

Banque PC inter-ENS - Session 2023

Rapport du jury relatif à l'épreuve de travaux pratiques de physique

• **Écoles partageant cette épreuve** : ENS PARIS, ENS PARIS-SACLAY, ENS DE LYON

• **Coefficients** (en pourcentage du total d'admission de chaque concours) :

- ENS PARIS

Option Physique : 10,3 %

Option Chimie : 0 %

- ENS PARIS-SACLAY

Option Physique : 10,2 %

Option Chimie : 5,1 %

- ENS DE LYON : 7 %

• **Membres du jury** :

Delphine Chareyron, Jérémy Ferrand, Sébastien Garcia, Raphaël Jeanneret, Léa Lachaud, Vincent Langlois, Arnaud Le Diffon, François Marquier, Cendrine Moskalenko, Ludivine Oruba, Hugo Roussille, Benoît Semin

Plan

I. Introduction.....	3
II. Déroulement de l'épreuve.....	4
II. 1. Énoncés.....	5
II. 2. Outils informatiques.....	5
II. 3. Moyens d'évaluation.....	6
II. 4. Pannes de matériel ou incidents.....	6
III. Bilan de l'épreuve 2023.....	7
III. 1. Remarques générales.....	7
III. 2. Traitement informatique.....	9
III. 3. Électricité - Électronique.....	9
III. 4. Mécanique et mécanique des fluides.....	11
III. 5. Optique.....	11
III. 6. Électromagnétisme.....	12
III. 7. Thermodynamique.....	12
III. 8. Ondes.....	12
IV. Compétences évaluées.....	13
IV. 1. Choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux.....	13
IV. 2. Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus.....	13
IV. 3. Mesures et tracés de graphe.....	14
IV. 4. Incertitudes de mesures.....	14
IV. 5. Ajustement des données expérimentales.....	15
IV. 6. Communication des résultats obtenus.....	15
IV. 7. Discussion avec le jury.....	16
V. Évolutions pour la session 2024.....	16
VI. Exemples de sujets donnés à la session 2023.....	16

I. Introduction

L'épreuve de travaux pratiques est une épreuve commune aux trois ENS, d'une durée de 4h. La session 2023 s'est déroulée dans les locaux du département de physique de l'ENS Paris Saclay.

Le jury est composé d'examineurs nommés par les trois ENS et chaque candidat a été interrogé par un binôme d'examineurs provenant d'ENS différentes dans un souci d'harmonisation des notations.

L'épreuve de travaux pratiques est une épreuve expérimentale. Les sujets proposés couvrent l'ensemble du programme des deux années de classes préparatoires aux grandes écoles **PCSI** et **PC**. L'évaluation de l'épreuve de TP porte sur les **compétences** et les connaissances en physique **expérimentale**, à savoir :

- choix des protocoles expérimentaux,
- mise en œuvre des protocoles expérimentaux,
- choix des points de mesures, et soin dans la prise de mesure,
- évaluation des incertitudes,
- ajustement des données expérimentales par un modèle,
- interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus,
- compréhension des phénomènes physiques sous-jacents,
- communication des résultats obtenus.

Notons qu' « expérimentalement » n'est pas synonyme de « qualitativement », et qu'au contraire il est demandé des résultats les plus précis possibles dans la plupart des questions.

Des explications plus détaillées sur les compétences évaluées sont données en partie IV.

II. Déroulement de l'épreuve

Les candidats sont accueillis ensemble pour recevoir les consignes relatives au bon déroulement de l'épreuve. Ils tirent ensuite au sort le numéro du sujet sur lequel ils seront examinés, puis sont amenés dans les salles de travaux pratiques. Ils y découvrent l'énoncé du sujet, et l'épreuve commence. Les candidats sont invités à lire l'énoncé en entier et à identifier le matériel à leur disposition sur la paillasse. Dès le début de l'épreuve, les examinateurs s'entretiennent avec les candidats pour présenter succinctement le sujet et le matériel mis à leur disposition. Si cela est pertinent, les consignes de sécurité sont énoncées et l'utilisation du matériel spécifique est expliquée.

Pendant les 4h d'épreuve, les **examineurs passent régulièrement** pour discuter de la progression des candidats, de leurs résultats et pour leur poser des questions afin de tester leur compréhension et leur démarche expérimentale. En dehors de ces passages réguliers, **les candidats travaillent en autonomie**. Ils peuvent à tout moment appeler ou faire appeler leur binôme d'examineurs, notamment si une question se pose sur l'utilisation ou le fonctionnement d'un des appareils à leur disposition.

Les candidats disposent des 4h d'épreuve pour réaliser les expériences, les mesures, interpréter les résultats et écrire un compte-rendu de leur travail.

À l'issue des 4h d'épreuve, les candidats sont invités à ranger le matériel utilisé et remettre la paillasse dans l'état dans lequel ils l'ont trouvée en arrivant dans la salle. Le jury attend des candidats une bonne tenue de leur paillasse pendant et à l'issue de l'épreuve, pour faire preuve d'une qualité indispensable à un bon expérimentateur et par respect envers les candidats suivants. Des paillasses particulièrement mal tenues sont sanctionnées.

II. 1. Énoncés

Les sujets proposés couvrent l'ensemble du programme de physique des deux années de classes préparatoires aux grandes écoles PCSI et PC : électronique, optique, thermodynamique, électromagnétisme, mécanique, hydrodynamique, etc. Les éventuelles parties qui ne feraient pas appel explicitement au programme sont présentées dans le sujet de manière à donner aux candidats toutes les informations et les bases nécessaires pour effectuer les mesures expérimentales et leurs analyses.

Les énoncés sont relativement courts, le plus souvent entre une à quatre pages, avec des questions volontairement rédigées de manière ouverte pour laisser au candidat une autonomie dans le choix des composants, du protocole, etc. Ils contiennent des indications essentielles pour mener à bien les expériences ainsi que des rappels de règles de sécurité ou des précautions d'emploi de certains matériels. Il est **très fortement conseillé au candidat de lire le sujet en entier** avant de commencer les expériences. Le jury doit trop souvent demander aux candidats de relire une question ou l'introduction du sujet pour qu'il puisse avancer dans son raisonnement. Il est dommage que des candidats soient incapables de répondre à des questions posées par le jury, alors que les réponses sont explicitement dans l'énoncé (par exemple : longueur d'onde d'une lampe). Il est ennuyeux que les consignes de sécurité ne soient pas lues en détail. Certains sujets comportent des figures : là aussi, une lecture attentive permet par exemple de mettre en œuvre le protocole expérimental pertinent. **Une lecture attentive de l'énoncé est indispensable !**

Cette année, nous avons remarqué que des candidats ont « reformulé » des questions de l'énoncé, en choisissant souvent de répondre à une question plus simple, ce qui a été sanctionné. Il est indispensable de **répondre aux questions de l'énoncé**.

Des exemples de sujets sont fournis en fin de ce rapport.

Notices et annexes

Dans certains cas, l'énoncé est complété par des annexes ou des notices simplifiées. Il peut s'agir d'extraits de notice constructeur ou de courtes présentations du fonctionnement des appareils à la disposition des candidats. Les candidats doivent pouvoir en extraire les informations nécessaires à la réalisation des expériences ou à leur analyse, lors de l'estimation des barres d'erreur par exemple. Des notices simplifiées sont souvent fournies pour les capteurs : il est vivement conseillé de les lire avant d'utiliser le capteur en question.

II. 2. Outils informatiques

Lors de cette session, les candidats disposaient d'ordinateurs individuels, sur lesquels ont été installés :

- la distribution Python Anaconda
- le logiciel de tracé scientifique Regressi
- la suite Libre Office et notamment son tableur (type Excel)

Les candidats disposaient d'exemples de programmes Python, qui permettent notamment d'importer des données, de tracer des courbes avec des barres d'erreur et d'ajuster les données de manière linéaire ou non-linéaire.

Les candidats étaient encouragés à utiliser l'un de ces logiciels pour analyser leurs données, tracer les graphes nécessaires ou réaliser les ajustements numériques. Il était demandé aux candidats d'imprimer leurs graphes. Pour cela, ils disposaient d'une clé USB fournie qui leur permettait de transmettre les données de l'ordinateur vers les imprimantes.

Pour certains sujets, des logiciels spécifiques étaient utilisés, leur fonctionnement étant systématiquement expliqué aux candidats.

Certains sujets demandaient l'utilisation de routines Python fournies au candidat, par exemple pour interfacier des cartes Arduino. Le candidat était amené à comprendre le fonctionnement global du script, puis à modifier les données en fonction de ses mesures.

Le jury tient à signaler que la maîtrise de ces logiciels ne faisait pas partie des compétences évaluées. Aussi une aide était systématiquement proposée aux candidats pour l'utilisation de l'un ou l'autre de ces logiciels.

Les calculatrices personnelles étaient interdites. Les candidats disposaient de la calculatrice Windows, de Python, Regressi et LibreOffice.

II. 3. Moyens d'évaluation

Lors de leurs passages réguliers au cours de l'épreuve, **les examinateurs observent les candidats manipuler**. Ils peuvent, en particulier, demander au candidat de répéter une mesure qui n'aurait pas été faite devant eux. Ils posent également des questions pour tester sa compréhension du protocole réalisé, l'interroger sur les choix faits (de matériel, de calibre, etc.) pour mener à bien l'expérience ou encore sur les résultats obtenus et les conclusions qu'il en tire. **Les réponses apportées par le candidat et son attitude lors de ces entretiens sont déterminantes pour son évaluation**. Lors des passages les examinateurs posent des questions qui sont en lien soit avec les questions de l'énoncé ou avec le protocole proposé par le candidat. Il est indispensable que le candidat **rectifie**, le cas échéant, son compte-rendu suite à la discussion avec les examinateurs.

Les examinateurs disposent également du **compte-rendu** remis par les candidats à la fin de l'épreuve. **Un soin particulier doit être apporté à sa rédaction**.

Les compétences qui font l'objet d'une attention particulière sont détaillées dans la partie IV.

II. 4. Pannes de matériel ou incidents

Le matériel est vérifié par les examinateurs avant le début des épreuves, mais il est toujours possible qu'une panne survienne au cours des 4h. De même, les logiciels fournis peuvent présenter des bugs. Une panne qui n'est pas imputable à un mauvais respect des consignes ou à une erreur de manipulation du candidat n'affecte pas sa note. Les examinateurs prennent en compte cette panne dans la notation, notamment si cela a fait perdre du temps au candidat pour réaliser ses expériences.

La réactivité du candidat, quant à elle, est prise en compte dans la notation : pour les pannes simples, il est attendu du candidat qu'il détecte l'existence d'un problème, et pour les pannes élémentaires (ampoule grillée, source de tension qui ne délivre plus de tension ou de courant, etc.) qu'il identifie la nature du problème, surtout s'il dispose du matériel adéquat (par exemple, un multimètre permet de tester si une alimentation est défectueuse ou non). Le candidat qui suspecterait une panne de matériel est encouragé à la signaler rapidement aux examinateurs.

III. Bilan de l'épreuve 2023

289 candidats ont passé l'épreuve de TP de physique. La moyenne de l'épreuve sur l'ensemble des ENS est de 11,81 avec un écart-type de 3,68. Les notes s'étalent de 4 à 20, 27,7 % des candidats ont obtenu une note inférieure strictement à 10, et 34,6 % une note supérieure ou égale à 14.

Le niveau expérimental des candidats est meilleur que celui de la session 2022, et bien meilleur que celui de la session 2021. Cela était attendu, puisque les candidats de cette année ont pu bénéficier pleinement des heures de préparation en travaux pratiques pendant deux ans. Le niveau reste cependant en retrait par rapport à celui des années précédant la crise sanitaire.

En particulier, les candidats sont plus lents et manquent de sens pratique. De nombreux candidats passent le tiers voire la moitié du temps sur la première question du sujet, alors qu'il s'agissait de questions explicitement au programme.

Cette année a été marquée par un changement de programmes, qui a été pris en compte dans la rédaction des sujets et dans les questions posées.

Ces nouveaux programmes insistent sur la maîtrise de l'outil informatique, et en particulier de Python. La maîtrise de ces outils s'améliore, mais reste perfectible. Plus de candidats ont choisi Python pour tracer les courbes, mais ils restent minoritaires. La majorité des candidats préfèrent utiliser la calculatrice Windows plutôt que Python pour réaliser des calculs simples. Plusieurs candidats ont perdu leurs données, faute de les avoir enregistrées.

L'extraction d'information, que ce soit du sujet, de ses annexes ou de documents fournis reste une difficulté majeure. De trop nombreux candidats perdent du temps en ne lisant pas attentivement les questions.

III. 1. Remarques générales

Préambule

Il est évident que, s'agissant d'une épreuve de travaux pratiques, les candidats sont évalués sur leur pratique expérimentale (mesure, protocole, représentation de données, etc.) ainsi que l'interprétation de ces mesures, plutôt que sur leur capacité à calculer ou à restituer le cours. Le jury attend donc du candidat qu'il fasse des mesures ou des observations expérimentales pour répondre aux questions du sujet ! Le jury est frappé, tout autant que lors de la session précédente, par le nombre de candidats pour lesquels cela ne va pas de soi. La réponse à une question du type « Quelle est la fréquence de résonance du circuit ? » ou « Quel est le grandissement de cet instrument d'optique ? » ne peut pas être basée sur une analyse théorique, comme lors des autres épreuves écrites ou orales. Le candidat doit observer, mesurer voire modéliser ses données.

Attitude du candidat

La longueur de certains sujets ne doit pas amener les candidats à bâcler leurs mesures pour avancer plus rapidement et traiter le plus de questions possibles : le **soin** dans la prise de mesure et dans le tracé des courbes est un **élément clé de la notation**. Des mesures faites à la va-vite sont systématiquement sanctionnées, alors même que le candidat pense avoir bien avancé dans le sujet. Des notes très largement différentes ont ainsi pu être attribuées à des candidats ayant atteint le même niveau du sujet. Le jury tient notamment à insister sur le fait qu'une trop forte imprécision des résultats peut faire manquer au candidat certains aspects importants du problème permettant, par exemple, de faire le choix entre deux modèles.

Lorsque cela s'est produit, le jury n'a su que trop conseiller au candidat de reprendre des mesures en améliorant leur précision. Les candidats qui n'ont pas su remettre en cause leurs précédents résultats, révélant un manque de compréhension de l'importance des incertitudes en physique expérimentale ou une absence d'écoute des conseils du jury, ont été pénalisés.

L'épreuve de travaux pratiques est une épreuve expérimentale. Certains candidats rechignent presque à faire les mesures dont ils pensent connaître le résultat théorique. Cette attitude est fortement pénalisée. D'ailleurs, il arrive souvent que les résultats expérimentaux ne correspondent pas ou correspondent seulement partiellement aux hypothèses initiales des candidats (par exemple observer des oscillations amorties ne garantit pas qu'elles le sont exponentiellement).

Certains candidats hésitent aussi à commencer des expériences sans avoir une modélisation théorique préalable (ceci en particulier sur des questions dont les outils ou les phénomènes diffèrent sensiblement des TPs classiques). Cette attitude leur fait perdre beaucoup de temps alors qu'une approche de tests expérimentaux permet souvent d'avancer plus rapidement sur la compréhension des phénomènes étudiés et sur la mise en place d'un protocole rigoureux.

Estimation de paramètres

Il est attendu du candidat qu'il connaisse les valeurs ou les ordres de grandeur des grandeurs physiques courantes : champ de pesanteur terrestre, longueurs d'onde optiques, valeurs typiques de grandeurs électriques (courant, tension, impédance) dans les circuits usuels, viscosité de l'eau, etc. Pour des grandeurs comme le champ de pesanteur terrestre, arrondir à 10 m/s^2 n'a de sens que si l'erreur commise (2%) est significativement plus faible que les erreurs de mesure faites.

Ajustement des données

Quand l'on cherche à vérifier un modèle ou étalonner un appareil, le tracé d'un graphe, voire un ajustement des données, est systématiquement attendu. Un modèle, même linéaire, ne peut pas être confirmé par une simple observation d'un tableau de mesures. Le jury regrette qu'un nombre significatif de candidats lors de cette session n'ait pas eu ce réflexe et n'a finalement fait une analyse sérieuse des mesures qu'après une longue discussion.

Une discussion plus détaillée de l'ajustement des données est effectuée en partie IV. 5.

Traitement des données

Dériver numériquement une courbe introduit souvent du bruit. Dans ce cas, modéliser directement la courbe obtenue, globalement ou localement, est souvent une meilleure méthode.

III. 2. Traitement informatique

Il est vivement conseillé aux candidats de sauvegarder régulièrement leurs données. Plusieurs candidats ont perdu leurs données en cours d'épreuve, ce qui les a pénalisés.

III. 3. Électricité - Électronique

Généralités

Il est vivement conseillé aux candidats de faire un schéma des circuits électriques avant de les réaliser. Trop de candidats se sont perdus dans leurs expériences parce qu'ils n'avaient pas réalisé le circuit auquel ils songeaient.

Les ordres de grandeurs (résistance, capacité, inductance propre) des valeurs des composants (relativement à leur taille) sont mal maîtrisés. Une inductance de 100 H et une capacité de 1 F sont particulièrement élevées par rapport aux bobines et condensateurs usuels !

Avant de câbler une résistance ou une bobine dans un circuit, il faut s'assurer que l'on ne risque pas de l'endommager.

Les **notions de terre et de masse** sont très souvent sujettes à confusion. De nombreux courts-circuits classiques de masse sont observés. Les candidats doivent savoir que la borne de masse de certains appareils est reliée à la terre (cas fréquent pour les oscilloscopes et les générateurs basses fréquences), et que celle d'autres appareils ne l'est pas (cas fréquent pour les alimentations continues et les multimètres). Ils peuvent demander aux examinateurs ce qu'il en est pour le matériel qu'ils ont à leur disposition. Le jury note également que la structure des câbles coaxiaux n'est pas connue de tous les candidats, les amenant à réaliser des montages présentant des courts-circuits.

Le lien entre l'impédance et son module est souvent flou, ainsi que la pertinence de mesurer ou non un déphasage. Un grand nombre de candidats n'est d'ailleurs pas capable de mesurer le déphasage entre deux signaux, lorsque cette fonction n'est pas directement assurée par l'oscilloscope, et lorsqu'elle est effectuée, la majorité des candidats ne prête pas attention à son signe.

De même, de nombreux candidats ont eu des difficultés à expliquer la différence entre puissance moyenne reçue et le produit $U_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}}$.

Temps caractéristique

Il n'est pas possible d'évaluer un temps caractéristique de décroissance exponentielle en mesurant le temps pour lequel le signal s'annule. En effet, un signal exponentiellement décroissant ne s'annule jamais. En cas de mesure directe sans ajustement, il est souvent plus précis de mesurer directement τ que 5τ , à cause de l'incertitude sur l'amplitude.

Le multimètre

Le multimètre est un instrument de base de l'électronique, son utilisation doit être parfaitement maîtrisée. Pourtant, elle pose encore trop souvent problème. Pour beaucoup de candidats, la notion de calibre elle-même est floue, son choix est donc souvent incertain voire aléatoire.

De même, la différence entre les modes AC et DC est souvent peu comprise. Le candidat doit être capable de faire le choix entre les deux modes de façon raisonnée.

Les candidats doivent savoir qu'il est préférable d'utiliser un multimètre plutôt que de lire les valeurs des tensions et des intensités sur les alimentations. De même, l'utilisation d'un multimètre est à privilégier devant un oscilloscope pour lire des tensions continues.

Si un candidat souhaite mesurer la valeur d'une résistance avec un multimètre, ou bien d'un condensateur ou d'une bobine avec un RLCmètre, il est indispensable que le composant soit déconnecté de tout autre circuit électronique.

Les candidats pensent peu à utiliser le multimètre pour mesurer une résistance.

L'oscilloscope

L'utilisation d'un oscilloscope était nécessaire dans la majorité des sujets donnés cette année : la maîtrise de cet appareil est cruciale pour réussir l'épreuve de TP.

Une partie significative des candidats a encore des difficultés importantes pour utiliser un oscilloscope numérique. Le jury considère que **les candidats devraient connaître parfaitement le principe des réglages de base** : réglage des bases de temps et de tension, choix du couplage continu ou alternatif (modes <DC> et <AC>), réglage du déclenchement (<trigger>). Il est par ailleurs nécessaire de connaître le principe d'utilisation des modes marche/arrêt (<Run/Stop>), addition ou soustraction de deux signaux, mode XY, mesures avec des curseurs ou affichage de mesures (tension, fréquence, phase, etc.) effectuées par l'oscilloscope. Le jury attend du candidat qu'il connaisse le principe de ces réglages, et qu'il pense à les utiliser lorsque cela est pertinent. Si le signal n'apparaît pas facilement après des réglages rapides, il est indispensable de se poser et de réfléchir à ce que l'on souhaite observer : sur quelle plage de temps, à quelle fréquence, quelle amplitude du signal, etc.

Le principe des fonctions plus évoluées (mode <monocoup>, mode de défilement <Roll>, calcul de la transformée de Fourier <FFT>) doivent être également être connues des candidats. En particulier, pour la FFT, les candidats doivent savoir régler le signal principal et la gamme de représentation de

la FTT pour obtenir des fréquences précises. L'accès de ces fonctions évoluées sur les oscilloscopes mis à disposition est expliqué par les examinateurs, ou via une notice simplifiée de l'oscilloscope, lorsque leur utilisation est nécessaire.

Générateur de basses fréquences

Comme son nom l'indique, le générateur de basses fréquences est rarement l'appareil optimal pour obtenir une tension continue.

Il est indispensable de régler tous les paramètres du signal : fréquence, mais aussi amplitude, et éventuellement décalage du zéro (« offset »). Une amplitude trop faible peut rendre difficile la mesure du signal.

Composants réels

Les candidats doivent être conscients que les composants réels (bobines, condensateurs, ...) et les appareils électroniques (générateurs de basses fréquences, oscilloscopes, ...) ont un comportement plus complexe que celui des modèles idéaux. En particulier, les entrées des oscilloscopes sont souvent associées à des capacités parasites, les bobines réelles ont une résistance qui n'est pas forcément négligeable, ...

Sécurité électrique

Malgré l'insistance des nouveaux programmes sur la prévention des risques et notamment du risque électrique, la plupart des candidats n'ont aucune idée des gammes de courant et de tension pour lesquelles existe un risque électrique.

III. 4. Mécanique et mécanique des fluides

Évaluer le nombre de Reynolds est toujours utile pour interpréter les résultats en mécanique des fluides.

Que ce soit en mécanique lors du tracé de la réponse d'un système ou en électronique lors du tracé d'un diagramme de Bode, il est indispensable de se poser la question de la gamme de fréquences que l'on va balayer et du comportement attendu (une résonance, un plateau à basses fréquences, etc.).

III. 5. Optique

Le jury rappelle que pour réaliser une expérience d'optique satisfaisante, qu'il s'agisse d'optique géométrique ou ondulatoire, il est essentiel de **soigner l'alignement** et le centrage et des différents éléments. Tous les éléments doivent être fixés de manière correcte. Il faut notamment faire passer les faisceaux lumineux par le centre des lentilles pour respecter les conditions de Gauss.

La différence entre source lumineuse et objet lumineux est mal comprise. Il est fréquent qu'un candidat essaie de « faire l'image du faisceau lumineux », ou enchaîne un condenseur et une lentille sans placer d'objet matériel entre les deux. Par ailleurs, le jury a noté que de nombreux candidats ne maîtrisaient pas les principes de collimation des faisceaux. Un candidat doit savoir vérifier rapidement si le faisceau est convergent, divergent ou semble collimaté.

La réalisation de montages d'optique géométrique simples pose de nombreux problèmes. Le jury regrette le manque d'entraînement manifeste de nombreux candidats pour lesquels la formation des images se limite à la réalisation du montage dit $4f'$. Le jury attend des candidats qu'ils puissent choisir la focale d'une lentille ou la position de l'écran et de la lentille pour, par exemple, augmenter ou diminuer la taille de l'image, **sans se référer à un calcul**. De même, le grandissement devrait être systématiquement **mesuré** plutôt que calculé à partir des distances lentille—objet—écran et de la focale, par exemple, en supposant la lentille idéale.

Peu de candidats pensent à utiliser une lentille ou à changer un grandissement pour augmenter le flux lumineux sur un capteur et donc son signal.

Seuls de très rares candidats sont capables de mesurer l'axe de polarisation absolu d'un polariseur rectiligne en utilisant la réflexion vitreuse. Pour une fraction importante des candidats, la notion de polarisation et les outils expérimentaux associés sont mal maîtrisés.

Il ne faut pas confondre l'image du filament d'une lampe à incandescence et des franges d'interférences. Il serait utile de connaître la forme du spectre d'une lampe à incandescence, et le fait que ces lampes émettent beaucoup dans l'infrarouge. Le candidat doit penser à utiliser un filtre anticalorique lors de l'utilisation d'une lampe à incandescence si cela est pertinent.

Les candidats doivent également connaître les caractéristiques principales des lasers et des diodes électroluminescentes, et savoir les utiliser en toute sécurité.

III. 6. Électromagnétisme

Le phénomène d'induction est souvent source de confusion pour les candidats, notamment entre les lois de Lenz et de Faraday.

Les notions d'inductance propre et mutuelle sont trop souvent des concepts flous pour les candidats. Il est indispensable de connaître leur définition, comment les modéliser dans un circuit électrique et comment déterminer leur valeur expérimentalement.

Les phénomènes d'induction ont souvent des manifestations faibles si elles ne sont pas réalisées dans les bonnes conditions. Il convient alors de maximiser à la fois le flux dans le circuit induit ainsi que sa variation au cours du temps afin d'obtenir un effet mesurable en sortie.

III. 7. Thermodynamique

Les candidats doivent savoir se poser la question de l'étendue spatiale d'un capteur de température et développer leur protocole expérimental en conséquence. Peu de candidats pensent à utiliser des températures connues de changement d'état pour calibrer un capteur de température.

III. 8. Ondes

Les notions des champs (surpression, vitesse, densité) associés à une onde sonore et les liens entre ces grandeurs sont mal maîtrisées par une partie significative des candidats

De même, la relation entre l'intensité lumineuse et le champ électromagnétique associé est mal connue par de nombreux candidats.

La justification de la décroissance en $1/d^2$ de l'intensité lumineuse issue d'une diode électroluminescente a souvent été peu convaincante. Une diode électroluminescente n'est pas une source sphérique.

IV. Compétences évaluées

L'épreuve de TP est une épreuve de physique expérimentale où le candidat doit montrer sa capacité à mener à bien des expériences en suivant une démarche scientifique rigoureuse. Le jury observe le candidat manipuler, mesurer, analyser et commenter. Il juge aussi l'autonomie et la réactivité aux différentes questions.

L'évaluation porte essentiellement sur les compétences et les connaissances du candidat en tant qu'expérimentateur. Nous abordons ici plus en détails certains des aspects évalués les plus importants.

IV. 1. Choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux

L'énoncé guide le candidat dans la mise en évidence des phénomènes étudiés et dans leur interprétation. Cependant, le jury attend du candidat qu'il prenne des initiatives dans la conduite des expériences. Les questions sont volontairement succinctes : les candidats doivent pouvoir proposer des expériences mettant en évidence les phénomènes physiques proposés. Une grande liberté est ainsi laissée au candidat pour **établir et mettre en œuvre le protocole expérimental** qu'il juge adéquat.

Le **candidat** doit être capable de **justifier ses choix expérimentaux** : choix des composants (valeur des résistances, capacités, focales, etc.), choix de la position des différents éléments (notamment en optique), choix des réglages des différents appareils (oscilloscope, multimètre, etc.), choix du protocole (temps d'attente avant de faire la mesure s'il existe un régime transitoire indésirable, repères choisis pour mesurer une distance, etc.). Le candidat doit être capable de choisir l'appareil de mesure le plus adapté à l'expérience qu'il est en train de mener, parmi le matériel mis à sa disposition. On rappelle, à titre d'exemple, qu'il est plus pertinent d'utiliser un voltmètre numérique qu'un oscilloscope pour la mesure d'une tension continue.

IV. 2. Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus

Il est important d'observer et de décrire qualitativement le phénomène étudié avant d'effectuer les mesures quantitatives. Cette étape est malheureusement rarement réalisée, même lorsqu'elle est demandée explicitement. Elle permet pourtant, le plus souvent, de repérer les erreurs de montage les plus simples ou de trouver rapidement les ordres de grandeurs relatifs à l'expérience.

Une fois les mesures faites, et leur ajustement éventuel réalisé, le candidat doit mener une analyse critique des résultats obtenus. Leurs ordres de grandeur sont-ils « réalistes » ? Les résultats permettent-ils de répondre à la question posée ? Le modèle proposé est-il validé, étant donné notamment les incertitudes de mesure ? Dans le cas où les résultats obtenus ne coïncident pas avec ceux attendus, le jury attend du candidat qu'il s'interroge, voire identifie les éventuels défauts du protocole, erreurs de manipulation ou de mesure qui expliquent l'écart observé, ou encore qu'il remette en cause les hypothèses du modèle. Une telle analyse relevant de **l'esprit critique du candidat** est particulièrement valorisée.

Notons enfin que les sujets proposés ne requièrent jamais d'analyse théorique poussée de la part du candidat, d'autant plus que celle-ci est parfois hors de leur portée. En revanche, dans des cas simples le jury attend du candidat qu'il soit capable d'effectuer une modélisation *simple* de l'expérience en justifiant les approximations effectuées et les limites du modèle utilisé. Le candidat doit être capable de faire un calcul rapide de quelques lignes lorsque cela s'avère nécessaire pour appréhender le problème étudié ou interpréter les résultats obtenus (calcul d'un nombre de Reynolds, par exemple).

IV. 3. Mesures et tracés de graphe

Les mesures doivent être menées avec beaucoup de soin. Le jury attache en effet une attention toute particulière à la façon dont le candidat réalise ses mesures. Une estimation grossière d'un paramètre ou un tracé approximatif d'une courbe n'est que peu valorisé. Le jury attend donc du candidat qu'il cherche à toujours **minimiser les incertitudes expérimentales en réalisant ses mesures avec le plus de soin possible et en adoptant le protocole le plus adapté.**

Les données brutes doivent être reportées dans le compte-rendu sous forme de tableaux, accompagnés d'un schéma ou d'une description concise expliquant le protocole expérimental mis en place pour les obtenir. **Une représentation graphique des données est cependant indispensable.** Préciser les grandeurs portées sur les axes, avec leurs unités, fait partie des compétences élémentaires attendues par le jury. Le candidat doit choisir judicieusement les échelles et combinaisons de paramètres à placer en abscisse et en ordonnée pour confronter les données à un modèle.

En outre, afficher les incertitudes sur un graphe est très simple avec les tableurs à disposition du candidat. Il est attendu que les **barres d'erreur correspondantes aux incertitudes liées à chaque point soit affichées sur les courbes.**

Le choix de la gamme de mesure et du nombre de points de mesure est également important, particulièrement dans le cadre d'un étalonnage. Lorsqu'il est demandé au candidat de vérifier une loi, le jury attend que le candidat trace une courbe plutôt que de vérifier la validité de la loi pour un unique point expérimental. De même, lorsqu'une courbe présente une forte rupture de pente, il est souhaitable d'augmenter le nombre de points autour de cette zone. Si un point semble aberrant, il est souhaitable de refaire la mesure. A contrario, il est contre-productif de réaliser une régression pour déterminer un paramètre dont on demandait simplement un ordre de grandeur ou une estimation.

IV. 4. Incertitudes de mesures

Une mesure physique ne se conçoit qu'avec une estimation de l'incertitude qui l'entache. Aussi, l'**absence d'incertitudes** dans le rapport est **fortement pénalisée.** Le jury insiste sur le fait que l'évaluation de l'incertitude n'est pas une fin en soi, mais permet de commenter la mesure obtenue, par exemple en regard d'une valeur tabulée ou théorique.

Le candidat doit attacher un soin particulier à identifier les sources d'incertitudes et se focaliser sur l'évaluation de celles qui sont dominantes (très souvent une seule source d'incertitude domine toutes les autres).

Le jury n'attend **aucun développement métrologique technique** mais une **estimation raisonnable de l'incertitude de la mesure réalisée par le candidat.** Il est inutile de discuter de subtils facteurs de correction (facteurs d'élargissement), le plus souvent hors de propos ou mal

utilisés. Par exemple, très peu de candidats sont capables en pratique de mesurer les fractions de graduation d'un régllet : il est dans ce cas irréaliste d'estimer l'incertitude à $1/(2\sqrt{3})$ graduation.

Lorsqu'une quantité est mesurée de manière répétitive, le jury attend du candidat qu'il évalue correctement l'incertitude de type A (de répétabilité). Cette configuration est de plus en plus fréquente, notamment lors de la prise de mesure via des cartes d'acquisition ou des microcontrôleurs. Le jury valorise particulièrement les candidats qui ont consulté les notices fournies (par exemple la notice d'un multimètre) pour évaluer les incertitudes. Cette incertitude liée à l'instrument doit être comparée aux autres sources d'incertitudes, ce que peu de candidats prennent en compte. En effet, beaucoup de candidats se raccrochent à la précision de l'instrument même quand celle-ci n'est clairement pas pertinente (par exemple prendre la valeur fabricant pour un voltmètre alors que la valeur affichée fluctue).

L'estimation des incertitudes se fait en général en même temps que la mesure expérimentale. La mesure doit donc être effectuée dans les meilleures conditions possibles. Par exemple, lorsque différents appareils de mesure sont présents sur la paillasse, il est judicieux de choisir le plus précis. Augmenter une distance permet de diminuer l'incertitude relative sur la mesure de celle-ci. Il en est de même pour la taille d'une image optique, ou d'une figure d'interférence.

Le nombre de chiffres significatifs d'un résultat doit être cohérent avec l'estimation des incertitudes.

IV. 5. Ajustement des données expérimentales

Très souvent, l'exploitation des données passe par la confrontation à un modèle, que le candidat peut être amené à proposer. Le candidat doit dans un premier temps choisir judicieusement les échelles et combinaisons de paramètres à placer en abscisse et en ordonnée pour confronter les données au modèle. Il réalise ensuite l'ajustement des données, par une loi affine si c'est pertinent ou par une autre loi. Il est toujours pertinent d'analyser de façon qualitative le résultat des mesures avant de se lancer dans l'ajustement à proprement parler : le comportement observé correspond-il qualitativement à celui qui était attendu ?

Lorsque le modèle proposé est une loi exponentielle ou une loi de puissance, il est attendu du candidat d'utiliser de lui-même une échelle logarithmique et avoir autant que possible des données qui s'étalent sur plus d'une décade.

La qualité de l'ajustement doit systématiquement être caractérisée pour valider, ou non, le modèle proposé. Cela passe par une première observation qualitative : au vu des incertitudes de mesure, le modèle choisi permet-il d'expliquer les mesures obtenues ? Les résidus présentent-ils une tendance qui viendrait invalider le modèle ?

Une analyse plus quantitative de la qualité de l'ajustement est ensuite souhaitée. Les logiciels scientifiques à disposition des candidats permettent de prendre en compte les incertitudes dans l'ajustement, et d'évaluer le χ^2 , quantité pertinente pour cette discussion, et fournissent un intervalle de confiance sur les paramètres de l'ajustement.

Le jury regrette que de nombreux candidats utilisent encore le coefficient de corrélation linéaire r^2 pour caractériser un ajustement.

IV. 6. Communication des résultats obtenus

Il est obligatoire de rendre un **compte-rendu** à la fin de l'épreuve. Il fait partie de l'épreuve et est indispensable à la notation. Il doit être concis (3 à 6 pages typiquement) mais contenir toutes les informations importantes. Celui-ci doit notamment **inclure** les différentes **courbes** demandées. Il doit comporter les réponses aux questions de l'énoncé, les résultats des ajustements, les raisonnements scientifiques ainsi que le détail des mesures et des calculs. Un soin tout particulier doit notamment être apporté dans le choix des unités, du nombre de chiffres significatifs et dans l'estimation des barres d'erreur. Les résultats des ajustements doivent impérativement apparaître dans le compte-rendu, aussi bien sur le graphe que dans le corps du texte lui-même, où les valeurs des paramètres ajustés doivent être données.

Le jury est sensible à l'**effort pédagogique** d'explication et de démonstration des résultats expérimentaux tant à l'oral qu'à l'écrit. Le compte-rendu doit être propre et rédigé de façon claire. Les compte-rendus trop lapidaires ont été sanctionnés. A contrario, il ne faut pas trop rédiger (notamment sur les questions théoriques), mais être concis. Il faut veiller à l'organisation et la présentation des résultats (les valeurs numériques importantes sont parfois difficiles à trouver au milieu des paragraphes).

Le jury tient enfin à préciser que les discussions qu'il mène avec les candidats au cours de l'épreuve ne dispensent en aucun cas le candidat de reproduire sur son compte-rendu les raisonnements, analyses de résultats ou justifications d'approximation, même si ceux-ci ont été explicitement abordés à l'oral.

IV. 7. Discussion avec le jury

La discussion avec le jury est particulièrement importante dans l'évaluation du candidat. Une nonchalance ou un manque d'implication dans la discussion est systématiquement pénalisé : il est attendu de scientifiques qu'ils puissent communiquer des résultats ou protocoles de mesure et en faire une analyse critique. Les candidats qui ont su prendre en compte les remarques du jury, par exemple en reprenant des mesures après qu'un défaut manifeste dans le protocole choisi a été identifié, ont été valorisés.

V. Évolutions pour la session 2024

La quasi-totalité des candidats utilisent Python, Régressi ou LibreOffice pour tracer les courbes. Ces trois logiciels resteront disponibles pour le tracé des courbes, et les candidats pourront toujours choisir le logiciel de leur choix. Vu les nouveaux programmes, l'utilisation pertinente de Python sera valorisée.

VI. Exemples de sujets donnés à la session 2023

Trois sujets sont donnés dans les pages suivantes.

SUJET N° 2

Le diapason est un objet bien connu des musiciens et musiciennes : une fois frappé sur une surface dure, il vibre et émet un son pur servant de référence afin d'accorder les instruments. Au cours de ce TP, nous cherchons à comprendre comment vibre un diapason et ce qui fait que la note qu'il produit résonne pendant si longtemps.

Vous décrierez les protocoles expérimentaux choisis et présenterez vos résultats de manière claire, en les interprétant. Les courbes obtenues, ainsi que les résultats des ajustements correspondants, devront être imprimés et joints au compte-rendu. Un traitement rigoureux des incertitudes de mesure et de leur effet sur les paramètres des ajustements est attendu.

Consignes de sécurité Lors de l'utilisation de composants électroniques, vous prendrez soin de ne pas dépasser le courant maximal supporté (indiqué sur les composants eux-mêmes). De plus, vous réaliserez les branchements des fils électriques hors tension afin d'éviter tout risque d'électrisation.

1 Spectre du son émis

1. Soit f_0 la fréquence du son produit par un diapason frappé sur une surface. Mesurez f_0 expérimentalement le plus précisément possible et comparez la valeur obtenue à la valeur indiquée sur le diapason lui-même. Commentez.
2. Le son émis par un diapason est constitué de plusieurs harmoniques. Proposez un protocole pour mesurer expérimentalement la fréquence f_1 de la première harmonique, et comparez-la à sa valeur théorique

$$f_1 = 6,27 \times f_0 .$$

Cette harmonique est-elle audible dans le son créé par le diapason ? En quoi cela permet-il d'expliquer la pureté du son émis par un diapason ?

3. Dans *toute la suite* de ce TP, on place le diapason sur une caisse de résonance adaptée. Justifiez l'emploi de celle-ci.
4. De quelles harmoniques est composé le son émis par le diapason monté sur sa caisse de résonance ? Pourquoi ?

2 Résonance : réponse impulsionnelle

On modélise dans la suite le diapason par un oscillateur faiblement amorti, de fréquence propre f_0 et de facteur de qualité Q .

5. Frappez sur le diapason avec un marteau. Que peut-on dire de la durée d'émission du son ? Quelle information peut-on en déduire sur le facteur de qualité Q du diapason ?
6. Placez les pointes du diapason dans une cuve remplie d'eau et réalisez la même expérience. Que peut-on conclure ?
7. La réponse d'un oscillateur faiblement amorti à un choc à $t = 0$ a une enveloppe décroissante de manière exponentielle en $\exp(-\pi f_0 t / Q)$. À partir de cette formule théorique, proposez une méthode expérimentale permettant d'obtenir Q et appliquez-la.

3 Résonance : réponse spectrale

Afin d'approfondir l'étude de la résonance, on cherche à tracer le diagramme de Bode en amplitude du diapason. Pour ce faire, on excite l'une des branches du diapason de manière sinusoïdale à une fréquence f à l'aide du champ magnétique \vec{B} créé en faisant passer un courant sinusoïdal dans une bobine.

8. Pourquoi ne peut-on pas alimenter la bobine directement avec un GBF ? Comment faut-il procéder pour résoudre ce problème ?
9. On admet que la force subie par le diapason est proportionnelle à $\|\vec{B}\|^2$. Quelle fréquence faut-il choisir pour le courant traversant la bobine, si l'on souhaite exciter le diapason à sa fréquence de résonance f_0 ?
10. Tracez le diagramme de Bode en amplitude du diapason. Commentez sur les incertitudes de mesure.
11. Le dispositif que vous avez proposé permet-il d'étudier la résonance en position ou en vitesse ? Justifiez.
12. Pour une résonance en position, l'amplitude s'écrit

$$U(f) = \frac{U_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \frac{f^2}{f_0^2}}}.$$

Pour une résonance en vitesse, l'amplitude s'écrit

$$U(f) = \frac{U_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}}.$$

Utilisez un logiciel de traitement de données pour obtenir f_0 et Q à l'aide du modèle pertinent. Commentez les valeurs obtenues.

13. Réalisez la même manipulation en plongeant les extrémités du diapason dans une cuve d'eau. Qu'observe-t-on ? Commentez.

4 Utilisation pour la mesure de fréquence

14. Déséquilibrez le second diapason à l'aide de la masselotte fournie. Que peut-on dire sur le son produit par le diapason déséquilibré lorsque celui-ci est frappé ?
15. Proposez un protocole permettant, à l'aide du diapason étudié dont vous connaissez précisément la fréquence de résonance f_0 , de déterminer la fréquence du diapason déséquilibré.

On donne la formule trigonométrique suivante :

$$\cos a + \cos b = 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right).$$

Sujet n° 9

Ce sujet porte sur des ondes sonores confinées dans un tube.

Les caractéristiques du matériel disponible sont données en partie II. La liste du matériel disponible est donnée en partie III.

Le/La candidat.e devra décrire le protocole expérimental choisi et présenter ses résultats de manière claire, en les interprétant. Il/Elle discutera les incertitudes de mesure. Pour les représentations graphiques des mesures et leurs ajustements par des courbes, des codes pythons sont disponibles sur l'ordinateur.

I. Mesures

I.1. Modes propres

Le dispositif se compose d'un écouteur (haut-parleur miniature) et d'un microphone entourés chacun d'une pièce de polystyrène permettant leur fixation aux extrémités d'un tube transparent. **Les pièces en polystyrène sont relativement fragiles. Le/La candidat.e veillera à ne pas endommager ces pièces lors des manipulations.**

1. Théorie des modes propres.

Quelles sont les fréquences propres attendues des ondes sonores dans un tube fermé aux deux extrémités ? Calculer la fréquence du mode fondamental attendue sur le dispositif expérimental.

2. Mesure de la fréquence fondamentale.

Utiliser un générateur basse fréquence (GBF) pour produire sur l'écouteur une onde sinusoïdale à la fréquence fondamentale calculée précédemment. Observer le signal du GBF et le signal du microphone sur l'oscilloscope. Mesurer la fréquence du mode fondamental. En déduire la célérité des ondes dans le tube.

3. Mesure des fréquences propres.

Mesurer les fréquences des dix premiers modes. Représenter graphiquement les résultats, ajuster par une courbe théorique, en déduire une nouvelle estimation de la célérité des ondes dans le tube et discuter.

4. Tube semi-ouvert.

Sortir le microphone du tube en tirant délicatement et le maintenir 1 cm à l'intérieur du tube sans boucher le tube. On maintiendra le micro par la partie en mousse. Enlever la pièce en polystyrène restée dans le tube à l'aide de la pincette. Quelles sont les fréquences propres attendues dans ce cas ? Mesurer les fréquences des trois premiers modes pour vérifier expérimentalement la réponse.

I.2. Résonance du mode fondamental

Replacer le microphone dans le tube avec la pièce en polystyrène. Le but de cette partie est d'étudier en détail la résonance du mode fondamental du tube fermé.

5. Amplitude.

Mesurer l'amplitude du signal du microphone autour de la fréquence de résonance f_0 . Ajuster par la fonction racine de lorentzienne suivante :

$$\frac{A}{\sqrt{1 + \left(\frac{f-f_0}{\gamma_A}\right)^2}}$$

Que représente γ_A ? En déduire le facteur de qualité de la résonance.

6. Phase.

Mesurer la phase relative entre le signal de forçage et le signal du microphone autour de la résonance. Ajuster par la fonction arctangente $\arctan\left(\frac{f-f_0}{\gamma_\theta}\right)$. Comparer au résultat précédent.

7. Amortissement des oscillations.

Moduler l'amplitude du signal du GBF envoyé à l'écouteur entre tout ou rien avec une fréquence de 2 Hz. On utilisera pour cela un signal carré de minimum 0 V et maximum 2 V fourni par un second GBF et connecté à l'entrée de modulation (In/out VCF) du premier GBF. Observer l'évolution du signal du microphone à la coupure du signal de forçage. Expliquer qualitativement l'évolution observée. Enregistrer le signal sur la clef USB au format .csv et ajuster par une sinusoïde à enveloppe exponentielle décroissante. Comparer la constante de temps trouvée aux résultats précédents.

I.3. Cavités couplées

8. Cavités couplées symétriques.

Placer au milieu du tube à mi-chemin entre l'écouteur et le microphone, la pièce en polystyrène percée en son centre. On obtient alors deux cavités dont les fréquences propres sont sensées être identiques. Mesurer les deux résonances du système proches de la fréquence fondamentale identique théorique pour chacune des cavités.

Proposer une origine physique à la séparation en fréquence observée et des paramètres dont elle dépend.

9. Anti-croisement de modes.

Répéter la mesure précédente en variant la position du séparateur par pas de 1 cm autour de la position centrale. Représenter graphiquement les résultats et discuter.

II. Caractéristiques du matériel utilisé

Écouteur. C'est un écouteur standard fonctionnant dans le domaine des fréquences audibles. Une résistance est montée en série pour le protéger, ce qui permet de l'alimenter avec des tension alternative d'une amplitude crête-à-crête de 20 V.

Microphone. C'est un microphone à électret qui contient un transistor. Il est alimenté par une pile située l'intérieur du boîtier auquel le micro est relié. Le commutateur du boîtier doit être en position "ON" pour que le micro soit alimenté. Le signal sort du connecteur BNC du boîtier.

Oscilloscope. L'entrée de déclenchement est sur le panneau arrière de l'appareil.

Générateur de basses fréquences. Le réglage des différents paramètres (fonction, fréquence, amplitude ...) du signal généré par le GBF se fait en appuyant sur le bouton correspondant sur la ligne du haut, puis en tournant le gros bouton de réglage "MODIFY". Le choix du calibre de réglage pour l'amplitude et la fréquence se fait avec les flèches à côté du bouton de réglage. Pour moduler en amplitude le signal de sortie par un signal externe, il faut appuyer sur le bouton "MODUL." puis sélectionner le mode "ext am" et valider avec le bouton "VALID" et enfin envoyer le signal modulateur externe sur l'entrée "IN/OUT VCF".

III. Matériel

- 1 écouteur
- 1 microphone à électret avec boîtier d'alimentation par pile 9V
- 1 tube transparent d'environ 45 cm de longueur et de diamètre interne 20 mm
- 1 support en polystyrène expansé pour le tube
- 1 pied (tige verticale)
- 1 noix
- 1 pince
- 1 pièce polystyrène pour fin de tube écouteur
- 1 pièce polystyrène pour fin de tube microphone
- 1 pièce polystyrène percée avec trou de 3 mm
- 1 pincette
- 2 générateur basse fréquence Centrad GF266, ENSP 4224 et 4227
- 1 oscilloscope Agilent DSO-X 2002A, ENSP 4451
- 1 clef USB Montrouge 1
- 5 câbles BNC-BNC
- 2 tés BNC
- 1 tube PVC gris pour pousser des éléments dans le tube transparent
- 1 mètre ruban

Sujet n°16

Ce sujet porte sur l'étude de diodes.

Les caractéristiques du matériel disponible sont données en partie II.

Le (la) candidat(e) devra décrire le protocole expérimental choisi et présenter ses résultats de manière claire, en les interprétant. Il (elle) discutera les incertitudes de mesure.

I. Mesures

I.1. Diodes électroluminescentes (LED)

1. LED comme capteur de lumière.

Mesurer la tension U_a aux bornes de la LED jaune en fonction de la distance à la LED blanche alimentée sous 3,0 V. On prendra la LED jaune soudée à des fils.

On placera la LED jaune en face de la diode blanche, en veillant à la qualité de l'alignement. On mesurera la distance d entre le début de la zone métallique située vers la moitié de la LED jaune, et la LED blanche. On prendra d dans l'intervalle [0, 15] cm.

On effectuera ces mesures en laissant la LED blanche allumée, et en commençant par les positions les plus proches de la LED blanche. Si la valeur mesurée chute brutalement, se rapprocher de la LED blanche pour s'en éloigner de nouveau.

Mesurer aussi la tension U_e aux bornes de la LED jaune, lorsque la LED blanche est éteinte.

Tracer $U_a - U_e$ en fonction de d . Ajuster la partie de cette courbe où cela est pertinent par la fonction A/d^2 , où A est à déterminer par l'ajustement.

2. LED comme émetteur de lumière.

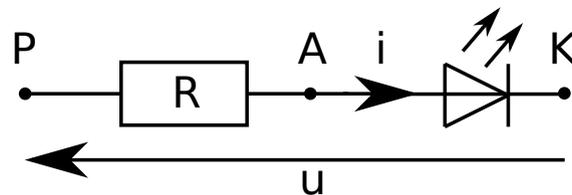


FIGURE 1 – Schéma électrique de branchement de la LED comme émetteur de lumière. La résistance à utiliser vaut $R = 470 \Omega$.

Monter en se servant de la plaque d'essai le circuit électrique dont le schéma est donné en figure 1, en utilisant une LED jaune. Placer la photorésistance à proximité immédiate de la LED, sans aucune connexion électrique avec les éléments du circuit représenté en figure 1. Protéger le circuit de la lumière ambiante à l'aide du carton.

Mesurer la résistance de la photorésistance et la tension aux bornes de la LED jaune, en fonction de la tension u appliquée. On prendra $u \in [0, 5]$ V.

Tracer l'inverse de la résistance de la photorésistance, en fonction de la tension aux bornes de la LED jaune. Ajuster la partie affine croissante de la courbe. Définir et calculer une tension seuil U_s à partir de cet ajustement.

3. Émission de lumière en fonction de la couleur de la LED.

En utilisant une méthode similaire à celle de la question précédente, déterminer U_s pour les LED rouges et bleues.

Tracer la valeur de U_s en fonction de la fréquence correspondant à la lumière émise par la LED. Ajuster cette courbe par une fonction linéaire. Comparer la valeur obtenue à h/e , où $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ est la constante de Planck, et $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ la charge élémentaire. La vitesse de la lumière dans le vide vaut $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

I.2. Diode Zener

4. Caractéristique de la diode Zener.

En appliquant une tension comprise entre -20 V et $+20 \text{ V}$ à la diode Zener en série avec une résistance $R = 1 \text{ k}\Omega$, déterminer et tracer la caractéristique courant-tension de la diode Zener. On utilisera des tensions continues.

Définir et déterminer deux tensions seuils. La tension seuil négative est appelée «tension Zener».

5. Avalanches autour de la tension Zener.

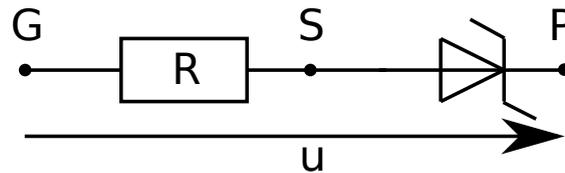


FIGURE 2 – Schéma électrique de branchement de la diode Zener pour mesurer des avalanches. La résistance à utiliser vaut $R = 100 \text{ k}\Omega$.

La diode Zener est caractérisée par des «avalanches» autour de la tension Zener. Il s'agit de fluctuations spontanées de l'intensité, qui se manifestent par des pics dans le signal d'intensité. Ces pics n'ont pas une forme symétrique, le temps de montée est plus faible que le temps de décroissance. Le but de cette question et des suivantes est de les caractériser.

Monter le circuit électrique représenté en figure 2. On utilisera pour u une tension continue, positive, valant environ $0,1 \text{ V}$ de plus que la valeur absolue de la tension Zener.

Mesurer la tension au point S, et visualiser les pics à l'oscilloscope. On pourra utiliser le mode "Stop" de l'oscilloscope. Donner l'ordre de grandeur de la durée d'un pic. Enregistrer et imprimer l'écran de l'oscilloscope.

Mettre en S un filtre passe-haut passif pour enlever la composante continue du signal, sans modifier la forme des pics. Donner dans le rapport le schéma électrique correspondant, et les valeurs des composants électriques choisis. Enregistrer et imprimer l'écran de l'oscilloscope en sortie du filtre.

Brancher la sortie du filtre à l'entrée de l'amplificateur HP. Visualiser la sortie de l'amplificateur HP à l'oscilloscope, et vérifier que le signal est bien amplifié d'un facteur 10. Enregistrer et imprimer l'écran de l'oscilloscope.

6. Comparateur LM311.

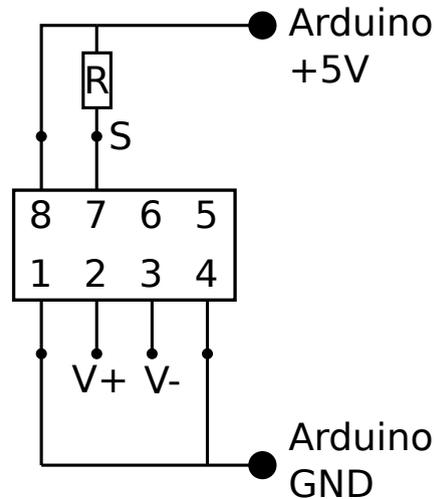


FIGURE 3 – Schéma électrique de branchement du composant LM311. Les bornes 5 et 6 ne sont pas utilisées ici. Les différentes sorties «GND» de la carte Arduino sont équivalentes et reliées entre elles; elles fixent la masse 0 V du circuit. La résistance à utiliser vaut $R = 1 \text{ k}\Omega$.

Le but de cette question est de caractériser le composant LM311, qui sera utilisé pour mesurer le temps entre deux avalanches. La diode Zener n'est pas utilisée dans cette question. Ne pas démonter le circuit de la question précédente, il servira dans la question suivante.

Brancher la carte Arduino à l'ordinateur via le port USB. Réaliser le montage électrique de la figure 3.

Dans ce montage, le composant LM311 se comporte à basse fréquence comme un comparateur dont la sortie S vaut environ 5 V si $V_+ > V_-$, et 0 V dans le cas contraire.

Appliquer en V_- une tension continue de 0,180 V, et en V_+ une tension sinusoïdale qui varie entre 0 V et 0,2 V. Mesurer la valeur maximale en S, pour une fréquence de V_+ qui varie de 100 kHz à 4 MHz. Tracer la courbe.

7. Distribution du temps entre deux avalanches.

Débrancher l'entrée V_+ , et y brancher à la place la sortie de l'amplificateur HP.

Visualiser le signal en sortie S à l'oscilloscope, enregistrer et imprimer le signal. Donner l'ordre de grandeur du temps entre 2 avalanches.

Brancher la sortie S à l'entrée numérique « ~ 3 » de la carte Arduino. Obtenir à l'aide du programme Python `Mesure_intervalle.py` une liste de temps entre deux avalanches. Lancer le programme `Reinitialisation.py` si la connexion au port USB n'a pas fonctionné, et que l'acquisition a échoué.

Tracer la distribution de ces temps. Vérifier que la distribution suit une loi exponentielle. Déterminer le temps caractéristique.

Modifier légèrement u (figure 2) et étudier l'effet sur la distribution de temps entre deux avalanches.

II. Annexe : caractéristiques du matériel utilisé

Oscilloscope.

L'oscilloscope fourni possède notamment les fonctions suivantes :

- Mode monocoup (*Single*)
- Transformée de Fourier (*Math*)
- Curseurs de mesure (*Cursors*)
- Possibilité de mesures automatiques (*Meas*)
- Sauvegarde de l'écran sur clé USB, notamment sous forme de tableau de données .csv et d'image .png (*Save/Recall*)

Ces fonctions et beaucoup d'autres sont décrites dans la notice, fournie.

Plaque d'essai.

Les trous déjà connectés sur les plaques d'essai sont représentés par des droites épaisses en figure 4. Il faut que les pattes des composants soient suffisamment enfoncés pour que ceux-ci soient connectés.

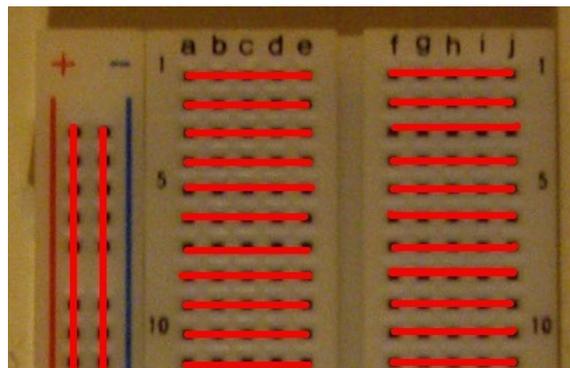


FIGURE 4 – Connexions d'une plaque d'essai. Les trous connectés sont reliés par une droite épaisse. Source : <http://www.elektronique.fr/montages/diviseur-tension/utiliser-plaque-essai.php>

Résistances. Les valeurs des résistances sont indiquées par des étiquettes bleues. La tolérance, c'est-à-dire l'incertitude sur la valeur affichée, est de 1% pour les résistances fournies.

LED. Le schéma d'une LED est donné en figure 6.

La LED jaune a une longueur d'onde qui vaut 588 ± 24 nm, où \pm caractérise la largeur de la raie définie comme l'écart-type. De même, la LED rouge a une longueur d'onde qui vaut 634 ± 22 nm, et la LED bleue 470 ± 16 nm.

Photorésistance. Il s'agit d'un capteur de flux lumineux. Les 2 bornes de la photorésistance sont équivalentes. La résistance aux bornes de la photorésistance est inversement proportionnelle au flux lumineux atteignant le matériau photoconducteur (voir figure 6a). En l'absence de lumière, la valeur sature à une valeur de quelques M Ω .

Diode Zener. Le schéma et la convention d'orientation de la diode Zener sont données en figure 6b. Sur le composant, la cathode est indiquée par l'anneau noir (figure 6c).

Amplificateur HP. Bande passante 0 à 1 MHz. Toujours allumer cet amplificateur avant d'effectuer des branchements.

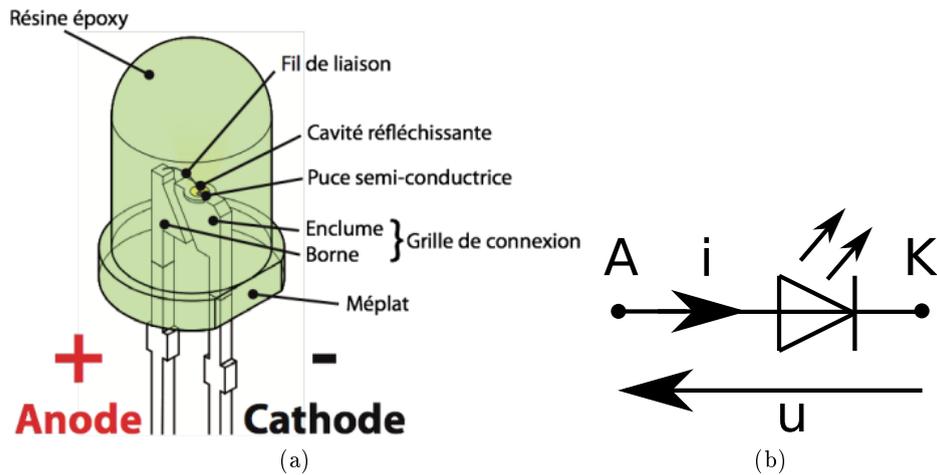


FIGURE 5 – Suite (a) : Schéma d'une LED. La partie active se trouve en haut de la partie métallique : "puce semi-conductrice" sur le schéma. Le méplat indique la cathode. La patte la plus courte est la cathode (si les pattes n'ont pas été coupées). Source : <https://arduino.developpez.com/cahiers-pratiques/clignoter-led/> (b) : symbole électrique d'une LED. A est l'anode, et K la cathode.

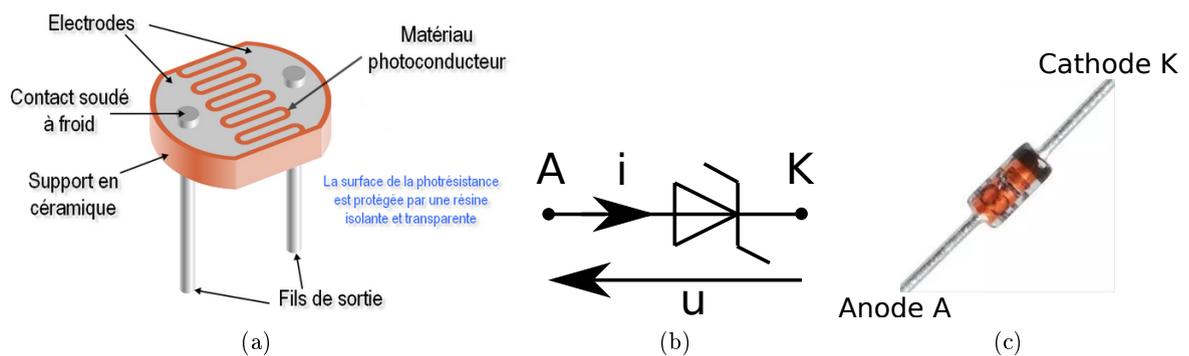


FIGURE 6 – (a) : schéma d'une photorésistance. Source : <https://www.framboise314.fr/scratch-raspberry-pi-composants/module-detecteur-de-lumiere-a-ldr/> (b) : symbole et convention d'orientation de la diode Zener. A est l'anode, et K la cathode (c) : photo d'une diode Zener. L'anneau noir indique la cathode.

Câbles BNC. L'utilisation de câbles BNC diminue souvent le bruit dans un circuit.

Notices. Une notice est fournie pour l'oscilloscope, les multimètres, le générateur de basses fréquences et les alimentations.

III. Annexe : matériel

- Oscilloscope Agilent DSO X 2002 A
- 1 réglet 30 cm, 1 réglet métallique 50 cm
- 1 multimètre 34401A
- 1 multimètre 34450A
- 2 alimentations BK
- 1 générateur de basses fréquences Agilent 33220A
- 1 amplificateur HP (Hewlett-Packard)
- 1 alimentation de précision Hewlett-Packard E3631A
- LED blanche de puissance, sur support
- 2 pieds optique
- 1 pince flexible
- 3 plaques d'essai
- LED jaune, bleue, rouge
- Diode Zener
- Comparateur LM311
- Résistances, condensateurs
- 1 carte Joy-it
- 1 câble USB pour carte Arduino
- Kit de câble pour plaque d'essai
- 12 fils bananes
- 1 câbles BNC-BNC, 5 câbles BNC-banane
- 1 raccord "T" BNC, 2 raccord mâle-mâle BNC
- 2 raccord banane femelle-femelle
- 9 câbles de connexion plaque d'essai/banane
- 1 carton