Virtuelle.html) sur laquelle un disque passe du rouge au vert simulant l'allumage et l'extinction d'une diode électroluminescente (DEL). La durée durant laquelle le disque est rouge (DEL éteinte) est variable. La durée durant laquelle le disque est vert (DEL allumée) est toujours la même; on la note t_{vraie} . C'est cette durée que l'on cherche à mesurer.

1. Au départ, la DEL est éteinte (rouge).
2. Une durée variable (entre 3 et 6 secondes) s'écoule avant que la DEL s'allume (verte).
3. La DEL reste allumée t_{vraie} (toujours la même et environ 3 s).
4. La DEL s'éteint et le cycle recommence.

À tout moment, il est possible de déclencher un chronomètre en cliquant sur le disque (vert ou rouge)⁴. On arrête le chronomètre en cliquant de nouveau sur le disque. S'affiche alors dans la zone de texte un vecteur avec plusieurs informations dont le numéro i de la mesure et la valeur de la durée t_i mesurée. Pour mesurer la durée d'allumage de la DEL, on cherchera donc à déclencher le chronomètre dès que la DEL s'allume (passe au vert) et à l'arrêter dès que la DEL s'éteint (passe au rouge).

Dans ce TP, on veut estimer l'incertitude-type $u(t)$ associée à un mesurage unique de la durée t_{vraie} . La seule façon de faire est de réaliser plusieurs mesurages t_i et d'étudier les caractéristiques statistiques de l'ensemble des mesurages.

Rappels du cours et précisions sur les notations (voir paragraphes 6 et 7 des notes de cours)

- On note t_i la valeur du i ème mesurage de la durée d'allumage de la DEL virtuelle;
- on peut modéliser un processus de mesurage par une variable aléatoire T . Cela signifie que chaque t_i est une réalisation de la variable aléatoire T ;
- on note $\{t_i\}$ l'ensemble des mesurages;
- on ne connaît pas *a priori* la loi de probabilité qui décrit la variable aléatoire T , elle dépend entre autres de l'expérimentateur;
- on résume l'ensemble des mesures (et donc la loi de probabilité) par :
 - + son espérance mathématique $\mathbb{E}[T]$, estimée par la moyenne \bar{t} de l'ensemble $\{t_i\}$ des mesurages effectués; si la mesure est non-biaisée, $\mathbb{E}[T]$ égale t_{vraie} ,
 - + son écart-type σ_T , estimé par l'écart-type expérimental s_{exp} de l'ensemble $\{t_i\}$ des mesurages effectués.
- l'écart-type σ_T indique de combien, en moyenne, une réalisation t_i de la variable aléatoire T est éloignée de son espérance $\mathbb{E}[T]$.

Question 1

À partir d'un mesurage unique t , quelle estimée de $\mathbb{E}[T]$ peut-on faire (on suppose une mesure juste, c'est-à-dire non biaisée)? Même question pour l'estimation de l'écart-type σ_T de la variable aléatoire T .

4. ou en appuyant sur la barre d'espace lorsque le disque est actif

Question 2

À partir des N mesurages uniques indépendants t_i , quelle estimée de $E[T]$ peut-on faire (on suppose une mesure juste)? Même question pour l'estimation de l'écart-type σ_T de la variable aléatoire T . En déduire une estimée de l'incertitude-type $u(t_i)$ sur un mesurage unique t_i .

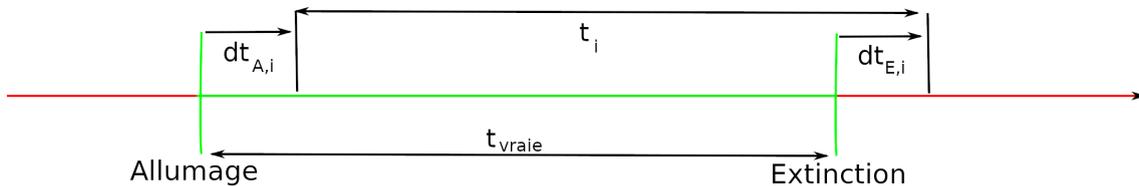
Question 3

La page web donne accès à des grandeurs auxquelles on n'a généralement pas accès lorsque l'on fait une mesure. Tout est inclus dans le vecteur qui s'affiche et dont voici la description :

- 1ère colonne : numéro i de la mesure;
- 2ème colonne : mesure de la durée t_i ;
- 3ème colonne : intervalle de temps $dt_{A,i}$ entre l'allumage de la DEL (verte) et le déclenchement du chronométrage;
- 4ème colonne : intervalle de temps $dt_{E,i}$ entre l'extinction de la DEL (rouge) et arrêt du chronométrage.

Les deux dernières colonnes donnent donc les temps de réaction de l'expérimentateur à l'allumage et à l'extinction. Une valeur négative signifie que vous avez cliqué avant que la DEL ne change de couleur.

Les différents temps sont représentés dans le graphe ci-dessous. La flèche horizontale rouge et verte correspond au temps qui passe et aux phases d'allumage de la DEL.



Exprimer l'écart $t_i - t_{vraie}$ entre la mesure t_i et la valeur t_{vraie} en fonction de $dt_{A,i}$ et $dt_{E,i}$. Cette grandeur représente l'erreur u_{reac} due au temps de réaction de l'expérimentateur.

Dans le processus de mesurage tel qu'il est pratiqué les sources d'incertitudes sont multiples, en voici une liste sans doute non-exhaustive.

- l'appareil servant à mesurer l'intervalle de temps (u_{app})
- variation du temps de réaction de l'opérateur (u_{reac})
- variation de la durée effective d'allumage de la DEL virtuelle (u_{var})

Question 4

Donner un ordre de grandeur de u_{app} , u_{reac} et u_{var} en justifiant.

2.2. — Expérience : mesurage d'une durée

2.2.1. — Matériel

Aucun matériel n'est nécessaire pour cette séance, vous avez simplement besoin d'un ordinateur pour accéder à JupyterHub : <https://jupy.physique.univ-paris-diderot.fr>

L'expérience se déroule en utilisant une DEL virtuelle depuis une page web accessible à cette adresse : https://lesia.obspm.fr/perso/raphael-galicher/images/LED_Virtuelle.

html. La description de l'allumage et de l'extinction est donnée au début de la partie de préparation de ce TP. L'objectif est de mesurer t_{vraie} .

2.2.2. — Philosophie de la séance

Vous allez réaliser un très grand nombre N de mesurages $\{t_i\}_{1 \leq i \leq N}$ d'allumage de la DEL virtuelle. À partir de l'étude statistique de cet ensemble de N mesurages (histogramme en densité de fréquence, calculs de la moyenne et de l'écart-type), vous estimerez les grandeurs qui caractérisent le processus de mesurage décrit dans la préparation (mesurage unique).

2.2.3. — Mesurages

Question 5

Réaliser $N = 100$ mesurages t_i du temps d'allumage t_{vraie} et créer sous Jupyter un vecteur DATA qui contient les données copiées depuis la page web, puis en extraire la deuxième colonne qui représente les durées t_i exprimées en secondes. Créer un vecteur T avec les t_i .

Attention : répéter 100 fois la même opération peut paraître bête, à la portée de tous et on se dit qu'on n'a pas besoin de trop réfléchir. C'est vrai : inutile de réfléchir. En revanche, il faut rester concentré pour que tous les mesurages soient réalisés de la même manière (même personne, même concentration pour que le temps de réaction ne varie pas trop). Il s'agit de la première qualité d'un bon expérimentateur : mesurer plusieurs fois une grandeur avec la même méthode. Pour cela, il peut-être utile de s'entraîner avant de commencer réellement les mesures. Il peut aussi être judicieux de faire des séries de 10 mesures (par exemple), de faire une petite pause et puis de recommencer.

2.2.4. — Interprétation : histogramme, moyenne et écart-type

La deuxième qualité d'un bon expérimentateur tient dans l'interprétation des mesures qui se fait en plusieurs étapes.

2.2.4.1. — Examiner les données

Avant de traiter les données, il convient de les examiner. Quand on fait une mesure et surtout quand on reporte la valeur mesurée, nous sommes tous susceptibles de nous tromper, et de noter une donnée qu'on qualifie d'aberrante⁵.

La définition d'une donnée ou valeur aberrante est délicate car elle est en partie subjective. Disons qu'il s'agit d'éliminer les données qui sont très éloignées des autres données de la même expérience. Ces données aberrantes *doivent* résulter d'une *faute*⁶ de l'expérimentateur. Par exemple, une valeur aberrante peut être due à un manque d'attention à un moment donné ou au contraire à une trop forte crispation ou encore à une faute de frappe (29 au lieu de 2,9).

Pour créer un vecteur T_f sans valeur aberrante à partir du vecteur T :

1. Afficher l'histogramme des valeurs de T.
2. S'il y a des valeurs aberrantes
 - Noter quelles sont ces valeurs et **justifier obligatoirement pourquoi elles sont éliminées. Sans cette justification, on parle de fraude scientifique!**

5. Ce n'est pas parce que tout le monde peut se tromper qu'il faut se tromper. Une mesure aberrante toutes les cent mesures est un minimum qu'on peut demander à un bon expérimentateur!

6. Il ne s'agit pas de *faute* morale ici. Le mot exact français devrait être *erreur* mais ce mot a une autre signification en physique et on s'abstient de l'utiliser.

- Conserver uniquement les valeurs qui ne sont pas aberrantes. Pour cela, il faut savoir où se trouvent les valeurs en question dans le vecteur T. On peut utiliser des fonctions du package numpy :
 - + `where` : retourne l'indice (la position dans le vecteur T) des valeurs qui vérifient une condition fixée par l'utilisateur ;
 - + `delete` : retire certaines valeurs d'un vecteur.

Question 6

Afficher l'histogramme des valeurs de T.

Question 7

Créer le vecteur T_f sans valeur aberrante à partir du vecteur T.

2.2.4.2. — Première analyse des données : statistiques sur l'ensemble des mesures

Question 8

Représenter l'histogramme de densité de fréquence des mesures T_f .

Question 9

Estimer graphiquement et *à la louche* la valeur de la moyenne t_ℓ et de l'écart-type s_ℓ qu'on peut raisonnablement associer à cette série de mesure.

Question 10

Calculer la moyenne arithmétique moy_t et l'écart-type expérimental s_t des valeurs mesurées. Est-ce que vos estimations à la louche étaient correctes ?

Question 11

Supposons maintenant que l'expérimentateur veut mesurer une nouvelle durée avec le même dispositif en faisant un mesurage unique. Il obtient la valeur t_g . D'après ce qui précède, exprimer l'incertitude-type $u(t_g)$ associée à ce mesurage en fonction de moy_t et s_t .

2.2.4.3. — Origine des incertitudes

Question 12

Utiliser la question 3 pour créer le vecteur $uREAC$ qui rassemble les valeurs de u_{reac} . Penser à éliminer les lignes qui correspondent aux valeurs aberrantes trouvées à la question 7.

Question 13

Afficher l'histogramme de densité de fréquence pour $uREAC$ et estimer la contribution moyenne u_{reac} du temps de réaction et l'incertitude-type associée $u(u_{reac})$.

Question 14

Comparer la valeur moyenne de u_{reac} et l'incertitude-type $u(t_i)$ associée à un mesurage unique t_i . Commenter.

TRAVAUX PRATIQUES 3

MESURE D'UNE DURÉE

INCERTITUDES DE TYPE A

MOYENNE, ÉCART-TYPE

HISTOGRAMME

(DEUXIÈME PARTIE)

Objectifs de la séance

- Étudier un cas où l'incertitude est de type A
- Tracer l'histogramme d'un ensemble de mesures
- Calculer la moyenne et l'écart-type d'un ensemble de mesures
- Comprendre l'intérêt de moyenniser plusieurs mesures
- Mesurer au mieux une durée bien définie à l'aide d'un chronomètre

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé, l'énoncé du TP2 et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 8 inclus doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP3* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

3.1. — Préparation

Ce TP est la suite du TP2 qu'il est conseillé de relire avant de continuer.

Comme dans le TP précédent, on estime la durée t_{vraie} d'allumage de la diode mais on utilise une procédure différente. Dans ce TP, un mesurage $t^{(K)}$ est obtenu en calculant la moyenne de K mesurages uniques. Si on applique N fois cette procédure, on obtient N valeurs notées $t_j^{(K)}$ avec j le numéro du mesurage (et chaque $t_j^{(K)}$ est obtenu à partir de K mesurages uniques).

La procédure de mesurage est modélisée par une variable aléatoire qu'on note $T^{(K)}$. Par exemple, la valeur du premier mesurage par cette nouvelle procédure est donnée par :

$$t_1^{(K)} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K t_i$$

Cette grandeur $t_1^{(K)}$ est une réalisation de la variable aléatoire $T^{(K)}$.

Dans le TP2 nous avons étudié le cas particulier $K = 1$ du mesurage unique.

Question 1

Pour un mesurage unique t , rappeler l'expression de $u(t)$ en fonction des propriétés statistiques⁷ de la variable aléatoire⁸ T . Rappeler la valeur estimée lors du TP2 pour $u(t)$.

Question 2

Pour un mesurage de $t^{(K)}$, donner les expressions de l'espérance mathématique $E[T^{(K)}]$ et de son écart-type $\sigma_{T^{(K)}}$ en fonction des propriétés statistiques de la variable aléatoire T ($E[T]$ et σ_T). En déduire l'expression de l'incertitude-type associée $u(t^{(K)})$.

3.2. — Expérience : mesurage d'une durée

3.2.1. — Philosophie de la séance

Au TP2, vous avez réalisé un grand nombre $N = 100$ de mesurages t_i du temps d'allumage de la DEL virtuelle. À partir de l'étude statistique de l'ensemble des N mesurages $\{t_i\}$ (histogramme, calculs de la moyenne et de l'écart-type), vous avez estimé la valeur la plus probable de la durée d'allumage t_{vraie} et l'incertitude-type associée avec la procédure « mesurage unique ».

Dans ce TP, on cherche à estimer la valeur la plus probable de t_{vraie} et l'incertitude-type associée avec la procédure « moyenne de K mesurages uniques ». Pour cela, on pourrait :

1. Répéter $N = 100$ fois « je moyenne K mesurages uniques » en répétant N fois ($j = 1$ à N) :
 - réaliser K mesurages uniques ;
 - calculer la moyenne de ces mesurages, notée $t_j^{(K)}$ (voir la formule ci-dessus)
2. Étudier la loi statistique de l'ensemble des $t_j^{(K)}$ pour en déduire la valeur la plus probable et l'incertitude-type associée $u(t^{(K)})$.

7. espérance mathématique $E[T]$ et écart-type σ_T .

8. Pour être cohérent avec la notation précédente on peut aussi la noter $T^{(1)}$.

Ce serait la manière la plus rigoureuse de faire ce TP. Cependant, cela demanderait beaucoup de temps car il faudrait faire les $N_1 = N \times K = 6400$ mesurages uniques de l'étape 1 (pour $K = 64$).

Pour étudier la procédure « moyenne de K mesurages uniques » dans le temps d'une séance, on remarque que les N_1 mesurages uniques doivent suivre la loi statistique que vous avez caractérisée au TP2. On va donc utiliser python pour simuler ces N_1 mesurages uniques. Le résultat sera similaire à ce que vous obtiendriez si vous faisiez réellement les N_1 mesures *à la main*. Pour cette simulation numérique, on suit la procédure :

1. Réaliser un grand nombre N_1 de mesurages uniques (exemple : $N_1 = 6400$).
2. Regrouper ces mesurages par paquets de K comme si on appliquait plusieurs fois la procédure « je réalise K mesurages uniques ».
3. Calculer la moyenne de chaque paquet pour obtenir les mesurages $t_j^{(K)}$.
4. Étudier la loi statistique de l'ensemble des $t_j^{(K)}$ pour en déduire la valeur la plus probable de t_{vraie} et l'incertitude-type associée $u(t^{(K)})$.

3.2.2. — Fabrication du jeu de données

Question 3

Dans un vecteur Tf, reprendre les valeurs que vous avez mesurées au TP2 (ce sont les grandeurs sans valeurs aberrantes qu'il faut reprendre).

Question 4

On suppose normale (c'est-à-dire gaussienne) la variable aléatoire T (mesurage unique). Elle est alors entièrement déterminée par son espérance $\mathbb{E}[T]$ et son écart-type σ_T .

Dans un vecteur T, construire un échantillon de N_1 valeurs distribuées suivant une loi normale ayant une espérance $\mathbb{E}[T]$ et un écart-type σ_T avec les valeurs estimées au TP2. On pourra utiliser la fonction `numpy.random.normal(E, s, N1)` qui crée un vecteur de N1 valeurs qui suivent une distribution normale de moyenne E et d'écart-type s.

Question 5

Comparer graphiquement les histogrammes de densité de fréquence de Tf et T et commenter.

3.2.3. — Analyse des données : impact du nombre K de mesures moyennées

Voici la procédure pour simuler 100 mesurages de la procédure « on moyenne K mesurages uniques indépendants » et les estimées de la durée d'allumage t_{vraie} et de l'incertitude-type associée $u(t^{(K)})$.

1. Simuler 100 mesurages de la procédure « on moyenne K mesurages indépendants »⁹.
 - (a) Créer un vecteur XK qui contient les $100 \times K$ premiers mesurages uniques de T.
 - (b) Changer la forme de ce vecteur pour qu'il comporte 100 lignes de K valeurs (ainsi chaque ligne représente une séquence de K mesurages uniques).
La fonction `reshape` de numpy sera utile.
 - (c) Calculer dans un nouveau vecteur TK la moyenne de chaque ligne du vecteur.
La fonction `mean` de numpy avec l'option `axis` sera utile.

9. Si vous êtes à l'aise en python, vous pouvez définir une fonction qui prend comme paramètre K et qui renvoie une liste contenant la moyenne et l'écart-type des $\{t^{(K)}\}_{1 \leq j \leq N}$.

Le résultat est un vecteur $TK = \{t_j^{(K)}\}_{1 \leq j \leq 100}$ de 100 valeurs qui simulent 100 mesurages par le processus « on moyenne K mesurages indépendants ». Ainsi, chaque valeur du vecteur TK est une réalisation $t_j^{(K)}$ de la variable aléatoire $T^{(K)}$.

2. Tracer l'histogramme en densité de fréquence des 100 valeurs de TK . Le superposer aux histogrammes obtenus pour les autres valeurs de K (voir la question suivante) et à l'histogramme des mesurages uniques $T^{(1)}$ de la question 5.
3. Calculer la moyenne arithmétique m_TK et l'écart-type expérimental s_TK du vecteur TK .
4. En déduire les estimées de t_{vraie} et $u(t^{(K)})$.

Question 6

Mettre en place la procédure ci-dessus pour $K = 4$ et recommencer successivement pour $K = 16$ et $K = 64$.

Question 7

Les résultats sont-ils en accord avec les prédictions théoriques de la question 2?

Question 8

Combien de mesurages indépendants faudrait-il moyenner pour mesurer t_{vraie} avec une incertitude-type de 1 ms?

TRAVAUX DIRIGÉS 4

CONVERSION D'UNITÉS, NORMES D'ÉCRITURE

Objectifs de la séance

- S'entraîner à convertir des grandeurs d'une unité à une autre
- Suivre les normes d'écriture pour donner le résultat d'un mesurage ou d'un calcul faisant intervenir des incertitudes

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2020* jusqu'au paragraphe 9 inclus doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Cette séance ne fait pas l'objet d'un compte-rendu.

Interrogation de TP

Cette séance de TD vous sera très utile pendant les séances de TP à venir et également au moment de l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 20 avril 2020.

4.1. — Écriture normalisée

Écrire la version normalisée de chacune des mesures suivantes :

1. Zygomar mesure la longueur ℓ de la queue de son chat avec un télémètre. L'appareil affiche $\ell = 23,07$ cm. Comme le chat bouge pendant la mesure, Zygomar estime que l'incertitude $u(\ell)$ vaut 5 mm.
2. Static Shock mesure avec un voltmètre une tension $U = 126$ V entre son index droit et son gros orteil gauche. Sur la documentation du voltmètre, il lit 0,3 % de précision de mesure.
3. Corneil utilise sa balance électronique dont la précision est 1 g et il estime que Bernie pèse 73 kg.
4. Martin Mystère a besoin d'une batterie de 498 GW $\pm 7\%$ pour faire fonctionner sa montre.
5. Il y a trente cinq centimètres de fil de fer dans la bouche de Charlotte Spitz à trois millimètres près.
6. La toupie de Tyson fait 312,5 tours par seconde autour de son axe à 21 tours près.
7. Dora veut mesurer l'angle formé par deux droites. Elle sort de son sac : une banane, un rapporteur, un taxi (avec chauffeur), une batte de baseball. Après avoir trouvé quel objet utiliser, elle mesure $72,1667^\circ \pm 0,1^\circ$.
8. Le ballon frappé par Olivier Atton se déplace à 280 km/h à 0,2 km/h près.
9. Votre encadrant de TD mesure 1,7 m à 50 cm près.

4.2. — Conversion : changement d'unités

1. La distance entre la Terre et le Soleil est 150 millions de kilomètres. La distance entre Jupiter et le Soleil est cinq fois plus grande. Quelle est la distance Soleil-Jupiter en unité de base du système international? Et en unité astronomique UA (1 UA est égale à la distance Soleil-Terre)?
2. Bobley Ponge¹⁰ estime qu'une piscine contient 1 350 000 L d'eau à 180 L près. Quel est le volume d'eau en m³? Donner l'incertitude dans la même unité.
3. Quarante-trois stères de bois sont nécessaires pour chauffer une maison de 100 m² dans le département 45. Donner le volume de bois en m³, en dm³, en km³ et en L.
4. Il est déconseillé de boire plus de 0,8 L de thé par jour¹¹. Écrire cette quantité en unité de base du système international.
5. Une baleine bleue pèse $17,7 \cdot 10^1$ tonnes et occupe un volume de $180 \cdot 10^9$ mm³. Quelle est sa masse volumique?
6. La roue d'une moto tourne à 1600 tr/min. Quelle est la vitesse en radian par seconde?

10. Celui-ci fait très attention de ne pas tomber dans l'eau.

11. Cette assertion est vraie surtout pour les personnes anémiées.

7. Faire un footing de 30 min permet de dépenser entre 200 et 300 kilocalories. Combien de joules élimine-t-on en une heure? Que vaut cette quantité dans les unités de base du système international?
Aide : Une calorie est l'énergie nécessaire pour élever la température d'un gramme d'eau liquide de $14,5^{\circ}\text{C}$ à $15,5^{\circ}\text{C}$. Elle vaut environ $4,2\text{J}$ ¹².
8. Un fakir hésite entre deux lits. Le premier possède 112 clous par dm^2 . Le second en possède 2,2 par cm^2 . Quel lit a la plus grande densité de clous?
9. L'escargot le plus rapide au monde, Usnale Bolt, a atteint une vitesse de 99 m/h en 2006. Donner cette vitesse en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, puis en $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.
10. Les 70 kg de Zygomar sont uniformément répartis sur les 250 cm^2 du sol occupés par ses pieds. Quelle est la pression exercée par Zygomar sur le sol?¹³
11. L'eau est composée de molécules de diamètre 0,343 nm. Sa masse volumique est $1,000 \pm 0,0051\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Sa masse molaire est $18,0153 \pm 0,00040\text{ g/mol}$. Sa température d'ébullition est 100°C . Écrire toutes ces grandeurs dans les unités de base du système international.
12. L'envoi d'un email de 1 Mo provoquerait l'émission de 15 g de CO_2 (à cause de l'énergie consommée) et l'utilisation de 7,5 g de fer (fabrication et entretien du matériel). Zygomar a émis $175 \pm 0,50\text{ g}$ de CO_2 depuis le début du TD. Combien de Mo a-t-il envoyés? À quelle quantité de fer cela correspond-il?
Une nouvelle agence estime plutôt une émission de 50 g de CO_2 par email de 2 Mo. Combien de Mo a envoyés Zygomar?
13. L'étoile Proxima du Centaure se trouve à $4,2430 \pm 0,0020$ année-lumière. Sa masse vaut $0,1230 \pm 0,0060$ fois celle du Soleil et son rayon est $0,1410 \pm 0,0070$ fois celui du Soleil. La masse et le rayon du Soleil sont $2,0\cdot 10^{30}\text{ kg}$ et 696 mille kilomètres. Écrire toutes ces grandeurs dans les unités de base du système international.

12. Moyen mnémotechnique pour les fans de *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*: souvenez-vous que la réponse à la grande question sur la vie, l'univers et le reste (*The ultimate question of life, the Universe and everything*) est 42. ;)

13. Moyen Mnémotechnique : Au paradis des physiciens s'engage un jeu de cache-cache. Einstein ferme les yeux et compte : « Ein. Zwei. Drei.. » Tous les autres courent se cacher sauf Newton qui prend une craie et dessine au sol un carré de 1 m de côté. Il se place dans le carré et attend. Einstein, qui a fini de compter, ouvre les yeux et dit : « Non mais Newton, tu es vraiment nul. Tu as perdu. » Newton répond : « Je n'ai pas perdu car Newton par m^2 , c'est Pascal! »

TRAVAUX PRATIQUES 5

MESURE INDIRECTE D'UN VOLUME ET D'UNE MASSE VOLUMIQUE

TEST EN Z

Objectifs de la séance

- Étudier un cas où l'incertitude est de type B
- Comprendre le principe d'une mesure indirecte, c'est-à-dire de la mesure d'observables pour en déduire une grandeur non mesurable a priori.
- Convertir un volume de mL en m^3 .
- Calculer une masse volumique à partir d'une masse et d'un volume.
- Faire la différence entre masse volumique et densité.
- Appliquer la formule du test en Z.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 8 inclus ainsi que le paragraphe 12 doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP5* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

5.1. — Un peu d'histoire

Ce TP est une version de l'expérience que fit Archimède il y a environ 2300 ans.

Le roi de Syracuse, Hiéron II, commande une couronne en or à un artisan. Une fois la couronne livrée, il a un doute sur l'artisan et craint qu'une partie du métal ne soit pas de l'or mais de l'argent. Hiéron II demande alors à Archimède de vérifier si la couronne est en or pure. Bien entendu, Archimède n'a pas le droit de détruire la couronne.

Archimède sait que l'or et l'argent n'ont pas la même masse volumique. Pour mesurer la masse volumique de la couronne, Archimède commence par mesurer sa masse. Il reste alors à mesurer le volume de la couronne. Comme la forme de l'objet est complexe, Archimède ne peut pas utiliser une formule simple comme on le ferait pour calculer le volume d'un cylindre ou d'un pavé. Il a alors une idée que vous allez mettre en œuvre pendant ce TP : mesurer deux grandeurs pour déduire la mesure d'une troisième grandeur.

5.2. — Préparation : définition du protocole expérimental

Question 1

On mesure un volume $V = 123 \text{ mL}$. Que vaut ce volume en m^3 ? De manière générale, si un volume vaut $V_2 = x \text{ mL}$, que vaut-il en m^3 ?

Question 2

Quelle est la différence entre la masse volumique et la densité d'un objet?

Question 3

Un objet a une masse $m = m_0 \pm u(m)$ et un volume $V = V_0 \pm u(V)$. Donner l'expression de la masse volumique $\rho_0 \pm u(\rho)$ de cet objet.

Question 4

Étant donné le matériel à disposition (voir ci-dessous), proposer un protocole expérimental pour mesurer le volume d'un objet en métal et en déduire sa masse volumique.

On rappelle qu'un protocole expérimental doit

- décrire le montage expérimental (quels composants utiliser, faire un schéma) ;
- décrire la procédure à suivre pour préparer la mesure si besoin (quels réglages doivent être vérifiés et comment les vérifier) ;
- expliquer quelles grandeurs sont à mesurer (les observables) et comment on les mesure (avec quels instruments).

5.3. — Expériences

5.3.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent

- une éprouvette de 500 mL graduée tous les 5 mL ;
- un cylindre en métal dont la masse est connue avec une incertitude-type de 0,10 g ;
- de l'eau.

5.3.2. — Mesure indirecte d'un volume

Question 5

Suivre le protocole proposé dans la préparation pour obtenir une estimée du volume V du cylindre en métal. Reporter dans le compte rendu $V_0 \pm u(V)$ et toutes les mesures et incertitudes-types intermédiaires. Justifier à chaque fois la valeur de l'incertitude-type (type A ou type B, loi de propagation, etc).

5.3.3. — Calcul d'une masse volumique

Question 6

Utiliser la question 3 pour estimer la masse volumique $\rho_0 \pm u(\rho)$.

5.4. — Interprétation et comparaison à des valeurs tabulées

5.4.1. — Conversion de densité en masses volumiques

La table ci-dessous donne les densités de plusieurs alliages utilisés dans l'industrie.

Alliage d'aluminium	2017A	2024	2030	5083	5754	6060	6082	7075
Densité	2,79	2,77	2,82	2,66	2,67	2,70	2,71	2,80

Question 7

Transformer les densités tabulées en masses volumiques.

5.4.2. — Test en Z

On pourrait se contenter de dire que toutes les valeurs de la table sont du même ordre de grandeur que la valeur mesurée pour le cylindre du TP¹⁴. En faisant cela, on oublie une part importante du travail effectué : l'évaluation des incertitudes!

Pour comparer une valeur connue ρ_α (théorique ou tabulée) à une mesure $\rho \pm u(\rho)$, on peut utiliser un test statistique appelé le test en Z. On fait l'hypothèse nulle H_0 selon laquelle *l'échantillon du TP est constitué de l'alliage de masse volumique ρ_α* et on suppose que la valeur mesurée est une réalisation d'une distribution normale centrée sur ρ_α et d'écart-type $u(\rho)$. L'hypothèse H_1 est l'hypothèse alternative selon laquelle *l'échantillon est constitué d'un alliage différent de celui de masse volumique ρ_α* .

Le test en Z On choisit une valeur tabulée ρ_α . On suppose que la mesure de la question 6 est la réalisation d'une loi normale¹⁵ centrée en ρ_α et d'écart-type $u(\rho)$. On compare alors à la valeur ρ_0 en calculant :

$$z = \frac{|\rho_0 - \rho_\alpha|}{u(\rho)}$$

- Si $z > z_{\text{seuil}}$, on a affaire à un événement rare; on décide de rejeter l'hypothèse H_0 au risque de 5% (pour $z_{\text{seuil}} = 1,96$).
- Si $z \leq z_{\text{seuil}}$, la mesure est compatible avec l'hypothèse H_0 qui ne peut pas être rejetée au risque de 5% (pour $z_{\text{seuil}} = 1,96$).

Il est très important de comprendre que dans aucun cas on peut affirmer que H_0 est vraie ou fausse! Dans le cas $z > z_{\text{seuil}}$, il est très probable que H_0 ne soit pas vraie, c'est-à-dire que la masse volumique de l'objet ne soit pas ρ_α . Dans le cas $z \leq z_{\text{seuil}}$, il est très probable qu'elle le soit. Mais c'est tout ce qu'on peut dire!

Question 8

Appliquer le test en Z pour chaque valeur de la table donnée ci-dessus pour tester l'hypothèse nulle H_0 au risque de 5%. Conclure sur le matériau qui constitue le cylindre en métal.

14. Si votre mesure n'est pas du même ordre de grandeur, vérifiez vos mesures et vos calculs!

15. On peut montrer que cette hypothèse n'est pas vérifiée ici mais faisons comme si elle l'était!

TRAVAUX PRATIQUES 6

FROTTEMENTS SOLIDES

STATIQUES ET DYNAMIQUES

TEST EN Z

Objectifs de la séance

- Mesurer des coefficients de frottements solides statiques et dynamiques

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* doivent être lus et assimilés (paragraphe 11 facultatif).

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP6* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

6.1. — Préparation

On pose un palet de masse m sur un plan incliné faisant un angle α avec l'horizontal. La réaction \vec{R} du support sur le palet peut se décomposer en une composante tangentielle à la surface du support (\vec{R}_T) et une composante normale à cette surface (\vec{R}_N). Les lois de Coulomb s'écrivent comme suit :

- Absence de mouvement (statique) : $\|\vec{R}_T\| \leq \mu_s \|\vec{R}_N\|$ avec μ_s le coefficient de frottement statique.
- S'il y a glissement (dynamique) :
 - + \vec{R}_T est opposée à la vitesse de glissement ;
 - + $\|\vec{R}_T\| = \mu_d \|\vec{R}_N\|$ avec μ_d le coefficient de frottement dynamique.

6.1.1. — Coefficient de frottement statique

Question 1

Faire le bilan des forces pour le palet lorsqu'il reste immobile et exprimer le coefficient de frottement statique en fonction de l'angle maximal d'inclinaison avant décrochage.

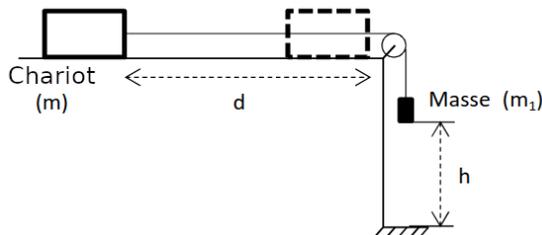
Question 2

Proposer un protocole de mesure de μ_s . Préciser les grandeurs à mesurer et exprimer $\mu_s \pm u(\mu_s)$ en fonction des grandeurs mesurées et de leurs incertitudes-types. Rappel : $\frac{d \tan \theta}{d \theta} = 1 + \tan^2 \theta$.

6.1.2. — Coefficient de frottement dynamique

Question 3

On considère le montage de la figure suivante. Le chariot de masse m , initialement au repos, est relié à une masse m_1 via une poulie. La masse m_1 est suffisamment grande pour que le chariot glisse. Sur une distance $h < d$, le chariot est entraîné par la masse m_1 qui chute. Ensuite, la masse m_1 a atteint le sol et le chariot continue à glisser sur une distance $d - h$.



On peut montrer (voir la fin du TP) que le coefficient μ_d de frottement dynamique du chariot sur le support s'écrit :

$$\mu_d = \frac{1}{\frac{d}{h} \left(1 + \frac{m}{m_1}\right) - 1}$$

Montrer que l'incertitude-type $u(\mu_d)$ en fonction des incertitudes-types sur d , h , m et m_1 s'écrit :

$$u(\mu_d) = \frac{\frac{d}{h} \sqrt{\left(\frac{m}{m_1}\right)^2 \left[\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(m_1)}{m_1}\right)^2\right] + \left(1 + \frac{m}{m_1}\right)^2 \left[\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(h)}{h}\right)^2\right]}{\left(\frac{d}{h} \left(1 + \frac{m}{m_1}\right) - 1\right)^2}$$

6.2. — Études expérimentales

6.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- un plan incliné avec un rapporteur d'angle + fil à plomb
- un chariot de masse $M_{\text{ch}} = 96 \text{ g}$ avec un demi intervalle de certitude de $0,2 \text{ g}$
- trois surfaces interchangeables : plastique, métal et mousse comprimée
- trois masses de 100 g avec un demi intervalle de certitude de $0,2 \text{ g}$

6.2.2. — Variation du coefficient de frottement statique μ_s avec la masse de l'objet

Question 4

Utiliser le chariot vide et la surface en métal. Suivre le protocole proposé dans la préparation pour mesurer le coefficient de frottement statique μ_s . Répéter cinq fois ce protocole et donner l'ensemble des mesures dans le compte rendu. Calculer $\mu_{s,\text{metal}}(M_{\text{ch}}) \pm u(\mu_{s,\text{metal}}(M_{\text{ch}}))$ et justifier l'incertitude-type.

Question 5

Renouveler l'expérience en chargeant le chariot d'une masse $M_k = k \times 100 \text{ g}$ avec $k = 1, 2$ et 3 . Pour chaque masse, déterminer $\mu_{s,\text{metal}}(M_{\text{ch}} + M_k) \pm u(\mu_{s,\text{metal}}(M_{\text{ch}} + M_k))$.

Question 6

Tracer le graphique $\mu_{s,\text{metal}}$ en fonction de $M_{\text{ch}} + M_k$ pour les quatre masses $M_k = k \times 100 \text{ g}$ avec $k = 0$ à 3 en faisant apparaître les incertitudes-types.

Question 7

D'après vos mesures, le coefficient de frottement statique varie-t-il avec la masse de l'objet? On pourra utiliser des tests en Z avec un risque de 5% en énonçant précisément l'hypothèse nulle.

6.2.3. — Variation du coefficient de frottement statique μ_s avec le matériau

Question 8

Répéter la même expérience qu'à la question 4 en utilisant les autres surfaces (uniquement avec le chariot vide). Donner les mesures dans le compte rendu et déterminer le coefficient de frottement statique $\mu_s \pm u(\mu_s)$ pour chaque matériau.

Question 9

Est-ce que le coefficient μ_s de frottement statique varie avec le matériau? Justifier à l'aide de tests en Z avec un risque de 5% en énonçant à chaque fois l'hypothèse nulle.

6.2.4. — Mesure du coefficient de frottement dynamique μ_d

On souhaite maintenant mesurer le coefficient de frottement dynamique μ_d de la surface de métal. On utilise le montage expérimental présenté dans la préparation.

Question 10

Choisir les paramètres ajustables de l'expérience et rapporter les valeurs choisies dans le compte rendu (avec incertitude-type justifiée) : m , m_1 et h .

Question 11

Réaliser l'expérience et mesurer d (avec incertitude-type justifiée). Répéter plusieurs fois l'expérience. En déduire $d \pm u(d)$.

Question 12

Utiliser les formules de la préparation pour en déduire le coefficient de frottement dynamique $\mu_d \pm u(\mu_d)$.

Question 13

La théorie prédit que $u_d < \mu_s$. Est-ce en accord avec vos mesures pour la surface de métal?

6.3. — Démonstration de la formule pour le coefficient dynamique

Première phase du mouvement : m_1 chute et entraîne m

On utilise l'axe (Ox) horizontal, dirigé vers la droite et d'origine le point de départ du chariot. On repère le chariot par son ordonnée $x(t)$.

Le chariot de masse m est soumis à la tension du fil (horizontale et valant $T \vec{u}_x$), à la force de frottement solide ($-\mu_d m g \vec{u}_x$), à son poids et à la réaction normale au support. Les deux dernières se compensent et restent les deux forces horizontales qui sont liées à l'accélération a du chariot :

$$m a = T - \mu_d m g$$

La masse m_1 , d'accélération verticale a , est soumise à son poids et à la tension du fil :

$$m_1 a = m_1 g - T$$

Les accélérations du chariot et de m_1 sont les mêmes (horizontale pour le chariot et verticale pour m_1) car on considère un fil inextensible et sans masse. En sommant les deux équations, on trouve que tant que la masse m_1 chute :

$$(m + m_1) a = (m_1 - \mu_d m) g$$

On intègre pour obtenir la vitesse et la distance parcourue par le chariot. Au moment où la masse m_1 touche le sol, le chariot a parcouru la distance h et sa vitesse est :

$$v_0 = \sqrt{2 g h \frac{m_1 - \mu_d m}{m + m_1}}$$

Deuxième phase du mouvement : m_1 est arrêtée et seule m glisse

Le chariot n'est plus soumis qu'à la force de frottement (pour le mouvement horizontal) :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\mu_d m g \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2 x}{dt^2} = -\mu_d g$$

On intègre cette équation et on trouve que quand le mouvement s'arrête, le chariot a parcouru la distance totale d telle que :

$$d - h = \frac{v_0^2}{2 \mu_d g} \quad \Rightarrow \quad \frac{d - h}{h} = \frac{m_1 - \mu_d m}{m + m_1} \frac{1}{\mu_d}$$

On en déduit :

$$\mu_d = \frac{1}{\frac{m}{m_1} + \frac{d-h}{h} \left(1 + \frac{m}{m_1}\right)} \quad \Leftrightarrow \quad \mu_d = \frac{1}{\frac{d}{h} \left(1 + \frac{m}{m_1}\right) - 1}$$

TRAVAUX PRATIQUES 7

ÉTALONNAGE D'UN DYNAMOMÈTRE

AJUSTEMENT LINÉAIRE

Objectifs de la séance

- Étalonner un instrument en mesurant une loi de conversion entre deux unités.
- Réaliser un ajustement linéaire.
- Utiliser un dynamomètre.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP7* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

7.1. — Préparation

Il est très courant en physique de ne pas pouvoir mesurer la quantité qui nous intéresse mais de pouvoir mesurer une observable qui en dépend : on estime la vitesse de rapprochement d'une étoile en mesurant le décalage du spectre qu'elle émet ; on estime une force de tension superficielle en mesurant une variation de poids, etc. Se pose alors la question de comment convertir la valeur mesurée m (l'observable) en la grandeur d'intérêt x . Deux possibilités s'offrent à nous :

1. On connaît une loi théorique qui donne x en fonction de m : $x = f(m)$ avec f une fonction. Il suffit alors d'appliquer la fonction f aux valeurs m mesurées.
2. On ne connaît pas la loi théorique. Dans ce cas, avant de faire l'expérience d'intérêt, on se place dans une configuration qui permet le mesurage simultané de x et m . On trouve une loi empirique qui lie x et m : la courbe d'étalonnage. On peut alors mesurer l'observable m dans l'expérience d'intérêt et en déduire la valeur associée de x .

La loi qui lie x et m , qu'elle soit théorique ou empirique, est généralement quelconque. Il est cependant très fréquent qu'on choisisse une observable m telle que la loi qui la lie à la grandeur d'intérêt x soit linéaire : $x = \alpha m + \beta$ avec α et β deux constantes. Mais cela n'est pas obligatoire et surtout, ce n'est pas toujours possible !

Question 1

Les bématises de la Grèce antique étaient des personnes dont la longueur ℓ_{pas} du pas était très régulière. Ils pouvaient ainsi mesurer une distance d uniquement en comptant le nombre N de pas qu'ils faisaient. Donner la loi qui relie d , N et ℓ_{pas} . Représenter cette loi sur un graphique qui donne d en ordonnée et N en abscisse. Faire apparaître la grandeur ℓ_{pas} sur le graphique.

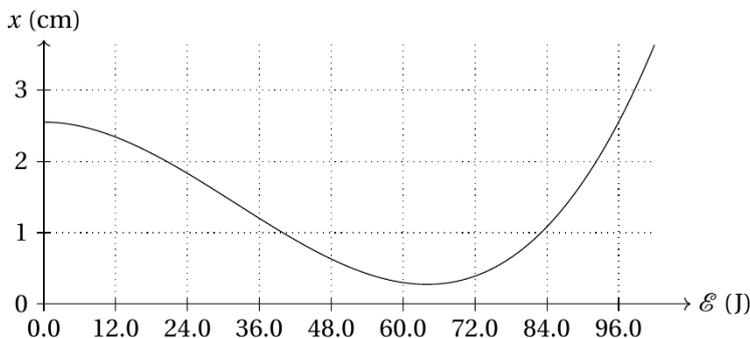
Question 2

Certains miroirs se déforment quand on leur applique une tension électrique U . Zygomette mesure plusieurs valeurs du déplacement D d'un miroir en fonction du voltage appliqué (cf. le tableau ci-dessous). Tracer le graphique U en fonction de D . La loi est-elle linéaire ? Même question si les incertitudes sont vingt fois plus grandes.

Tension U (V)	70,0	80,0	90,0	110,0	130,0	150,0
$u(U)$ (V)	2,1	2,4	2,7	3,3	3,6	4,5
Déplacement D (nm)	100	130	160	245	290	450
$u(D)$ (nm)	2,2	2,3	2,3	2,5	2,6	2,9

Question 3

On considère un objet. On sait que son énergie potentielle \mathcal{E} et sa position x sont reliées par la fonction tracée sur la figure ci-dessous. À un moment on mesure $x = x_0$ et on veut déterminer l'énergie associée \mathcal{E}_0 . À quelle(s) difficulté(s) pouvons-nous être confrontés si on essaie d'estimer \mathcal{E} à partir d'une mesure de x ?



Question 4

Une masse $M \pm u(M)$ est suspendue à un support. Donner l'expression du module $F \pm u(F)$ de la force appliquée sur le support.

Question 5

On sait que M et y sont liés par la relation $M = \alpha' y + \beta'$ avec α' et β' deux constantes réelles. On mesure $y_0 \pm u(y)$. Exprimer la grandeur M_0 associée à y_0 ainsi que l'incertitude-type $u(M)$ en fonction de α' , β' , y_0 , $u(y)$, $u(\alpha')$ et $u(\beta')$.

7.2. — Expériences

Un dynamomètre est un appareil qui permet de mesurer une force. Le dynamomètre posé sur les paillasse pendant cette séance possède des graduations mais on ne sait pas à quelles forces elles correspondent. L'objectif du TP est d'étalonner l'instrument, c'est-à-dire déterminer la fonction f qui permet de connaître le module F de la force qui est appliquée quand le dynamomètre pointe la graduation numéro y . Une fois cette fonction déterminée, on peut déterminer le module F_a quand le dynamomètre pointe une graduation quelconque y_a car $F_a = f(y_a)$.

Remarque de langage : de nombreuses personnes (étudiants mais également chercheurs et enseignants) emploient le terme *calibrer un instrument*. Il s'agit d'un anglicisme et vous êtes très fortement encouragés à employer l'expression française *étalonner un instrument*. En français, le terme *calibrer* signifie *choisir le bon calibre* (sur un voltmètre par exemple).

7.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent

- un dynamomètre gradué;
- cinq masses de $M_1 = 100,0 \text{ g}$ avec un demi-intervalle de certitude de $0,2 \text{ g}$.

7.3. — Protocole et mesurages

Question 6

Charger le dynamomètre avec différentes masses M et noter les positions y du pointeur. Les masses disponibles sont telles que $M = n M_1$ avec $n \in \llbracket 0, 5 \rrbracket$. Remplir le tableau de mesures en justifiant les incertitudes-types sur y et sur M . Utiliser le résultat de la question 4 pour remplir les lignes F et $u(F)$. Utiliser $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

7.4. — Interprétation et utilisation de la loi

Question 7

Tracer le graphique F en fonction de y en échelle linéaire en faisant apparaître les incertidues-types.

- Peut-on dire que la loi est linéaire?
- Si oui, donner la loi numérique $F = f(y)$ et utiliser la fonction *linfitxy* pour obtenir les paramètres de l'ajustement.

Question 8

Suspendre un objet de masse \tilde{M}_0 inconnue (des clés ou autre). Noter la graduation y_0 que pointe le dynamomètre. Utiliser l'étalonnage réalisé dans les questions précédentes et les formules de la question 5 de la préparation pour estimer $\tilde{M}_0 \pm u(\tilde{M}_0)$. Comparer le résultat avec celui obtenu avec une balance électronique. Appliquer pour cela un test en Z en précisant l'hypothèse nulle et en utilisant un risque à 5%.

TRAVAUX PRATIQUES 8

LA CHUTE LIBRE

AJUSTEMENT LINÉAIRE

TEST EN Z

Objectifs de la séance

- Mesurer la durée de chute d'une bille
- Estimer la relation entre durée de chute et hauteur de chute
- Estimer la relation entre durée de chute et masse de la bille

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP8* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

8.1. — Préparation

Question 1

Soit un objet de masse m en chute libre dans un champ de pesanteur de norme g . Donner la relation entre le temps de chute libre Δt et la distance parcourue h en l'absence de frottements.

Question 2

On mesure $\Delta t \pm u(\Delta t)$ et $h \pm u(h)$. Exprimer l'accélération g de pesanteur en fonction de Δt et h , ainsi que l'incertitude-type sur g en fonction de celles sur Δt et h .

Question 3

En considérant le montage décrit ci-dessous, proposer un protocole pour mesurer g .

Question 4

De quels paramètres dépend le temps de chute libre dans le cas où l'on néglige les frottements? Dans le cas où l'on ne les néglige pas? Proposer un protocole pour vérifier ces dépendances.

8.2. — Études expérimentales

8.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- un support
- deux billes de masses différentes
- un support de réception des billes
- une alimentation stabilisée
- un électro-aimant
- un interrupteur
- deux capteurs optiques couplés à un ordinateur par USB et à l'électro-aimant

L'expérience est « presse-bouton ». Cela signifie que vous n'avez presque rien à gérer au niveau matériel. La contre-partie est qu'une interprétation fine de votre part est attendue.

Quand on ouvre le circuit électrique, l'électro-aimant s'éteint en déclenchant le chronomètre. La bille tombe et le chronomètre s'arrête quand elle passe entre deux capteurs optiques. La mesure s'affiche sur l'écran de l'ordinateur.

8.2.2. — Mode d'emploi du montage

Le montage électronique devrait être fait. Si ce n'est pas le cas :

- relier la borne positive de l'alimentation à la borne rouge de l'électro-aimant et à la borne rouge du boîtier;
- relier la borne négative de l'alimentation à une borne de l'interrupteur;
- relier la borne noire du boîtier (à côté de la borne rouge) à l'autre borne de l'interrupteur;
- relier cette borne de l'interrupteur à la borne noire de l'électro-aimant;
- connecter un câble co-axial entre les capteurs optiques et le boîtier.

et appeler l'encadrant pour vérification.

Ensuite, dans cet ordre :

1. Accrocher le fil à plomb au niveau de l'électro-aimant.
2. Ajuster l'assiette du support pour que le fil à plomb passe entre les capteurs optiques (cela assure que la bille passera devant ces capteurs).
3. Retirer le fil à plomb.
4. Régler la consigne de commande sur l'alimentation stabilisée :
 - **4 V pour la petite bille**
 - **5 V pour la grosse bille**
5. Connecter le câble USB à l'ordinateur.
6. L'ordinateur.
 - allumer l'ordinateur;
 - ouvrir un terminal;
 - écrire `cd 1ChuteDeBille/Python`
 - écrire `python ChuteDeBilleVersion2022n1.py`
7. Alimenter le circuit (touche *output* de l'alimentation et interrupteur sur *ON*).
8. Attacher la bille à l'électro-aimant.
9. Ouvrir le circuit en passant l'interrupteur sur *OFF*. Une mesure apparaît sur l'écran de l'ordinateur.

On peut ensuite recommencer autant de fois qu'on le souhaite le mesurage en ne répétant que les étapes 7, 8 et 9 :

- fermer le circuit (interrupteur sur *ON*);
- accrocher la bille;
- ouvrir le circuit (interrupteur sur *OFF*).

8.2.3. — Mesure de l'accélération de la pesanteur g

Question 5

Choisir la plus petite bille et une hauteur de chute h . Mesurer h et justifier l'incertitude-type. Fixer la consigne en tension à 4V sur l'alimentation stabilisée. Mesurer le temps Δt de chute libre. Répéter la mesure une dizaine de fois. De quel type est l'incertitude ? Donner la valeur mesurée $\Delta t \pm u(\Delta t)$ en justifiant la valeur de l'incertitude-type.

Question 6

Utiliser la question 2 pour déduire une mesure $g_0 \pm u(g_0)$ de l'accélération de la pesanteur.

8.2.4. — Variation du temps Δt de chute avec la hauteur h de chute

On souhaite vérifier expérimentalement la relation de la question 1.

Question 7

Mesurer le temps de chute Δt pour plusieurs hauteurs h . Remplir le tableau de mesure dans le compte rendu en justifiant les incertitudes. Pour chaque h , il est conseillé de réaliser une dizaine de mesures et de les moyenner (expliquer pourquoi).

Question 8

Tracer le graphique h en fonction de $(\Delta t)^2$. Est-ce que ce tracé est en accord avec la préparation? Si oui, réaliser un ajustement linéaire et en déduire une estimée $g_1 \pm u(g_1)$ de l'accélération de la pesanteur.

Question 9

Quelle est la source d'incertitude dominante dans cette expérience?

Question 10

Comparer les estimées de g faites aux questions 6 et 8 grâce à un test en Z en précisant l'hypothèse nulle et en utilisant un risque à 5%.

8.2.5. — Variation du temps de chute libre Δt avec la masse m

On souhaite vérifier expérimentalement que le temps de chute libre d'une bille ne dépend pas de sa masse. Fixer une hauteur h et donner la valeur mesurée dans le compte rendu.

Question 11

Mesurer les temps de chute des deux billes de masses m différentes. Là encore, il est conseillé de réaliser une dizaine, voire une vingtaine si vous avez le temps, de mesures et de les moyenner pour chaque configuration. Remplir le tableau de mesures. Rappel : la consigne de l'alimentation stabilisée est 4V pour la petite bille et 5V pour la grosse bille.

Question 12

Tracer le graphique Δt en fonction de m . Est-ce que ce tracé est en accord avec la préparation? Justifier quantitativement.

Question 13

On peut se demander pourquoi la consigne de l'alimentation stabilisée qui alimente l'électroaimant n'est pas la même pour les deux billes. On peut alors recommencer l'expérience précédente en utilisant 5V pour les deux billes. Commenter les résultats.

TRAVAUX PRATIQUES 9

MESURAGE DE LA PÉRIODE D'UN PENDULE SIMPLE (1ÈRE PARTIE)

MOYENNE DE N MESURES

Objectifs de la séance

- Comparer deux procédures de mesurage d'une période (estimée et incertitude-type)
- Tracer un histogramme
- Utiliser le test en Z

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 10 inclus, et plus particulièrement le paragraphe 7.1, doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP9* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

9.1. — Préparation

On souhaite mesurer la période T d'un mouvement. Par exemple, la période des oscillations d'un pendule simple, c'est-à-dire la durée d'un aller-retour du pendule. Une contrainte nous oblige à réaliser le mesurage en étudiant seulement N périodes d'oscillation, donc une durée totale d'expérience égale à $N \times T$ avec N un entier naturel. Deux possibilités s'offrent à nous.

Méthode I

On mesure N fois la durée T_1 d'un aller-retour du pendule (c'est à dire la période de l'oscillation du pendule) et on calcule la moyenne de ces N mesures.

Méthode II

On mesure la durée T_N qu'il faut au pendule pour faire N allers-retours et on divise le résultat par le nombre N d'allers-retours.

Question 1

L'expérimentatrice Zygomette suit la méthode I et réalise N mesurages indépendants de T_1 qu'elle note $T_{1,i} \pm u(T_{1,i})$ avec i variant de 1 à N . Elle réalise chaque mesurage dans les mêmes conditions et estime que l'incertitude-type ne dépend pas de i : $u(T_{1,i}) = u(T_1)$. Donner les expressions qu'elle obtient pour la période T^I du pendule et son incertitude-type $u(T^I)$.

Question 2

L'expérimentateur Zygomar choisit la méthode II et mesure $T_N \pm u(T_N)$. Donner l'expression de l'estimée T^{II} de la période du pendule qu'il obtient à partir de ce mesurage et de l'incertitude-type $u(T^{II})$ associée.

Question 3

Zygomette et Zygomar cherchent à savoir laquelle des méthodes donne l'incertitude-type la plus petite. Ils se rendent compte qu'ils doivent faire une hypothèse et choisissent $u(T_N) = u(T_1)$. Expliquer pourquoi ils doivent faire une hypothèse et pourquoi l'hypothèse qu'ils font est raisonnable. Quelle est dans ces conditions la méthode donnant l'incertitude la plus petite?

9.2. — Expériences

9.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- une potence
- une tige métallique
- plusieurs masses de 100 g avec un demi-intervalle de certitude de 0,2 g.
- un chronomètre électronique dont l'affichage est précis au millièème de seconde. On supposera qu'il est parfaitement calibré, ce qui signifie que le temps affiché correspond exactement à l'arrondi au millièème de l'intervalle temporel entre deux déclenchements.

9.2.2. — Préparation du pendule et mesure

Faire glisser la tige pour fixer la distance entre le centre de gravité de la masse M et l'axe de rotation (point O) à $L \simeq 50$ cm. Utiliser une charge $M = 100$ g. Écarter le pendule d'un angle $\theta_0 \simeq 30^\circ$ de sa position d'équilibre (voir la figure 1) et le lâcher sans vitesse initiale.

Dans toute la suite, on utilisera $N = 10$.

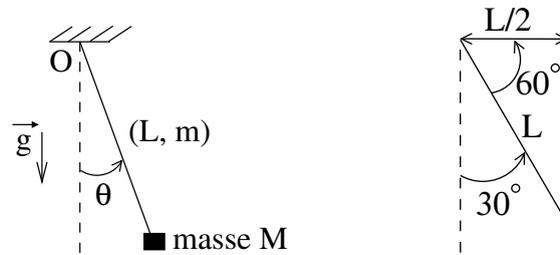


FIGURE 1 – **Gauche** : Pendule simple constitué d'une tige de longueur L et de masse m suspendue à un support fixe et lestée par une masse M . **Droite** : Rappels de trigonométrie pour écarter le pendule d'un angle 30° car $\cos 60^\circ = \sin 30^\circ = 1/2$.

9.2.3. — Méthode I : mesurer N fois la durée d'un aller-retour

Question 4

Suivre le protocole proposé dans la préparation pour obtenir les N mesures de la méthode I. Remplir le tableau de mesure dans le compte rendu. Astuce expérimentale : lâcher le pendule, le laisser osciller pendant une période et déclencher le chronomètre et le décompte¹⁶.

Question 5

Tracer l'histogramme des N mesures $T_{1,i}$ sous Jupyter. Calculer la moyenne $\overline{T_1}$ et l'écart-type σ de ces N mesures.

Question 6

En déduire l'incertitude-type sur une mesure unique $u(T_1)$. Comparer $u(T_1)$ à la précision du chronomètre et commenter l'origine principale de $u(T_1)$.

Question 7

Donner l'estimée T^I de la période du pendule et l'incertitude-type $u(T^I)$ associée en utilisant le résultat de la question 1.

9.2.4. — Méthode II : mesurer 1 fois la durée de N allers-retours

Question 8

Suivre le protocole proposé dans la préparation pour obtenir la mesure T_N de la méthode II en utilisant la même astuce expérimentale qu'à la question 4. En déduire l'estimée T^{II} de la période du pendule et l'incertitude-type $u(T^{II})$ associée en utilisant le résultat de la question 2. Préciser si l'incertitude est de type A ou B et son origine.

9.2.5. — Comparaison des méthodes I et II

Question 9

Les deux mesures T^I et T^{II} donnent-elles des résultats compatibles? Justifier votre réponse avec un test en Z en précisant l'hypothèse nulle et en utilisant un risque à 5%.

Question 10

Quelle méthode donne l'incertitude-type la plus petite?

16. Si vous déclenchez le chronomètre en même temps que vous lâchez le pendule, vous risquez d'introduire une erreur systématique (i.e. un biais) dans votre mesure.

TRAVAUX PRATIQUES 10

MESURAGE DE LA PÉRIODE D'UN PENDULE SIMPLE (2ÈME PARTIE)

PÉRIODE, MASSE ET LONGUEUR DU PENDULE

Objectifs de la séance

- Déterminer empiriquement les paramètres qui font varier la période d'un pendule simple et les lois de variation associées
- Comparer des mesures en faisant varier un seul paramètre
- Comparer des données expérimentales et à un modèle théorique
- Utiliser le test en Z

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé, celui du TP9 et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 11 inclus doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP10* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

10.1. — Préparation

Question 1

Zygomar souhaite déterminer quels paramètres font varier la période du pendule qu'il mesure à l'aide d'un chronomètre électronique. Pour cela, il décale le pendule de sa position d'équilibre d'un angle θ_0 et le lâche sans vitesse initiale. Il mesure alors la période d'oscillation. Le schéma du pendule simple est donné dans la figure 1 du TP9.

Quels paramètres peuvent a priori faire varier la période d'oscillation du pendule ?

Question 2

Dans la limite des petits angles θ et pour une tige sans masse ($m = 0$), donner l'expression théorique de la période du pendule simple T .

10.2. — Expériences

10.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- un chronomètre électronique dont l'affichage est précis au millième de seconde. On supposera qu'il est parfaitement calibré, ce qui signifie que le temps affiché correspond exactement à l'arrondi au millième de l'intervalle temporel entre deux déclenchements.
- une potence
- Expérience « Variation de T avec M »
 - + une tige métallique
 - + plusieurs masses de 100 g avec un demi-intervalle de certitude de 0,2 g.
- Expérience « Variation de T avec L »
 - + une masse accrochée à du fil de cuisine de longueur variable

Dans toutes les expériences de ce TP, on utilisera un angle initial inférieur à 30° et les périodes seront mesurées en utilisant la méthode II décrite au TP9 avec $N = 10$.

Rappel important : L est la distance entre l'axe de rotation et le centre de gravité de la masse M .

10.2.2. — Variation de la période du pendule simple avec la masse M

Dans cette partie, on étudie la dépendance de la période du pendule avec la masse M .

Question 3

Fixer $L \simeq 50$ cm et mesurer la période d'oscillation du pendule pour trois valeurs de M : 100 g, 300 g et 500 g. Remplir le tableau de mesures en justifiant chaque mesure et incertitude (on pourra utiliser certains résultats du TP9 pour les justifications).

Question 4

Utiliser des tests en Z pour vérifier si la période des oscillations varie avec la masse M . Conclure.

10.2.3. — Variation de la période avec la longueur L du pendule

Dans cette partie, on étudie la variation de la période d'oscillation avec la longueur L du pendule. On utilise pour cela le fil de cuisine auquel est accrochée une masse M .

Question 5

Mesurer M et justifier l'incertitude.

Question 6

Mesurer la période du pendule en faisant varier la longueur L du fil entre 10 cm et 150 cm pour une dizaine de valeurs. Remplir le tableau de mesure en justifiant chaque mesure et incertitude.

Question 7

Après leurs calculs théoriques :

- Zygomette trouve que la période s'écrit $T = 2\pi \sqrt{L/g}$;
- Zygomar que $T = 2\pi L^2/g$;
- Léa Phar que T ne varie pas avec L .

Est-ce que vos mesures sont en accord avec l'un des trois modèles? Pour répondre à cette question, vous pouvez tracer T en fonction de \sqrt{L} , puis en fonction de L^2 et enfin en fonction de L . Dans le(s) cas qui semble(nt) en accord avec vos mesures, un ajustement linéaire sera utilisé pour déterminer l'accélération de pesanteur $g \pm u(g)$.

TRAVAUX PRATIQUES 11

MESURAGE DE LA PÉRIODE D'UN PENDULE SIMPLE (3ÈME PARTIE)

PÉRIODE ET ANGLE INITIAL

Objectifs de la séance

- Déterminer empiriquement les paramètres qui font varier la période d'un pendule simple et les lois de variation associées
- Comparer données expérimentales à un modèle théorique
- Appliquer le test en Z

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé, ceux des TP9 et TP10 et les *Notes de cours 2022* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP11* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

11.1. — Préparation

Question 1

Dans la limite des petits angles θ , rappeler l'expression théorique de la période du pendule simple T .

Question 2

Si on s'écarte de la limite des petits angles, la période T dépend de l'angle initial θ_0 . Quel argument physique permet d'affirmer que l'expression de la période en fonction de θ_0 est paire en θ_0 et donc de la forme $T(\theta_0) = \alpha_0 + \alpha_2 \theta_0^2 + \dots$ avec α_i des nombres réels qui ne dépendent pas de θ_0 mais qui peuvent dépendre des autres paramètres ?

11.2. — Expériences

11.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- une potence
- une tige métallique
- une masse de 100 g avec un demi-intervalle de certitude de 0,2 g
- un chronomètre électronique dont l'affichage est précis au millième de seconde. On supposera qu'il est parfaitement calibré, ce qui signifie que le temps affiché correspond exactement à l'arrondi au millième de l'intervalle temporel entre deux déclenchements.

Dans toutes les expériences de ce TP, on utilisera la même longueur $L \simeq 50$ cm et la même masse $M = 100$ g. De plus, les périodes seront mesurées en utilisant la méthode II décrite au TP9 avec $N = 4$.

11.2.2. — Variation de la période avec l'angle initial θ_0

Question 3

Mesurer la période d'oscillation du pendule pour une dizaine de valeurs d'angle initial θ_0 dans l'intervalle $[0^\circ, 180^\circ]$. Remplir le tableau de mesures en justifiant chaque mesure et incertitude (on pourra utiliser certains résultats du TP9 pour les justifications).

Question 4

Tracer le graphe donnant T en fonction de θ_0 en faisant apparaître les incertitudes-types.

Question 5

On considère l'expression de la question 2 de la préparation à l'ordre deux $T(\theta_0) = \alpha_0 + \alpha_2 \theta_0^2$ avec α_0 et α_2 des constantes réelles. Est-ce que vos mesures sont en accord avec cette formule théorique ? Si oui, déterminer $\alpha_0 \pm u(\alpha_0)$ et $\alpha_2 \pm u(\alpha_2)$ à l'aide d'un ajustement linéaire en justifiant chaque étape du raisonnement.

Question 6

Un modèle théorique prédit $\alpha_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ et $\alpha_2 = \frac{\alpha_0}{16}$. Appliquer des tests en Z pour comparer valeurs théoriques et mesurées en précisant l'hypothèse nulle et en utilisant un risque à 5 %.

TRAVAUX PRATIQUES 12

SOURCES IDÉALES DE TENSION ET DE COURANT

ALIMENTATION STABILISÉE

ÉTALONNAGE D'UN RHÉOSTAT

Objectifs de la séance

- Apprendre à se servir d'une alimentation stabilisée, instrument utilisé dans la plupart des laboratoires de physique, dans l'industrie et dont le principe se trouve dans de nombreux systèmes électriques.
- Associer une incertitude à chaque mesure.
- Étalonner un rhéostat.
- Utiliser python pour faire un ajustement linéaire.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 11 inclus doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP12* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

12.1. — Préparation : alimentation stabilisée

12.1.1. — Définition

Une alimentation stabilisée est une source ajustable d'électricité continue (c'est-à-dire délivrant un courant constant ou une tension constante dans le temps) reliée au secteur (autrement dit le réseau électrique domestique). Elle est dite stabilisée car la tension ou le courant délivrés ne dépendent pas ou très faiblement :

1. de la tension fournie par le secteur qui varie de quelques pourcents en amplitude et en fréquence au cours de la journée, et qui est sujette à des micro-coupures;
2. des caractéristiques du circuit auquel l'alimentation est reliée.

12.1.2. — Les alimentations en salle de TP

Deux modèles d'alimentation sont disponibles en salle de travaux pratiques : le modèle TTI EX2020R, capable de fournir jusqu'à 20 volts et 20 ampères, ou le modèle Besetech BT305 capable de fournir jusqu'à 30 volts et 5 ampères.

12.1.2.1. — Les bornes

Il y a trois bornes sur l'alimentation :

- une borne + avec un repère de couleur rouge.
- une borne – avec un repère de couleur noire.
- une borne \perp qui est reliée au châssis ainsi qu'à la terre. Non utilisée dans ce TP.

Sur le modèle TTI EX2020R, il y a deux autres bornes 'SENSE' et un interrupteur 'Local/Remote' qui ne sont pas utilisés dans ce TP.

12.1.2.2. — Voltmètre et ampèremètre internes

L'alimentation stabilisée comporte un voltmètre et un ampèremètre qui affichent respectivement la tension et le courant délivrés quand le circuit est branché entre les bornes + et –. Concernant les incertitudes associées à ces instruments, on lit dans les documentations :

1. TTI EX2020R :

- Meter Resolutions : 10mV, 10mA
- Meter Accuracies :
 - + Voltage 0.3% of reading +3 digits
 - + Current 0.6% of reading +3 digits
- Cela signifie que pour la mesure de la tension U , l'incertitude-type est

$$u(U) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{0,3}{100} U + 30 \text{ mV} \right) \quad (1)$$

et pour la mesure de l'intensité I , elle vaut

$$u(I) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{0,6}{100} I + 30 \text{ mA} \right) \quad (2)$$

Remarque : Il faut penser à faire les conversions avant d'utiliser ces formules dans lesquelles U et I sont respectivement en mV et mA.

2. Besetech BT305 :

- Display Accuracy :
- Voltage..... $\pm 1\% + 2$ digits
- Current..... $\pm 2\% + 2$ digits
- Les résolutions sont 100mV et 10mA
- On en déduit l'incertitude-type sur la mesure de U

$$u(U) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{100} U + 200 \text{ mV} \right) \quad (3)$$

et celle sur la mesure de I

$$u(I) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{2}{100} I + 20 \text{ mA} \right) \quad (4)$$

Remarque : Il faut penser à faire les conversions avant d'utiliser ces formules dans lesquelles U et I sont respectivement en mV et mA.

Question 1

L'étudiant Zygomar utilise une alimentation TTi EX2020R pour alimenter un résistor de résistance R . Il lit sur l'affichage $U = 12,31 \text{ V}$ et $I = 2,73 \text{ A}$. Calculer les incertitudes $u(U)$ et $u(I)$ associées à ces valeurs. Calculer la valeur de la résistance $R = U/I$ du résistor ainsi que l'incertitude associée $u(R)$. Ecrire le résultat en suivant les règles d'écriture scientifique.

12.1.2.3. — Activation des alimentations

Pour activer l'alimentation il faut dans l'ordre :

1. la brancher au secteur;
2. allumer l'alimentation en utilisant le bouton *Power* ou *On*; pour l'instant l'alimentation ne délivre rien dans le circuit;
3. régler la consigne, c'est-à-dire les tension et courant maximaux admissibles par le circuit, à l'aide des boutons rotatifs (*Voltage* et *Current*); pour le réglage de la tension il y a un réglage grossier (*Coarse*) et un réglage fin (*Fine*); circuit. Oublier cette dernière étape est une erreur classique qui peut vous faire perdre beaucoup de temps.

12.1.3. — Rhéostat
Question 2

Un rhéostat est une résistance électrique réglable. On alimente avec une alimentation stabilisée un rhéostat de puissance maximale admissible de 30W. Quelle précaution faut-il prendre lors du choix des valeurs (tension et courant) de consigne imposées à l'alimentation stabilisée avant la mise sous tension du circuit?

Question 3

On veut étalonner le rhéostat, c'est-à-dire connaître la valeur de la résistance en fonction de la position du potentiomètre (graduation de 0 à 12). Étant donné le matériel à disposition (voir ci-dessous), proposer un protocole qui permette de réaliser cet étalonnage. On rappelle qu'un protocole expérimental doit

- décrire le montage expérimental (quels composants utiliser, faire un schéma) ;
- décrire la procédure à suivre pour préparer la mesure si besoin (quels réglages doivent être vérifiés et comment les vérifier) ;
- expliquer quelles grandeurs sont à mesurer (les observables) et comment on les mesure (avec quels instruments).

12.2. — Expériences

12.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- une alimentation stabilisée (TTi EX2020R ou Besetech BT305) ;
- des câbles de sécurité ;
- un rhéostat dont on peut varier la résistance entre environ 0Ω et 10Ω . La puissance maximale que le rhéostat peut accepter est 30W . Par précaution, le dispositif est protégé par un fusible de $1,6\text{A}$. **On fera en sorte de ne jamais dépasser $1,5\text{A}$**

Il est fortement conseillé de respecter les codes couleurs pour les câbles électriques : fil noir sur borne noire, fil rouge sur borne rouge. Pour l'instant le circuit est très simple. Si vous prenez de bonnes habitudes, vous vous en sortirez plus facilement avec des circuits complexes qui comportent 25 fils et 10 composants.

12.2.2. — Mesurages : Expérience 1

Question 4

Régler la consigne de l'alimentation stabilisée pour une intensité maximale de 1A et une tension maximale de 20V . Brancher le reste du circuit décrit dans le protocole proposé dans la préparation. **Faire vérifier le réglage par l'encadrant avant d'alimenter le circuit!**

Effectuer les mesurages simultanés de la tension $U = U_c \pm u(U)$ et de l'intensité $I = I_c \pm u(I)$ pour les neuf graduations (g) entières de 1 à 9 du potentiomètre (s'interdire la graduation 0 pour éviter de faire un court-circuit). Remplir le tableau de mesure. Dans quel mode l'alimentation stabilisée fonctionne-t-elle (source idéale de tension ou de courant) ?

Question 5

Tracer les graphes I et U en fonction de g .

Question 6

D'après la loi d'Ohm, $U(g) = R(g) I(g)$. Tracer le graphe U/I en fonction de g . Une modélisation affine du comportement du rhéostat (c'est-à-dire $R(g) = \alpha g + \beta$ avec α et β des constantes) vous semble-t-elle justifiée? Si oui, faire un ajustement linéaire avec la fonction `linfitxy` afin de déterminer les constantes α et β . Donner la signification physique de α et β .

12.2.3. — Mesurages : Expérience 2

Question 7

Régler maintenant la consigne de l'alimentation stabilisée pour une tension maximale de 1V et une intensité maximale de $1,5\text{A}$ (maximum admissible par le fusible). Reprendre les trois questions précédentes.

12.2.4. — Mesurages : Expérience 3**Question 8**

Faire une dernière expérience en réglant la consigne de l'alimentation stabilisée pour une tension maximale de 6 V et une intensité maximale de 1,5 A. Reprendre les questions précédentes.

Question 9

Tracer le graphe $U = f(I)$ à l'aide de python. Ce graphique montre deux régions distinctes qui traduisent deux modes de fonctionnement de l'alimentation stabilisée. Identifier les deux régions du graphique et les décrire. Associer chaque région à un comportement spécifique de l'alimentation stabilisée : source de tension ou source de courant. Quel est le rôle de la consigne?

TRAVAUX PRATIQUES 13

MESURER UNE TENSION ET UN COURANT

MÉTHODE VOLTAMPÈREMÉTRIQUE

Objectifs de la séance

- Choisir le calibre approprié d'un multimètre pour mesurer une tension ou un courant
- Calculer correctement l'incertitude en fonction du calibre choisi.
- Tracer la caractéristique courant-tension d'un composant.
- Vérifier la loi d'Ohm.
- Mesurer une résistance à l'aide de la méthode voltampèremétrique : montages en courte dérivation ou longue dérivation.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP13* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

13.1. — Préparation : Voltampèremétrie

13.1.1. — Méthode voltampèremétrique

Afin de mesurer la résistance d'un circuit ou d'un composant, une possibilité est d'imposer une tension à ses bornes, puis de mesurer simultanément cette tension et le courant qui le traverse. On calcule alors la résistance grâce à la loi d'Ohm :

$$U = +RI \quad (5)$$

qui modélise la relation entre le courant I qui parcourt un résistor de résistance R aux bornes duquel est appliquée une tension U . Le signe + est valable pour l'orientation de la figure 2. Ce

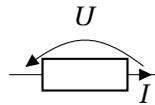


FIGURE 2 – Résistor traversé par le courant I et soumis à une tension U .

procédé est appelé méthode voltampèremétrique.

13.1.2. — Caractéristique courant-tension

Il est fréquent quand on étudie un dipôle électrique de mesurer l'intensité I qui le traverse en fonction de la tension U à ses bornes. Le graphe I en fonction de U est la caractéristique courant-tension de ce dipôle.

Question 1

Représenter la caractéristique courant-tension d'un résistor.

13.1.3. — Protocole

On souhaite mesurer la résistance R d'un résistor et on a à disposition : une source idéale de tension, un voltmètre, un ampèremètre. Deux circuits électriques qui permettent de mesurer à la fois le courant qui parcourt le résistor et la tension à ses bornes sont possibles :

- un montage en "courte dérivation" dans lequel on mesure la tension aux bornes du dipôle étudié.
- un montage en "longue dérivation" dans lequel on mesure la tension aux bornes de l'ensemble {dipôle étudié + ampèremètre} mis en série.

Chaque montage présente des inconvénients dont l'importance dépend de la valeur de la résistance R du résistor étudié et des résistances internes du voltmètre R_V (de l'ordre du $M\Omega$) et de l'ampèremètre R_A (de l'ordre du Ω).

Question 2

Faire les schémas électriques des deux montages.

Question 3

En supposant que R_V est très grand devant R et R_A , exprimer le rapport entre la tension mesurée et l'intensité mesurée pour chacun des montages en fonction de R et R_A

13.2. — Expériences

13.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- une alimentation stabilisée (TTi EX2020R ou Besetech BT305) ;
- un multimètres Voltcraft VC130 qui sera utilisé en voltmètre. On trouve dans la notice de l'appareil le tableau suivant :

Plage vC130-1/150-1	Précision	résolution
200 mV	$\pm(0,5\% + 8)$	0,1 mV
2000 mV		1 mV
20 V		0,01 V
200 V		0,1 V
250 V	$\pm(0,8\% + 8)$	1 V

FIGURE 3 – Précision de la mesure de la tension en mode continu pour les différents calibres du multimètre VC130. Attention : l'écriture $\pm(0.5\%+8)$ signifie $\pm(0.5\%+8 \text{ digits})$ ou encore $\pm(0.5\%+8 * \text{résolution})$.

- un multimètres Beha-Amprobe AM-535-EUR qui sera utilisé en ampèremètre. On trouve dans la notice de l'appareil le tableau suivant :

7. DC Current Measurement

	Range	Resolution	Accuracy
μA	400.0 μA	0.1 μA	$\pm(1.0\%+2\text{LSD})$
	4000 μA	1 μA	
mA	40.00mA	10 μA	
	400.0mA	0.1mA	
A	4.000A	1mA	$\pm(1.2\%+3\text{LSD})$
	20.00A ^[1, 2, 3]	10mA	

FIGURE 4 – Précision de la mesure du courant en mode continu pour les différents calibres du multimètre AM-535-EUR. L'abréviation "LSD" correspond à la résolution du calibre utilisé (ce qui est équivalent au dernier digit de l'affichage).

- un résistor dont la résistance indiquée par le constructeurs est 47Ω avec un demi-intervalle de certitude relatif de 5%. La puissance maximale admissible par le transistor est de 0,5 W. On fera très attention de rester en-deçà de cette valeur.

- un support à composants
- des câbles électriques

Il est fortement conseillé de respecter les codes couleurs pour les câbles électriques : fil noir sur borne noire, fil rouge sur borne rouge. Pour l'instant le circuit est très simple. Si vous prenez de bonnes habitudes, vous vous en sortirez plus facilement avec des circuits complexes qui comportent 25 fils et 10 composants.

Question 4

Calculer l'incertitude associée à la mesure d'un courant de 123,4 mA à l'aide du multimètre AM-535-EUR.

13.2.2. — Mesurages

Question 5

Réaliser le circuit en courte dérivation. Fixer une consigne de 0,1 A sur l'alimentation stabilisée. Effectuer, à l'aide des multimètres, les mesurages simultanés de la tension $U = U_0 \pm u(U)$ et de l'intensité $I = I_0 \pm u(I)$ en faisant varier les valeurs de la consigne de la tension de l'alimentation stabilisée entre 0,5 V et 4,0 V. Régler les calibres des multimètres pour optimiser la précision de la mesure. Reporter les mesures affichées par les multimètres dans le tableau de mesure. Justifier chaque estimation d'incertitudes.

Question 6

Tracer le graphe $U = f(I)$ à l'aide de python. La loi d'Ohm est-elle vérifiée? Si cela est judicieux, faire un ajustement linéaire avec la fonction python `linfitxy` et déterminer une valeur de la résistance R du résistor.

Question 7

Recommencer l'expérience avec le montage en longue dérivation et trouver une deuxième estimation de la résistance R .

13.2.3. — Interprétation

Question 8

Comparer les deux valeurs de R mesurées avec celle annoncée par le constructeur. Supposer que les mesures sont les réalisations de distributions gaussiennes¹⁷. Préciser quelle hypothèse H_0 est testée (utiliser un risque à 5%). Quel est le montage le mieux adapté à la mesure de la résistance du résistor dans cette expérience? Pourquoi? On pourra s'aider de la réponse à la question 3.

Question 9

Que peut-on dire sur la tension aux bornes de l'ampèremètre et le courant qui traverse le volt-mètre? On pourra refaire des mesures comparatives des deux montages en prenant soin de ne pas modifier les consignes de l'alimentation. En déduire la valeur de la résistance interne de l'ampèremètre.

17. Ceci n'est pas exact mais autorisons-nous cette hypothèse.

TRAVAUX PRATIQUES 14

MÉTHODE VOLTAMPÈREMÉTRIQUE (II)

MESURE DE LA RÉSISTANCE INTERNE D'UN VOLTMÈTRE

Objectifs de la séance

- Choisir le calibre approprié d'un multimètre pour mesurer une tension ou un courant
- Calculer correctement l'incertitude en fonction du calibre choisi.
- Tracer la caractéristique courant-tension d'un composant.
- Vérifier la loi d'Ohm.
- Mesurer une résistance à l'aide de la méthode voltampèremétrique : montages en courte dérivation ou longue dérivation.
- Calculer correctement la propagation des incertitudes .

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé, celui du TP13 et les *Notes de cours 2022* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP14* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

14.1. — Préparation

14.1.1. — Résistance équivalente à deux résistances en parallèle

Question 1

Le montage en parallèle de deux résistors de résistances R_1 et R_2 est équivalent à une seule résistance R_{eq} telle que :

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

On mesure $R_1 \pm u(R_1)$ et $R_2 \pm u(R_2)$. Exprimer en fonction de R_1 , R_2 , $u(R_1)$ et $u(R_2)$ l'incertitude-type sur $1/R_1$, $1/R_2$, $1/R_{\text{eq}}$ et R_{eq} .

14.1.2. — Méthode voltampèremétrique

On souhaite mesurer la résistance R d'un résistor et on a à disposition : une source idéale de tension, un voltmètre, un ampèremètre. On utilise la méthode voltampèremétrique décrite dans le TP13 qu'il est impératif de relire avant de continuer. En particulier, revoir le schéma des montages en courte et longue dérivation. On utilisera les notations introduites dans le TP13.

Question 2

En supposant que R_A est très petit devant R et R_V , exprimer le rapport entre la tension mesurée et l'intensité mesurée pour chacun des montages en fonction de R et R_V . On ne fait aucune hypothèse sur le rapport R/R_V .

14.2. — Expériences

14.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- une alimentation stabilisée (TTi EX2020R ou Besetech BT305) ;
- un multimètres Voltcraft VC130 qui sera utilisé en voltmètre.
- un multimètres Beha-Amprobe AM-535-EUR qui sera utilisé en ampèremètre.
- un résistor de résistance annoncée $1\text{ M}\Omega$ avec un demi-intervalle de certitude relatif de 5%. La puissance maximale admissible par le résistor est de 0,5W.
- un support à composants
- des câbles électriques

Il est fortement conseillé de respecter les codes couleurs pour les câbles électriques : fil noir sur borne noire, fil rouge sur borne rouge. Pour l'instant le circuit est très simple. Si vous prenez de bonnes habitudes, vous vous en sortirez plus facilement avec des circuits complexes qui comportent 25 fils et 10 composants.

14.2.2. — Mesurages

Question 3

Réaliser le circuit en courte dérivation. Fixer une consigne de 0,1 A sur l'alimentation stabilisée. Effectuer, à l'aide des multimètres, les mesurages simultanés de la tension $U = U_0 \pm u(U)$ et de l'intensité $I = I_0 \pm u(I)$ en faisant varier les valeurs de la consigne de la tension de l'alimentation stabilisée entre 1V et 20V (faire les mesures pour au moins 5 valeurs de tension). Régler le voltmètre (VC130) sur le calibre 20V pour toutes les mesures. Justifier l'estimation des incertitudes et compléter le tableau de mesures.

Question 4

Tracer le graphe $U = f(I)$ à l'aide de python. La loi d'Ohm est-elle vérifiée? Si cela est judicieux, faire un ajustement linéaire afin de déterminer une valeur de la résistance $R_c \pm u(R_c)$ du circuit. Utiliser la fonction `linfitxy` de python pour réaliser l'ajustement linéaire.

Question 5

Recommencer l'expérience à l'aide du circuit en longue dérivation et estimer la résistance du circuit, notée $R_l \pm u(R_l)$.

14.2.3. — Interprétation**Question 6**

Comparer les valeurs mesurées R_c et R_l . Peut-on dire que la même grandeur a été mesurée dans les deux expériences? On effectuera un test en Z pour argumenter la réponse en précisant l'hypothèse nulle H_0 testée et en utilisant un risque de 5%. Quelle circuit est le mieux adapté à la mesure de la résistance du résistor dans ce cas?

Question 7

Déduire des mesures de R_c et R_l la valeur de la résistance interne du voltmètre, $R_V \pm u(R_V)$. On pourra utiliser la réponse à la question 2.

Question 8

Mesurer directement à l'aide du multimètre AM-535-EUR la résistance du voltmètre CV130 sur le calibre 20V. Comparer la mesure avec le résultat de la question précédente. On utilisera un test en Z en précisant l'hypothèse nulle H_0 testée et en utilisant un risque de 5%. Commenter.

TRAVAUX PRATIQUES 15

LOIS DES CIRCUITS

ÉCLAIREMENT D'AMPOULES

Objectifs de la séance

- Réaliser des montages électriques correspondant à des schémas simples.
- Reconnaître les deux régimes : source de tension et source de courant.
- Prédire l'effet de la mise en série ou en parallèle d'ampoules et d'éléments résistifs.
- Faire le lien entre l'éclairement d'une lampe à incandescence et le courant qui la parcourt et la tension à ses bornes.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* jusqu'au paragraphe 10 inclus doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP15* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

15.1. — Préparation

15.1.1. — Lampe à incandescence

Une lampe à incandescence est un dispositif d'éclairage bientôt obsolète¹⁸ qui permet de produire de la lumière (figure 5). L'élément éclairant est un mince filament de tungstène qui est

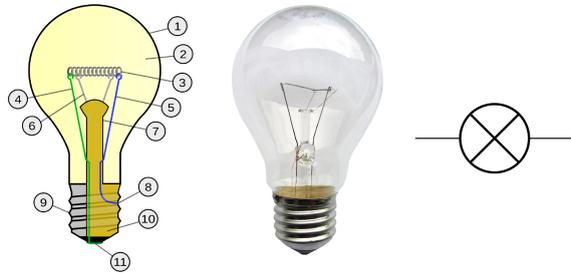


FIGURE 5 – **Gauche** : description schématisée d'une lampe à incandescence. (1) Ampoule de verre, aussi appelée bulbe. (2) Gaz inerte. (3) Filament de tungstène. (4) Fil conducteur (contact avec le plot central). (5) Fil conducteur (contact avec le culot). (6) Fil de support du filament. (7) Monture ou support en verre. (8) Culot (contact électrique). (9) Culot (pas de vis ou baïonnette, etc.). (10) Isolant. (11) Plot central (contact électrique). **Centre** : photographie d'une lampe à incandescence. **Droite** : symbole normalisé d'une lampe à incandescence.

traversé par un courant. Par effet Joule, sa température s'élève au-delà de 2000°C et il émet de la lumière visible. Les caractéristiques de cette lumière sont prédites au premier ordre par la loi du corps noir. Pour éviter l'oxydation du filament, il est placé dans une atmosphère inerte, souvent du diazote, parfois un gaz inerte comme l'argon, que l'enceinte de verre, appelée bulbe ou ampoule, permet de confiner. La lampe est placée dans une douille reliée à l'alimentation électrique. Le plot, souvent en alliage à base de cuivre, et le culot, souvent en plomb, assurent la qualité du contact électrique.

15.1.2. — Valeur nominale

Sur la plupart des composants électriques, on trouve inscrite la tension nominale. Il s'agit de la tension U_{nom} sous laquelle le fabricant d'un appareil estime qu'il doit fonctionner. Une tension supérieure est susceptible de raccourcir sa durée de vie, voire de le détruire. Il faut donc s'efforcer de ne pas dépasser cette valeur nominale. D'un autre côté, une tension inférieure à la valeur nominale risque d'empêcher l'appareil de fonctionner normalement. On trouve aussi parfois inscrite l'intensité nominale, c'est-à-dire l'intensité I_{nom} du courant qui doit en principe traverser l'appareil dans des conditions normales de fonctionnement. Enfin, il est souvent indiqué la puissance nominale. C'est la puissance P_{nom} que l'appareil dissipe dans les conditions normales de fonctionnement. Dans le cas d'un dipôle ohmique comme l'est une lampe à incandescence au premier ordre, ces trois grandeurs sont reliées par la relation :

$$P_{\text{nom}} = U_{\text{nom}} I_{\text{nom}} \quad (6)$$

Si l'une des grandeurs (tension, intensité ou puissance) est égale à sa valeur nominale, alors les deux autres le sont aussi en principe.

¹⁸. Les lampes à incandescence ont été inventées à la fin du XIX^e siècle. D'autres sources de lumière ont fait leur apparition récemment avec des caractéristiques colorimétriques équivalentes, un meilleur rendement et un temps de vie plus long. De ce fait, l'Union Européenne interdit progressivement les lampes à incandescence depuis 2008.

Question 1

Sur une lampe à incandescence, on lit $6V, 0.1A$. Quelle est la puissance nominale de cette lampe? Si on alimente cette lampe avec une alimentation stabilisée en tension, quelle consigne utiliser? Même question avec une alimentation stabilisée en courant.

15.1.3. — Circuits élémentaires en série

Question 2

On note \mathcal{E}_1 l'éclairement¹⁹ de la lampe du circuit 1 de la Figure 6.

- Prédire si l'éclairement $\mathcal{E}_{i,j}$ de la lampe j dans le circuit i est plus ou moins important que \mathcal{E}_1 .
 - Quand cela est possible, donner l'expression de $\mathcal{E}_{i,j}$ en fonction de \mathcal{E}_1 ou d'un autre $\mathcal{E}_{i',j'}$.
- Noter tous les calculs et raisonnements dans le notebook. Toutes les lampes sont identiques.

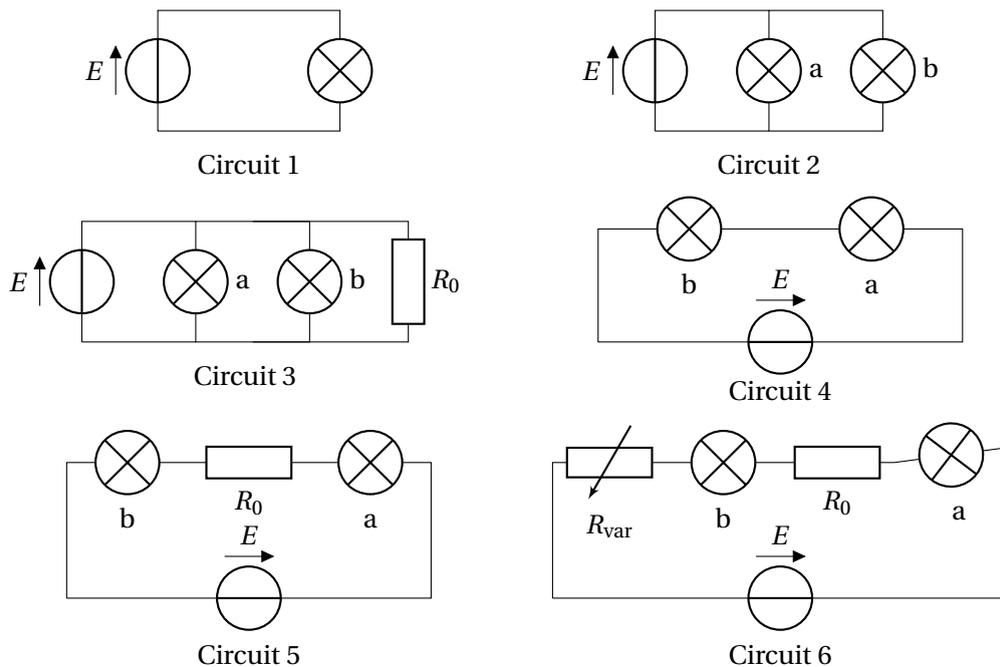


FIGURE 6 – Circuits électriques.

15.2. — Expériences

15.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- une alimentation stabilisée (TTi EX2020R ou Besetech BT305) ;
- deux lampes à incandescence sur lesquelles est gravé 6V 0.1A.
- trois résistors dont la résistance nominale vaut 47Ω .
- un potentiomètre monté en résistance variable entre 4Ω et 250Ω .
- un support à composants
- des câbles électriques
- deux multimètres Voltcraft VC130

Il est impératif de respecter les consignes de l'alimentation stabilisée.

19. L'éclairement est la puissance reçue par unité de surface normale à la propagation.

15.2.2. — Protocole : circuits 1 à 4

Régler la consigne de l'alimentation sur 6V et 0,4A.

Question 3

Réaliser le circuit 1. Relever la tension U et le courant I délivrés par l'alimentation. Utiliser des multimètres pour mesurer la tension aux bornes de la lampe et le courant qui la traverse. Se reporter aux TP précédents pour le calcul des incertitudes. Enfin, apprécier l'éclairement \mathcal{E}_1 de la lampe. Remplir le tableau de mesure du notebook.

Question 4

L'alimentation stabilisée est-elle bien utilisée comme une source idéale de tension? Justifier.

Question 5

Réaliser ensuite les circuits 2 à 4. Pour chacun, relever la tension et le courant délivrés par l'alimentation, la tension aux bornes de la lampe a et le courant qui la traverse. Comparer les éclairagements des lampes a et b avec \mathcal{E}_1 . Est-ce en accord avec les prédictions théoriques faites dans la préparation?

15.2.3. — Protocole : circuits 4 à 6**Question 6**

Régler la consigne de l'alimentation sur 12V et 0,1A et alimenter le circuit 4.

Faire les mêmes mesures et observations qu'à la question 5. Que conclure sur le lien entre tension, intensité et éclairement des lampes à incandescence?

Question 7

Faire les mêmes mesures et observations pour chaque circuit 5 et 6 avec la nouvelle consigne 12V et 0,1A. Commenter.

TRAVAUX PRATIQUES 16

LOIS DE SNELL-DESCARTES (PARTIE 1)

MESURER UN ANGLE

Objectifs de la séance

- Apprendre à se servir d'une source laser.
- Mesurer un angle.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours 2022* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP16* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

16.1. — Préparation

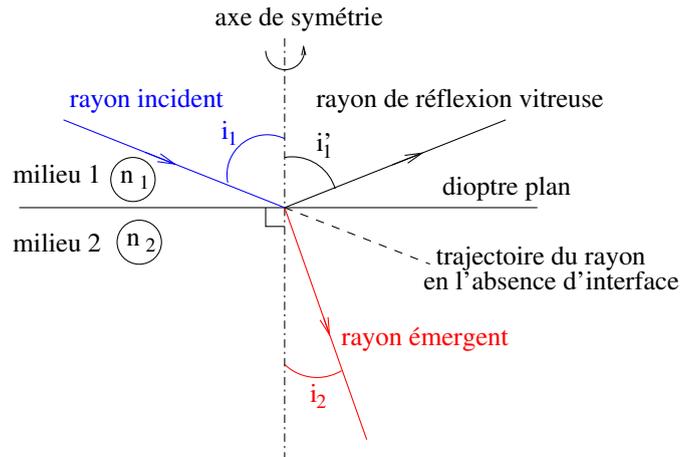


FIGURE 7 – Réflexion et réfraction sur un dioptre plan séparant deux milieux d'indices optiques n_1 et n_2 . L'angle d'incidence est i_1 , l'angle de réfraction est i_2 et l'angle de réflexion est i'_1 .

16.1.1. — Lois de Snell-Descartes

Soit un rayon lumineux (en bleu sur la figure 7) qui arrive à une interface plane entre deux milieux d'indices optiques n_1 et n_2 . Dans le cas général, le rayon est divisé en un rayon réfléchi (en noir) et un rayon réfracté (en rouge). Le document le plus ancien qui décrit ce comportement est signé Ibn Sahl et date de 983. Cependant, Ibn Sahl ne fait apparaître aucune constante qui pourrait être reliée aux indices optiques n_1 et n_2 . Plusieurs siècles plus tard, Snell en 1621 et Descartes en 1637 publient indépendamment les lois qui portent aujourd'hui leurs noms et qui s'appliquent à des milieux transparents (pas d'absorption d'énergie), homogènes (propriétés identiques dans tout l'espace) et isotropes (propriétés indépendantes de l'orientation).

Lois de Snell-Descartes²⁰

1. **Loi 1 : les rayons réfracté et réfléchi sont dans le plan d'incidence qui contient le rayon incident et la normale à l'interface entre les deux milieux.**
2. **Loi 2 : l'angle de réflexion i'_1 est égal à l'angle d'incidence i_1 .**
3. **Loi 3 : l'angle de réfraction i_2 est lié à l'angle d'incidence et aux indices optiques n_1 et n_2**

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) \quad (7)$$

Question 1

Soit un faisceau incident qui vient frapper avec un angle de 35 degrés la surface d'une cuve remplie de 3 milieux (en partant de la surface) : alcool, huile et eau. Ces liquides ne se mélangent pas car leurs densités sont différentes. C'est un mélange hétérogène. L'angle de réfraction entre l'air et l'alcool est de 25 degrés, l'angle de réfraction entre l'alcool et l'huile est de 23 degrés. Faire un schéma. Calculer les indices optiques de l'alcool et de l'huile. Calculer l'angle de réfraction entre l'huile et l'eau sachant que l'indice de l'eau est 1,33.

²⁰. Si vous voyagez sur notre planète, vous verrez que certaines personnes ne connaissent que les lois de Snell et d'autres que les lois de Descartes. Cela dépend du pays d'origine mais ce sont les mêmes lois.

16.2. — Expériences

16.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- un laser rouge
- une demi-lune en plexiglas
- des épingles
- un plateau en liège
- une feuille de papier millimétré

16.2.2. — Laser : pourquoi est-ce dangereux?

Les lasers (acronyme de *light amplification by stimulated emission of radiation*) que vous utilisez dans ce TP sont des sources lumineuses qui émettent un faisceau lumineux dont l'énergie est concentrée sur une petite surface (la section du faisceau).

Pourquoi est-ce dangereux? Parce qu'il n'y a pas de terminaisons nerveuses dans nos yeux. Ainsi, si le faisceau atteint notre rétine, il peut brûler les cellules réceptrices de l'œil sans qu'on s'en rende compte (puisqu'on ne ressent aucune douleur).

Pourquoi est-ce grave? Quand on se brûle la peau, les cellules détruites de la peau sont remplacées : la peau se régénère. Les cellules de la rétine n'ont pas cette capacité. Si elles sont détruites, elles ne sont pas remplacées et on perd une partie du champ visuel.

Conclusions quand vous manipuler un laser :

1. Faites très attention à vos yeux!
2. **Faites très attention aux yeux de vos camarades!** Surveillez les réflexions du faisceau lorsque vous le manipulez.

16.2.3. — Protocole

Dans cette expérience, on étudie la réflexion et la réfraction d'un faisceau laser qui éclaire une interface plane air-plexiglas.

L'objectif de ce TP et du suivant est de confronter l'expérience aux lois 2 et 3 de Snell-Descartes.

Le protocole est le suivant (voir figure 8) :

1. Placer une feuille de papier millimétré sur le support en liège.
2. Placer la demi-lune de plexiglas au centre de la feuille de telle sorte que le centre O de la face plane de la demi-lune soit au croisement de lignes épaisses verticale et horizontale.
3. Passer le crayon tout autour de la demi-lune afin de marquer sur le papier millimétré sa position. Bien conserver la même position de la demi-lune durant toutes les mesures.
4. Éloigner le faisceau laser de 10 – 15 cm de la demi-lune et fixer l'angle d'incidence i_1 entre 0 et $\pi/2$ en visant le centre O de la demi-lune au milieu de sa face plane.²¹
5. Les épingles permettent de repérer les faisceaux (lorsque l'épingle est sur le trajet du faisceau, elle s'illumine). Repérer à l'aide d'épingles dans cet ordre :

21. Pour pointer le même point O à chaque mesure, on peut temporairement replacer l'épingle dans le même trou au début de chaque mesure pour vérifier que le faisceau incident frappe la surface au même point O .

- 2 points sur le trajet du faisceau réfléchi;
- 2 points sur le trajet du faisceau réfracté à travers la demi-lune;
- 2 points sur le trajet du faisceau incident.

Pour chaque angle incident, numéroté les 6 points sur la feuille de papier millimétré avec le même numéro (1 pour le premier angle d'incidence, 2 pour le deuxième, etc).

6. Recommencer les étapes 4 à 5 pour une dizaine d'angles d'incidence répartis entre 0 et $\pi/2$ (exclure $\pi/2$ qui est un cas difficile à mesurer).
7. Retirer la demi-lune et tracer les droites reliant chaque faisceau représentés par 2 points. Ils doivent tous se rejoindre au centre O .
8. Mesurer les angles i_1 , i'_1 et i_2 à l'aide d'un rapporteur.

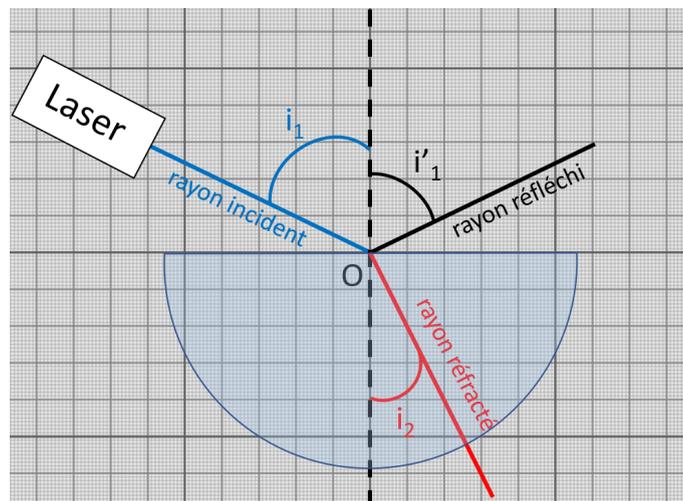


FIGURE 8 – Schéma de l'expérience. Le faisceau laser est représenté en bleu, le faisceau réfléchi en noir et le faisceau réfracté en rouge. La demi-lune est en bleu clair, la normale à la surface en pointillés noirs et le quadrillage de la feuille en noir.

16.2.4. — Mesurages

Question 2

Suivre le protocole et remplir le tableau de mesures de i_1 , i'_1 et i_2 dans le notebook. Quelles sont les sources possibles d'incertitude? Laquelle domine? Compléter le tableau de mesures avec les incertitudes $u(i_1)$, $u(i'_1)$ et $u(i_2)$.

L'interprétation des données se fera au prochain TP.

TRAVAUX PRATIQUES 17

LOIS DE SNELL-DESCARTES (PARTIE 2)

CHANGEMENT DE VARIABLES ET PROPAGATION DES INCERTITUDES

Objectifs de la séance

- Étudier les lois de Snell-Descartes.
- Utiliser python pour tracer un graphique montrant des mesures expérimentales et une courbe théorique.
- Faire un ajustement linéaire à l'aide de python.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé, l'énoncé du TP16 et les *Notes de cours 2022* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP17* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

17.1. — Préparation

Les notations sont les mêmes que dans la figure 7 du TP16.

17.1.1. — Ajustement linéaire et changement de variables

Pour plusieurs valeurs de l'angle d'incidence i_1 , Zygomette a utilisé un montage expérimental pour mesurer d'une part l'angle i'_1 que le rayon réfléchi fait avec la normale à la surface et d'autre part, l'angle i_2 défini entre la normale à la surface et le rayon réfracté. Pour interpréter ses mesures, Zygomette utilise python et la fonction `linfitxy` qui permet de faire un ajustement linéaire au sens des moindres carrés.

Question 1

Quel graphique peut-elle tracer pour vérifier par ajustement linéaire si ses mesures sont en accord avec la deuxième loi de Snell-Descartes ($i'_1 = i_1$) ?

Question 2

Même question pour vérifier par ajustement linéaire si ses mesures sont en accord avec la troisième loi de Snell-Descartes ($n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$).

Donner les expressions de l'ordonnée Y et l'abscisse X de ce graphique en fonction de i_1 et i_2 . Déterminer $u(Y)$ et $u(X)$ en fonction des angles i_1 et i_2 et des incertitudes-types sur les angles $u(i_1)$ et $u(i_2)$.

17.1.2. — Interprétation

Lors du TP16, vous avez mesurés i_1 , i'_1 , i_2 et vous avez déterminé $u(i_1)$, $u(i'_1)$ et $u(i_2)$.

Question 3

Définir les vecteurs i_1 et i'_1 puis les vecteurs $u(i_1)$ et $u(i'_1)$ sous python.

Faire un ajustement linéaire en utilisant `linfitxy` pour vérifier si les mesures sont en accord avec la deuxième loi de Snell-Descartes (cf. la réponse à la question 1). Conclure.

Question 4

Définir les vecteurs i_2 et $u(i_2)$ sous python.

En utilisant le résultat de la question 2, calculer sous python les vecteurs X , Y , $u(X)$ et $u(Y)$.

Remarque : penser à convertir les angles en radian car les sinus et cosinus d'un angle en python sont calculés en supposant un angle en radian.

Faire un ajustement linéaire en utilisant `linfitxy` pour vérifier si les mesures sont en accord avec la troisième loi de Snell-Descartes. Conclure.

Question 5

L'indice optique de l'air n_1 est égal à 1. En utilisant le résultat de l'ajustement linéaire de la question précédente, déterminer l'indice optique n_2 du plexiglas ? Préciser l'incertitude $u(n_2)$.

TRAVAUX PRATIQUES 18

LENTILLE CONVERGENTE

LOI DE CONJUGAISON

Objectifs de la séance

- Utiliser la loi de conjugaison des lentilles minces avec une lentille convergente;
- Mesurer une distance focale;
- Mesure un grandissement transversal.

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP18* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

18.1. — Préparation

La figure 9 représente un objet AB et son image $A'B'$ par une lentille convergente \mathcal{L} de focale f . Trois rayons issus de l'objet B et passant par l'image B' sont tracés. La loi de conjugaison des

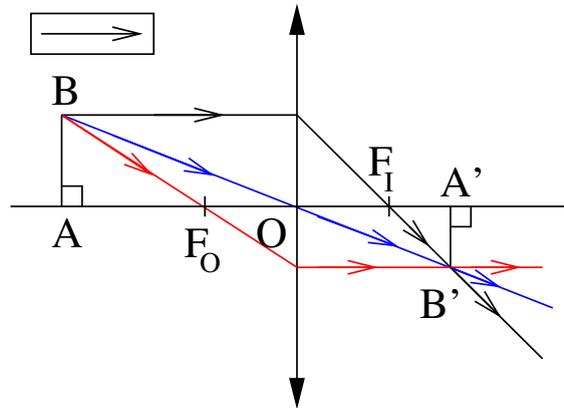


FIGURE 9 – Formation de l'image $A'B'$ de l'objet AB à travers une lentille convergente \mathcal{L} de focale $f = \overline{OF_1} = \overline{F_0O}$.

lentilles minces relie la distance focale f (ou la vergence \mathcal{C}) de la lentille aux positions de l'objet A et de l'image A' par rapport au centre optique de la lentille O :

$$A \xrightarrow{\mathcal{L}} A' \quad \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f} = \mathcal{C} \quad (8)$$

La notation $A \xrightarrow{\mathcal{L}} A'$ signifie que A' est l'image de A par la lentille \mathcal{L} .

18.1.1. — Position de l'image

Si l'objet A se trouve en amont de la lentille (à gauche sur la figure), il est réel. S'il est en aval (à droite sur la figure), il est virtuel.

Si l'image A' se trouve en aval de la lentille, elle est réelle. Si elle est en amont, elle est virtuelle.

Question 1

Dans les quatre cas suivants, préciser si l'image est réelle ou virtuelle et donner sa position par rapport aux foyers (en amont de F_0 , entre F_0 et O , entre O et F_1 ou en aval de F_1) :

- A est réel telle que $|\overline{OA}| > f$;
- A est réel telle que $|\overline{OA}| < f$;
- A est virtuel telle que $|\overline{OA}| < f$;
- A est virtuel telle que $|\overline{OA}| > f$.

Un schéma pour chaque cas pourra illustrer la réponse.

18.1.2. — Détermination de la focale

Il est souvent nécessaire de mesurer la focale d'une lentille. Voici deux protocoles qui permettent de le faire.

Protocole 1

- positionner l'objet (un 1 ou un \mathbb{F}) au plus près de la lampe;
- fixer la position de la lentille convergente telle que la distance entre l'objet A et le centre O de la lentille, distance $|\overline{OA}|$, soit *suffisamment grande*;
- déplacer l'écran jusqu'à obtenir une image nette;
- mesurer \overline{OA} et $\overline{OA'}$ (attention au signe) et estimer les incertitudes associées;
- utiliser la loi de conjugaison pour déterminer la vergence $\mathcal{C} \pm u(\mathcal{C})$
- en déduire la focale $f \pm u(f)$.

Protocole 2 Répéter le protocole 1 pour plusieurs distance \overline{OA} et faire un ajustement de la loi de conjugaison pour déterminer $\mathcal{C} \pm u(\mathcal{C})$. En déduire $f \pm u(f)$ de \overline{OA} et $u(\overline{OA})$.

Question 2

Pour le protocole 1, exprimer l'incertitude-type sur \mathcal{C} en fonction de \overline{OA} , $\overline{OA'}$, $u(\overline{OA})$ et $u(\overline{OA'})$.

Question 3

Exprimer f et $u(f)$ en fonction de \mathcal{C} et $u(\mathcal{C})$.

Question 4

Quelles peuvent être les sources d'incertitudes sur la détermination de \overline{OA} et $\overline{OA'}$? Pour chacune d'elle, de quel type sont-elles et comment les estimer expérimentalement?

Question 5

En suivant le protocole 2, on a un ensemble de valeurs \overline{OA} auxquelles sont associées un ensemble de valeurs de $\overline{OA'}$. Quel graphique peut-on tracer pour vérifier la loi de conjugaison à l'aide d'un ajustement linéaire? Préciser les expressions des grandeurs tracées en abscisse X , en ordonnées Y et les incertitudes associées $u(X)$ et $u(Y)$.

Question 6

Dans ce graphique, exprimer l'ordonnée à l'origine en fonction de la vergence \mathcal{C} .

18.1.3. — Grandissement transverse

Le grandissement transverse à travers une lentille est donné par l'expression :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \quad (9)$$

avec \overline{AB} et $\overline{A'B'}$ les tailles transverses d'un objet AB et de son image $A'B'$.

Si le grandissement est positif, alors l'objet et l'image sont dans le même sens; s'il est négatif, l'image est renversée par rapport à l'objet.

Si la valeur absolue du grandissement est supérieure à 1 ($|\gamma| > 1$), alors l'image est plus grande que l'objet. Si elle est plus petite que 1 ($|\gamma| < 1$), l'image est plus petite que l'objet.

Question 7

Déterminer l'incertitude $u(\gamma)$ sur le grandissement en fonction des incertitudes $u(\overline{AB})$ et $u(\overline{A'B'})$.

18.2. — Études expérimentales

18.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- un objet asymétrique (un 1 ou un F)
- une source de lumière avec condenseur
- une lentille convergente de focale inconnue valant entre 15 cm et 50 cm
- un rail optique
- des supports
- un écran
- un régllet métallique de 1 m

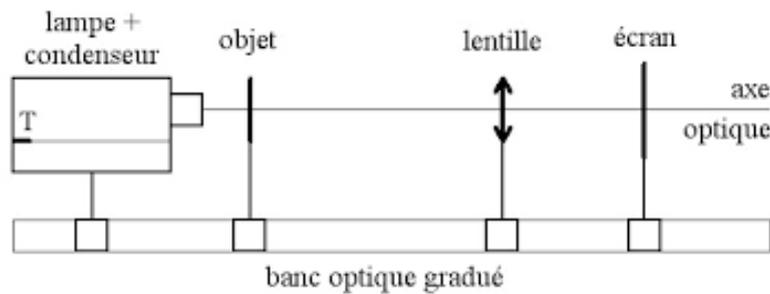


FIGURE 10 – Schéma du montage.

18.2.2. — Détermination de la focale d'une lentille convergente

Question 8

Fixer $|\overline{OA}|$ entre 30 cm et 100 cm et appliquer le protocole 1 pour déterminer une première estimée de la vergence $\mathcal{C} \pm u(\mathcal{C})$. En déduire une mesure de la focale $f \pm u(f)$.

Question 9

Suivre le protocole 2 et remplir le tableau de mesures pour $|\overline{OA}|$ variant de 30 à 100 cm. Pour chaque position de la lentille, mesurer également la taille de l'objet \overline{AB} et de l'image $\overline{A'B'}$.

Question 10

Tracer le graphique décrit à la question 6 de la préparation et déterminer la vergence $\mathcal{C} \pm u(\mathcal{C})$ à l'aide d'un ajustement linéaire. En déduire une deuxième mesure de la focale $f \pm u(f)$.

Question 11

Comparer les estimations de la focale des questions 9 et 11 en utilisant un test en Z en précisant l'hypothèse nulle et en utilisant un risque de 5%.

18.2.3. — Détermination du grandissement

Question 12

Pour chaque valeur \overline{OA} , calculer

- le grandissement γ et son incertitude associée;
- le rapport $\alpha = \overline{OA'}/\overline{OA}$ et l'incertitude associée.

Question 13

Tracer le grandissement γ en fonction du rapport α . En déduire une autre expression du grandissement.

TRAVAUX PRATIQUES 19

MESURE DE LA DISTANCE FOCALE D'UNE LENTILLE DIVERGENTE

Objectifs de la séance

- Mesurer la focale d'une lentille divergente
- Réaliser des mesures d'optique géométrique

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP19* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

19.1. — Préparation

La figure 11 représente un objet AB et son image $A'B'$ par une lentille divergente de focale f et de centre O . Trois rayons issus de l'objet B et passant par l'image B' sont tracés. Les rayons réels sont en trait plein : la lumière passe réellement par là. Les rayons virtuels sont en tirets : la lumière ne passe pas par là à cause de la lentille.

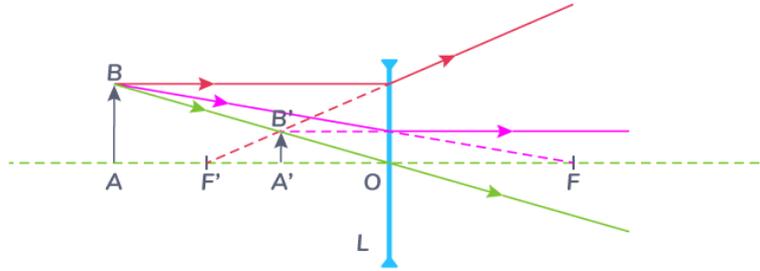


FIGURE 11 – Formation de l'image $A'B'$ de l'objet AB par une lentille divergente de focale $\overline{OF'}$.

19.1.1. — Position de l'image

Si l'objet A se trouve en amont de la lentille (à gauche sur la figure), il est réel. S'il est en aval (à droite sur la figure), il est virtuel.

Si l'image A' se trouve en aval de la lentille, elle est réelle. Si elle est en amont, elle est virtuelle.

Question 1

Dans les quatre cas suivants, préciser si l'image est réelle ou virtuelle et donner sa position par rapport aux foyers (en amont de F' , entre F' et O , entre O et F ou en aval de F) :

- A est réel tel que $|\overline{OA}| > f$;
- A est réel tel que $|\overline{OA}| < f$;
- A est virtuel tel que $|\overline{OA}| < f$;
- A est virtuel tel que $|\overline{OA}| > f$.

Un schéma pour chaque cas pourra illustrer la réponse.

Question 2

Généralement, on est dans le cas d'un objet réel avec $|\overline{OA}| > f$. Pourquoi ne peut-on pas utiliser les protocoles mis en place pour la mesure de la focale d'une lentille convergente (voir TP18).

19.1.2. — Rendre réelle l'image d'une lentille divergente

Pour déterminer la focale f de la lentille divergente \mathcal{L} , on ajoute après elle une lentille convergente \mathcal{L}_c de centre O' et de focale f_c connue. L'image $\overline{A'B'}$ donnée par la lentille divergente devient alors l'objet de la lentille convergente qui en fait une image $\overline{A''B''}$ comme si la lentille divergente n'existait pas. En utilisant la notation $A \xrightarrow{\mathcal{L}} A'$ qui signifie que A' est l'image de A par la lentille \mathcal{L} , on peut résumer le montage des deux lentilles par :

$$A \xrightarrow{\mathcal{L}} A' \xrightarrow{\mathcal{L}_c} A''$$

Question 3

Tracer le schéma optique de la formation d'une image $\overline{A'B'}$ d'un objet \overline{AB} au travers une lentille divergente (schéma de la figure 11), ajouter la lentille convergente à une distance $\overline{OO'} > f_c$ et construire graphiquement l'image $\overline{A''B''}$. L'image est-elle réelle?

19.1.3. — Détermination de la focale

Les lois de conjugaison s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f} = \mathcal{C} \quad A \xrightarrow{\mathcal{L}} A' \\ \frac{1}{\overline{O'A''}} - \frac{1}{\overline{O'A'}} = \frac{1}{f_c} = \mathcal{C}_c \quad A' \xrightarrow{\mathcal{L}_c} A'' \end{array} \right.$$

Pour déterminer \mathcal{C} (et donc f), on mesure \overline{OA} , $\overline{O'A''}$ et $\overline{OO'}$. On déduit $\overline{O'A'}$ de $\overline{O'A''}$ de la deuxième équation. Puis, on trouve \mathcal{C} à partir de \overline{OA} , $\overline{O'A'}$, $\overline{OO'}$ et de la première équation.

Cela permet de définir un premier protocole.

Protocole 1

- fixer l'objet A (un 1 ou un \mathbb{F}) au plus près de la lampe;
- fixer l'écran d'observation à $D = 1$ m de l'objet;
- fixer la position de la lentille divergente de centre O et ainsi la distance $|\overline{OA}|$;
- ajuster la position de la lentille convergente de centre O' de telle sorte que l'image A'' soit nette sur l'écran;
- mesurer \overline{OA} , $\overline{O'A''}$ et $\overline{OO'}$ en estimant à chaque fois les incertitudes;
- calculer la distance $\overline{O'A'} \pm u(\overline{O'A'})$ à partir des mesures et de la deuxième équation;
- en déduire $\overline{OA'} \pm u(\overline{OA'})$ grâce à $\overline{OA'} = \overline{OO'} + \overline{O'A'}$;
- calculer $\mathcal{C} \pm u(\mathcal{C})$ et en déduire $f \pm u(f)$.

Question 4

Exprimer $\overline{O'A'}$ et l'incertitude-type associée $u(\overline{O'A'})$ en fonction de $\overline{O'A''}$, f_c et leurs incertitudes-types. Remarque : on peut commencer par exprimer $\alpha = 1/\overline{O'A'}$ et $u(\alpha)$.

Question 5

Déterminer les expressions de $\overline{OA'}$ et de son incertitude-type.

Question 6

Rappeler les expressions de \mathcal{C} et de son incertitude-type en fonction de \overline{OA} et $\overline{OA'}$, puis celles de f et $u(f)$ en fonction de \mathcal{C} et $u(\mathcal{C})$ (cf. la préparation du TP18).

Protocole 2

Le second protocole consiste à suivre le protocole 1 pour plusieurs valeurs de \overline{OA} et à réaliser un ajustement linéaire de $1/\overline{OA'}$ en fonction de $1/\overline{OA}$.

Grandissement transverse

Le grandissement à travers l'ensemble {lentille divergente + lentille convergente} s'écrit :

$$\gamma = \frac{\overline{A''B''}}{\overline{AB}} \quad (10)$$

avec \overline{AB} et $\overline{A''B''}$ les tailles transverses d'un objet AB et de son image finale $A''B''$.

19.2. — Études expérimentales

19.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- un objet asymétrique (un 1 ou un F)
- une source de lumière et un condenseur
- une lentille divergente de focale inconnue
- une lentille convergente de focale +20 cm avec un demi-intervalle de certitude de 5%.
- un rail optique
- des supports
- un écran
- un réglet métallique de 1 m

19.2.2. — Détermination de la focale d'une lentille divergente

Question 7

Fixer la distance $D = 1$ m entre l'objet A et l'écran. Fixer la distance $|\overline{OA}|$ à une valeur entre 10 et 30 cm. Appliquer le protocole 1 pour mesurer ou déterminer par le calcul, dans cet ordre :

- $\overline{O'A''} \pm u(\overline{O'A''})$;
- $\overline{OO'} \pm u(\overline{OO'})$;
- $\overline{O'A'} \pm u(\overline{O'A'})$;
- $\overline{OA'} \pm u(\overline{OA'})$;
- $\mathcal{C} \pm u(\mathcal{C})$;
- $f \pm u(f)$.

Question 8

Suivre le protocole 2 et remplir le tableau de mesures avec $|\overline{OA}|$ variant de 10 à 30 cm. Pour chaque valeur de \overline{OA} , mesurer la taille de l'objet \overline{AB} et de l'image finale $\overline{A''B''}$.

Question 9

Tracer $1/\overline{OA'}$ en fonction de $1/\overline{OA}$ et utiliser la fonction `linfitxy` pour déterminer la vergence $\mathcal{C} \pm u(\mathcal{C})$ de la lentille divergente. En déduire $f \pm u(f)$.

Question 10

Comparer les estimations de la focale des questions 7 et 9 en utilisant un test en Z en précisant l'hypothèse nulle et en utilisant un risque de 5%.

19.2.3. — Détermination du grandissement des deux lentilles

Question 11

Pour chaque valeur \overline{OA} , calculer le grandissement total γ et son incertitude associée.

Question 12

Le grandissement total est le produit du grandissement de chaque lentille : $\gamma = \gamma_d \gamma_c$ avec γ_d le grandissement de la lentille divergente et γ_c celui de la lentille convergente. Pour une valeur $\overline{O'A'}$ de ce TP proche d'une valeur \overline{OA} du TP précédent, donner γ_c . En déduire la valeur associée du grandissement de la lentille divergente.

TRAVAUX PRATIQUES 20

POLARISATION LINÉAIRE DE LA LUMIÈRE

LOI DE MALUS

Objectifs de la séance

- Utiliser des polariseurs linéaires
- Faire une mesure photométrique avec un capteur CCD

Documents de référence

Avant la séance, cet énoncé et les *Notes de cours* doivent être lus et assimilés.

Documents à remettre

Vous devez avoir préparé la séance en ayant lu attentivement l'énoncé, puis répondu aux **questions de préparation**. Sans cette préparation faite, vous n'aurez pas accès à la salle de TP.

À la fin de la séance, vous devez **avoir rempli et rendu le compte rendu** en le déposant dans le dossier *Compte rendu TP20* sur Moodle. Vous pouvez ajouter des fichiers numériques (photographies ou autres).

Interrogation de TP

Les séances de TP servent de préparation à l'évaluation pratique individuelle qui aura lieu la semaine du 22 mai 2023. Mettez-les à profit avec discernement!

20.1. — Préparation

L'intensité lumineuse \mathcal{I} enregistrée par un détecteur est la moyenne temporelle sur le temps de pose du carré de l'amplitude du champ électrique \vec{E} . Si le champ s'écrit $E(t) = E_0 \cos(\omega t)$ avec ω la pulsation de l'onde et t le temps, alors \mathcal{I} est proportionnelle à E_0^2 ($\mathcal{I} \propto E_0^2$).

20.1.1. — Champ électrique et polarisation

Le champ $\vec{E}(t)$ est perpendiculaire à la direction de propagation du faisceau. Si le faisceau est collimaté et parallèle à l'axe optique, noté (Oz) , le champ électrique est a priori dans n'importe quelle direction perpendiculaire à (Oz) .

Question 1

On appelle $E_x(t) = E_0 \cos(\omega t)$ et $E_y(t) = E_0 \cos(\omega t + \phi(t))$ les composantes du champ électrique selon (Ox) et (Oy) , avec E_0 une constante. On note \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z les vecteurs unitaires sur les trois axes cartésiens. Exprimer $\vec{E}(t)$ en fonction de $E_x(t)$ et $E_y(t)$.

Dans le cas général, le champ $\vec{E}(t)$ oscille (termes en $\cos(\omega t)$) et tourne (variation temporelle de $\phi(t)$) dans le plan (xOy) en balayant uniformément toutes les directions de ce plan pendant le temps de pose : la lumière est non polarisée. Dans des cas particuliers, le champ \vec{E} oscille dans une unique direction (et ne tourne pas) : la lumière est polarisée linéairement²².

Question 2

Dans la pratique, on peut créer un faisceau polarisé linéairement en utilisant un polariseur linéaire, appelé P, qui ne laisse passer qu'une seule direction d'oscillation du champ électrique. Si cette direction est selon \vec{u}_θ (vecteur unitaire), l'amplitude du champ après le polariseur est $\vec{E} \cdot \vec{u}_\theta$ avec \vec{E} le champ avant le polariseur.

Exprimer le champ $\vec{E}_P(t)$ après un polariseur linéaire orienté selon (Ox) si le champ \vec{E} est celui de la question 1.

Question 3

Exprimer l'intensité lumineuse \mathcal{I}_P mesurée derrière ce polariseur linéaire en fonction de E_0 .

Remarque importante : on peut montrer que, dans le cas où un polariseur linéaire est placé dans un faisceau non polarisé, l'intensité mesurée derrière le polariseur est la même pour toutes les orientations du polariseur.

20.1.2. — Loi de Malus

On suppose un champ électrique $\vec{E}_P = E_0 \cos(\omega t) \vec{u}_x$ polarisé linéairement selon (Ox) . Le faisceau ainsi polarisé éclaire un analyseur, appelé A, constitué d'un polariseur linéaire qui fait un angle θ avec (Ox) . Après cet analyseur, le champ est donc orienté selon \vec{u}_θ .

Question 4

Exprimer le champ \vec{E}_A après l'analyseur en fonction de E_0 , ω , t , θ et \vec{u}_θ .

Question 5

Montrer que l'intensité lumineuse \mathcal{I}_A mesurée après l'analyseur s'écrit $\mathcal{I}_A = \mathcal{I}_P \cos^2(\theta)$ avec \mathcal{I}_P définie à la question 3. Il s'agit de la loi de Malus.

22. Une lumière peut également être polarisée circulairement ou elliptiquement. Et elle peut être totalement ou partiellement polarisée. Nous n'aborderons que le cas d'une polarisation totale et linéaire dans ce TP.

Question 6

Représenter \mathcal{I}_A en fonction de θ en justifiant l'intervalle utilisé pour θ .

Question 7

Si on mesure l'intensité \mathcal{I}_A pour plusieurs θ , quel graphique peut-on tracer pour vérifier la loi de Malus à l'aide d'un ajustement linéaire? Donner les expressions de l'ordonnée Y et l'abscisse X de ce graphique en fonction de \mathcal{I}_A et θ . Déterminer $u(Y)$ et $u(X)$ en fonction de \mathcal{I}_A et θ et des incertitudes-types associées.

Rappel : $u(f(\theta)) = \left| \frac{df}{d\theta} \right|^2 u(\theta)$

20.2. — Expérience

20.2.1. — Matériel

Sur chaque paillasse se trouvent :

- une source lumineuse (lampe de bureau)
- deux polariseurs linéaires
- une photodiode DET100A2 de Thorlabs
- un ampèremètre de type Beha-Amprobe AM-535-EUR (cf. TP13 pour les incertitudes)

20.2.2. — Préparation du montage

Pour se rapprocher des conditions décrites dans la préparation, on réalise le schéma optique de la figure 12. Une source (lampe de bureau) est placée à environ 1 m du polariseur linéaire (P

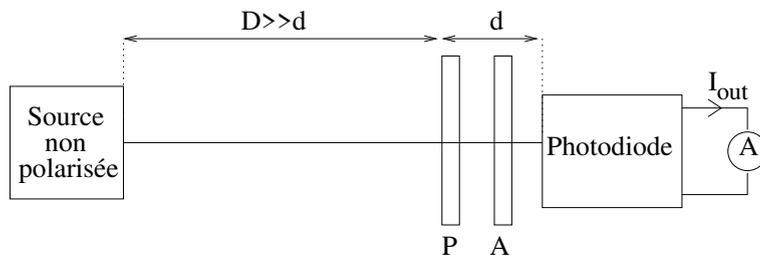


FIGURE 12 – Schéma du montage.

sur la figure). La lumière traverse le polariseur, puis l'analyseur A qui est orienté d'un angle θ par rapport à P. L'intensité lumineuse est alors transformée par la photodiode en une intensité électrique I_{out} mesurée à l'aide d'un ampèremètre.

Question 8

Brancher la photodiode à l'ampèremètre (calibre mA, voire μA). Retirer le capuchon protecteur de la photodiode et mettre l'interrupteur sur ON.

Question 9

Réaliser le montage en prenant soin de mettre à la même hauteur la source, le polariseur, l'analyseur et la photodiode. Vérifier également que la source éclaire horizontalement. Placer le polariseur à environ 1 m de la source. Rapprocher autant que possible le polariseur, l'analyseur et la photodiode tout gardant la possibilité de tourner l'analyseur et de lire la valeur de l'angle sur la monture.

20.2.3. — Intensité électrique délivrée par la photodiode

L'intensité électrique $I_{\text{out,tot}}$ délivrée par la photodiode est égale à la somme d'un courant d'obscurité I_D et d'un courant $I = R \mathcal{I}$ proportionnel à l'intensité lumineuse \mathcal{I} qu'elle reçoit (R est une constante)²³. L'intensité lumineuse \mathcal{I} reçue par la photodiode est la somme de l'intensité lumineuse \mathcal{I}_s qu'on souhaite mesurer (celle qui vient de la source à travers le montage) et de l'intensité lumineuse \mathcal{I}_b qui vient de sources parasites (éclairages du plafond, réflexions sur l'expérimentateur, sur la table, etc). Finalement, l'intensité électrique $I_{\text{out,tot}}$ délivrée par la photodiode est

$$I_{\text{out,tot}} = I_D + R \mathcal{I}_b + R \mathcal{I}_s$$

et le seul signal qui nous intéresse est $I_{\text{out}} = R \mathcal{I}_s$. Pour l'obtenir, on peut :

- mesurer l'intensité électrique avec la source allumée : $I_{\text{out,tot},1} = I_D + R \mathcal{I}_b + R \mathcal{I}_s$
- mesurer l'intensité électrique avec la source éteinte : $I_{\text{out,tot},2} = I_D + R \mathcal{I}_b$

La différence donne I_{out} .

20.2.4. — Faisceau de lumière non polarisée

On ajoute uniquement l'analyseur A devant la photodiode.

Question 10

Mesurer I_{out} pour plusieurs positions θ de l'analyseur. Remarque : en toute rigueur, il faut faire la mesure de $I_{\text{out,tot},2}$ pour chaque position θ car le signal parasite peut être polarisé. Justifier l'incertitude sur chaque mesure.

Question 11

Représenter graphiquement I_{out} en fonction de l'angle θ . Commenter.

20.2.5. — Faisceau de lumière polarisée

On ajoute le polariseur P entre la source et l'analyseur (schéma de la figure 12).

Question 12

Mesurer l'intensité I_{out} en fonction de l'angle θ en suivant la même procédure que précédemment pour retirer la contribution de la lumière parasite. Les mesures sont-elles en accord avec la loi de Malus? On pourra utiliser la réponse à la question 7 de la préparation.

23. Voir la documentation de la photodiode en ligne sur Moodle pour plus d'informations.