

# Rapport sur l'épreuve orale de travaux pratiques de physique

---

## Coefficients (en pourcentage du total d'admission) :

- Ulm : option physique 10,3%
- Lyon : 7%
- Cachan : option physique 10,2%, option chimie 5,1%

## Membres du jury :

Delphine Chareyron, Timothée de Guillebon, Bruno Dlubak, Jérémy Ferrand, Léa Lachaud, Arnaud Le Diffon, François Marquier, Cendrine Moskalenko, Ludivine Oruba, Arnaud Raoux, Jérémy Sautel, Benoît Semin

<b>Introduction.....</b>	<b>2</b>
Déroulement de l'épreuve.....	2
Outil informatique.....	3
Énoncés.....	3
Moyens d'évaluation.....	4
<b>I. Bilan de l'épreuve 2021.....</b>	<b>4</b>
1. Remarques générales.....	5
2. Électricité - Électronique.....	6
3. Mécanique et mécanique des fluides.....	8
4. Optique.....	8
5. Électromagnétisme.....	9
<b>II. Compétences évaluées.....</b>	<b>10</b>
Choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux.....	10
Mesures et tracés de graphe.....	10
Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus.....	11
Incertitudes de mesures.....	11
Ajustement des données expérimentales par un modèle.....	12
Communication des résultats obtenus.....	12
Discussion avec le jury.....	13
<b>III. Évolutions pour la session 2022.....</b>	<b>13</b>
<b>IV. Exemples de sujets donnés à la session 2021.....</b>	<b>13</b>

## Introduction

L'épreuve de travaux pratiques est une épreuve commune aux trois ENS, d'une durée de 4h. La session 2021 s'est déroulée pour la première fois dans les nouveaux locaux du département de physique de l'ENS de Paris Saclay. Vu le contexte sanitaire, le port du masque était obligatoire, et une mesure en continu du taux de CO<sub>2</sub> permettait de s'assurer que les salles étaient suffisamment ventilées.

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.

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.

## 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 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, ou par respect envers les candidats suivants. Des paillasses particulièrement mal tenues ont été sanctionnées.

## Outil informatique

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

- la suite Libre Office et notamment son tableur (type Excel),
- deux logiciels de tracés scientifiques en libre accès, Regressi et SciDAVis, pour lesquels une notice simplifiée était fournie.
- Distributions Python pyzo et Anaconda, avec des « fichiers modèles » d'utilisation des commandes Python pour le tracé de graphes et l'ajustement de données.

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 systématiquement expliqué aux candidats.

Il était fréquent que des sujets demandent l'utilisation de routines Python fournies au candidat. Il était amené à comprendre le fonctionnement global du script, puis à modifier les données en fonction de ses mesures. Avec l'évolution des programmes de CPGE, l'utilisation de Python se généralisera naturellement.

Le jury tient à signaler que la maîtrise de ces logiciels ne fait 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 non communicantes étaient autorisées.

## 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 de deux à trois 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. 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. **Une lecture attentive de l'énoncé est indispensable.**

Des exemples de questions posées dans ces énoncés 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.

### **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.**

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 III.

### **Remarque : 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. 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 et peuvent proposer un temps additionnel au candidat pour terminer l'épreuve.

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.

## **I. Bilan de l'épreuve 2021**

245 candidats ont passé l'épreuve de TP. La moyenne de l'épreuve sur l'ensemble des ENS est de 11,55 avec un écart-type de 3,41, les notes s'étalant de 3 à 20.

Le jury tient à signaler que cette année le niveau expérimental des candidats est très nettement inférieur à celui des sessions précédentes alors que le niveau théorique semble similaire. Le jury est conscient des difficultés liées au contexte sanitaire. Il est néanmoins dommage que des compétences de base ne soit pas acquises par une majorité de candidat (réglages de base d'un oscilloscope, réalisation d'une image d'un objet en optique, réalisation d'un circuit électronique classique sans créer de court-circuit/problème de masse, etc.). De nombreuses erreurs grossières ont été observées, y compris par des candidats qui ont obtenu une note moyenne : échelles en m au lieu de cm, unités manquantes, nombre de chiffres significatifs beaucoup trop grand, etc.

La progression des candidats dans les sujets proposés a été plus lente que d'habitude, et le jury a noté une moins bonne réactivité des candidats que lors des sessions précédentes. Le nombre de questions traitées par sujet est sensiblement plus faible qu'aux sessions précédentes. De plus, les candidats profitent rarement de la discussion avec les examinateurs pour améliorer leur protocole expérimental. Le jury a conscience que la formation expérimentale des candidats a pu pâtir des conditions sanitaires et a été bienveillant dans l'évaluation. Il note cependant une asymétrie prononcée entre la formation théorique et expérimentale.

## 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 « Quel est le débit d'écoulement ? », « 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 possible. 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. Trop de candidats sont tombés, lors de cette session, dans cet écueil.

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.

### **Estimation de paramètres**

Il est attendu du candidat qu'il connaisse les valeurs ou les ordres de grandeur de 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  $10 \text{ m/s}^2$  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 calibrer 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'aient pas eu ce réflexe et n'ont finalement fait une analyse sérieuse de leurs mesures qu'après une longue discussion. Il s'agit pourtant d'une compétence élémentaire du physicien. Le jury regrette que certains candidats réalisent d'office un ajustement affine sur un nuage de points avant d'avoir réfléchi au modèle pertinent du problème.

**Le jury regrette que de nombreux candidats utilisent encore le coefficient de corrélation linéaire  $r^2$  pour caractériser un ajustement. Pour rappel, depuis 2013, le fait de savoir que « le coefficient de corrélation n'est pas un outil adapté pour juger de la validité d'un modèle linéaire » est une capacité exigible du programme de la filière PC.**

## **2. 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 1 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 tout le temps connue des 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  $U_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}}$ .

## 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.

Le rôle des impédances associées aux mesures de courant et de tension est assez flou. Le jury a encore vu cette année des ampèremètres branchés en parallèle et des voltmètres en série. Il est rappelé qu'il faut débrancher un dipôle du circuit avant de mesurer sa résistance avec un ohmmètre.

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.

Une grande confusion règne concernant les imperfections des ampèremètres, dont la résistance interne est souvent surévaluée de plusieurs ordres de grandeur, ce qui sert de prétexte pour ne pas utiliser cet appareil.

## L'oscilloscope

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>). Les candidats ne sachant pas faire ces réglages simples ont été particulièrement nombreux cette année. 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.

Concernant les fonctions plus évoluées (mode <monocoup>, calcul de la transformée de Fourier <FFT>, mode de défilement <Roll>), leur accès sur le modèle d'oscilloscope mis à disposition sont expliqués par les examinateurs, ou via une notice simplifiée de l'oscilloscope, lorsque leur utilisation est nécessaire. **Le jury attend toutefois des candidats qu'ils maîtrisent leur principe de**

**fonctionnement.** Le nombre de candidats capable de faire une transformée de Fourier est très faible cette année, alors que cette compétence est pleinement au programme.

Cette année, le jury remarque un net manque de familiarisation avec l'oscilloscope. Chez un nombre inquiétant de candidats, cela se traduit par un manque de spontanéité dans la manipulation de l'appareil voire une certaine réticence à son utilisation. La touche « Autoset » de l'oscilloscope est (très) souvent utilisée à l'aveugle. Cette touche a parfois pour effet de zoomer sur un signal parasite pseudo-périodique à très haute fréquence. Elle peut changer des paramètres dont les candidats ignorent l'existence, leur compliquant la tâche plutôt que de la simplifier. Si son utilisation n'est pas pénalisée en tant que telle, elle est sanctionnée si elle conduit à l'utilisation de paramètres de réglage non pertinents ou si le candidat ne sait pas justifier le choix des réglages. De grandes difficultés dans l'emploi des fonctions de base [comme le réglage de la base de temps ou de l'offset vertical] ont été observées chez de nombreux candidats.

### 3. Mécanique et mécanique des fluides

Le jury souhaite que les candidats apportent un soin particulier à l'agencement expérimental (orientation des éléments, fixation, verticalité, etc.), en particulier lors de la mise en œuvre de mesures simples utilisant des règles ou des sondes mesurant des grandeurs vectorielles. Beaucoup de candidats considèrent que la conception du montage est terminée dès que les résultats qualitatifs sont observés.

Peu de candidats pensent à évaluer le nombre de Reynolds d'un écoulement. Le jury attend du candidat qu'il puisse relier le nombre de Reynolds à la nature de l'écoulement pour en déduire le modèle le plus pertinent pour analyser ses données et le comportement qualitatif attendu. Les candidats doivent par exemple s'attendre à ce que la vitesse instantanée d'un écoulement turbulent fluctue.

Le jury a été très surpris **de constater les difficultés** de certains candidats pour équilibrer un pendule pesant alors que la définition de l'équilibrage était explicitement donné dans le sujet.

### 4. 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.

L'observation du spectre d'une source lumineuse sur un écran à l'aide d'un réseau et de lentilles, demande un soin tout particulier et de la précision dans le positionnement des différents éléments. Il faut connaître le rôle respectif des différents éléments, et les positions de l'écran et des lentilles doivent pouvoir être trouvées **sans calcul**.

Les différents éléments d'un interféromètre de Michelson sont bien connus, mais son réglage est souvent laborieux. Les conditions d'éclairage sont mal connues.

Des problèmes de mesure au vernier ont souvent été constatés.

## 5. **Électromagnétisme**

Très peu de candidats ont été en mesure d'expliquer le principe de l'effet Hall de manière correcte. Le jury a eu bien souvent des réponses approximatives voire non physiques. Cette notion figure pourtant explicitement au programme et il est demandé aux candidats de connaître au moins le principe de cet effet sans nécessairement savoir redémontrer le résultat.

## II. 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.

### 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.

### 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 donc fortement conseillé d'afficher sur la courbe les incertitudes liées à chaque point.

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 abrupte 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.

## 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. 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).

## 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 : il est inutile de discuter de subtils facteurs de correction (facteurs d'élargissement), le plus souvent hors de propos ou mal utilisés.

Lorsqu'une quantité est mesurée de manière répétitive, le jury attend du candidat qu'il évalue correctement l'incertitude de type A (de répétabilité). Le jury valorise particulièrement les candidats

qui ont consulté les notices fournies (par exemple la notice d'un multimètre) pour évaluer les incertitudes.

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.

## Ajustement des données expérimentales par un modèle

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, le plus souvent par une loi affine. Il est toutefois 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 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  $\chi^2$ , quantité pertinente pour cette discussion, et fournissent un intervalle de confiance sur les paramètres de l'ajustement.

## 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 tableaux de mesures expérimentales, 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.

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.

## 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 pénalisée : 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.

## III. Évolutions pour la session 2022

Comme pour la session 2021, il ne sera pas distribué de calculatrices lors de l'épreuve. Tous les postes informatiques seront cependant équipés de la distribution Anaconda 3 pour le langage Python (comprenant entre autres les modules NumPy et SciPy), qui pourra être utilisée pour tous les calculs numériques.

## IV. Exemples de sujets donnés à la session 2021

---

## Sujet n°16

---

Le but de ce sujet est d'étudier la propagation d'ondes dans l'air et dans le brouillard.

Les caractéristiques du matériel disponible sont données en partie II. La photodiode et les transducteurs piézoélectriques supportent le brouillard mais ne doivent pas être immergés. Le laser doit être utilisé en respectant les règles de sécurité appropriées.

*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

#### A. Optique

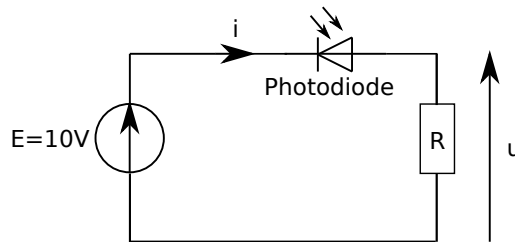


FIGURE 1 – Schéma électrique pour la photodiode

**1. Photodiode.** Réaliser le montage décrit sur la figure 1. Placer le laser à environ 5 cm de la photodiode. Dans cette question, on se placera dans l'air, sans brouillard.

Mesurer la tension aux bornes de la résistance, en fonction de la valeur de cette résistance. L'intensité du laser varie légèrement au cours du temps avec une durée caractéristique de l'ordre de quelques secondes. On mesurera la valeur maximale. On fera varier la résistance entre  $100 \Omega$  et  $100 k\Omega$ .

**2. Temps de mise en place du brouillard.** Mettre en place le dispositif représenté en figure 2. Utiliser une résistance de  $10 k\Omega$ . Allumer le générateur de brouillard et mesurer le signal de la photodiode au cours du temps. Une possibilité est de prendre une mesure toutes les 5 s.

En déduire le temps caractéristique d'établissement du brouillard dans l'aquarium.

**3. Atténuation de la lumière dans le brouillard.** On se place maintenant dans le régime où le brouillard est établi. Mesurer le signal de la photodiode en fonction de la longueur de brouillard traversée. On se limitera à des longueurs inférieures à 8 cm.

En déduire la longueur d'atténuation de la lumière rouge dans ce brouillard.

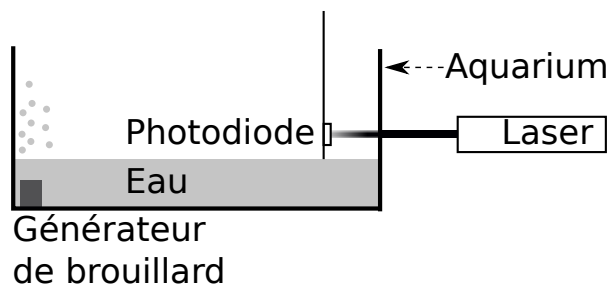


FIGURE 2 – Dispositif de mesure de l'atténuation du faisceau laser dans le brouillard.

## B. Acoustique

*Le laser, la photodiode et l'alimentation continue ne seront plus utilisés par la suite et peuvent être rangés.*

*Pour les questions suivantes, on se place dans l'air, en dehors de l'aquarium.*

**4. Filtre.** Le récepteur doit être branché à l'entrée de l'amplificateur. Allumer cet amplificateur, et vérifier qu'une amplification  $\times 10$  est sélectionnée. Relier la sortie à l'oscilloscope. Brancher l'émetteur sur le GBF, et le placer à proximité du récepteur. La tension appliquée à l'émetteur doit être purement sinusoïdale, sans composante continue.

En utilisant une transformée de Fourier (FFT), donner l'amplitude de la composante à 50 Hz du signal. On enregistrera l'image de l'écran de l'oscilloscope lors de cette mesure, et on la joindra au rapport.

Faire un filtre passe-haut en utilisant un condensateur de 100 nF et une résistance de 1 k $\Omega$ . On utilisera la résistance noire AOIP.

Placer ce filtre après la sortie de l'amplificateur. Mesurer l'amplitude de la composante à 50 Hz en sortie du filtre, et enregistrer l'image de l'écran de l'oscilloscope. Comparer à la valeur attendue.

**5. Longueur d'onde.** Placer les transducteurs à proximité l'un de l'autre. Mesurer 10 valeurs successives de distances telles que le déphasage entre les signaux de l'émetteur et du récepteur soit nul. En déduire la longueur d'onde et la vitesse du son.

**6. Atténuation de l'onde acoustique.** Mesurer l'amplitude du signal reçu par l'émetteur en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. On choisira une gamme de distances pertinente.

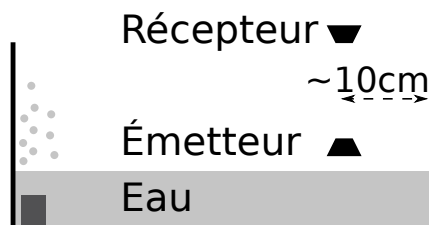


FIGURE 3 – Dispositif de mesure des ondes ultrasonores dans le brouillard.

Pour les questions suivantes, on se place dans l'aquarium, selon le schéma de la figure 3.

**7. Atténuation due au brouillard.** Mesurer l'amplitude avec ou sans brouillard pour plusieurs distances émetteur-récepteur. On pourra fixer l'émetteur sur la crémaillère.

En déduire une estimation de la longueur d'absorption des ondes acoustiques dans le brouillard.

Remarque : le générateur de brouillard perturbe le signal reçu par l'émetteur. Il peut être pertinent de l'arrêter au moment de la mesure.

**8. Longueur d'onde en présence de brouillard.** Estimer la longueur d'onde en présence de brouillard. Commenter.

## II. Caractéristiques du matériel utilisé

**Photodiode.** La photodiode est un capteur de flux lumineux. On admet que dans le montage de la figure 1 avec  $R$  fixée, la tension  $u$  est proportionnelle au flux lumineux si  $u < E$ .

**Oscilloscope.** L'oscilloscope fourni possède notamment les fonctions suivantes :

- 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.

**Panneau en mousse.** Le grand panneau en mousse peut servir «d'éventail» pour accélérer la dissipation du brouillard dans l'aquarium.

**Transducteurs piézoélectriques.** Ces transducteurs peuvent servir d'émetteur ou de récepteur d'ultrasons. La fréquence de résonance vaut 40,5 kHz. La tension maximale que supporte ces transducteurs vaut 20 V. La tension appliquée à l'émetteur doit être purement sinusoïdale, sans composante continue.

**Notices.** Une notice est fournie pour le multimètre, l'oscilloscope et le générateur de basses fréquences (GBF).



## Sujet n°6

On se propose d'étudier la diffraction de Fraunhofer de différents objets et de mettre au point les conditions expérimentales permettant de modifier l'image de l'objet en agissant sur son spectre de fréquences spatiales. L'objet diffractant est caractérisé par sa fonction de transparence (transmission) en amplitude, et l'intensité diffractée dans les conditions de Fraunhofer est proportionnelle à la Transformée de Fourier de cette fonction de transparence.

Dans un premier temps, on cherche à déterminer la focale des lentilles disponibles. Vous disposez de 3 lentilles notées A, B ou C.

- 1 En utilisant deux méthodes de votre choix, mesurer la distance focale d'une de ces lentilles, en précisant les avantages et inconvénients de chaque méthode choisie. Les expériences seront réalisées en lumière blanche avec une lampe Quartz-Iode (QI) à laquelle on n'oubliera pas d'associer un filtre anti-calorique.

Pour la suite, sauf indication contraire, les expériences seront réalisées en lumière cohérente (laser). On formera un faisceau laser élargi et parallèle avec lequel on éclairera l'objet diffractant en incidence normale.

- 2 Rappeler quelles sont les conditions de diffraction de Fraunhofer ?
- 3 Observer sur un écran la figure de diffraction d'une fente réglable. De quels paramètres dépend la largeur de la tache centrale de la figure de diffraction sur l'écran ? Mesurer cette largeur en fonction de  $D$  la distance fente-écran et modéliser les données.
- 4 On veut faire l'image de la figure de diffraction sur le capteur de la caméra (la taille du pixel est de  $5.3 \mu\text{m}$  de côté). A l'aide de l'image enregistrée par la caméra, tracer la largeur de la tache centrale de la figure de diffraction en fonction de  $1/a$  où  $a$  est la largeur de la fente. La pente a-t-elle la valeur attendue ?
- 5 Pour les trois fentes doubles inconnues, proposer un protocole et mesurer la largeur de chaque double fente, ainsi que la distance de séparation entre les fentes.
- 6 Proposer un protocole et mesurer le plus précisément possible la largeur d'un cheveu (diapositive).
- 7 Former un faisceau parallèle qui éclaire entièrement une grille (diapo) dont on fera l'image sur l'écran. En utilisant les observations précédentes, proposer et réaliser un protocole qui permette de modifier l'image de la grille en ne laissant apparaître que les lignes horizontales. Dessinez un schéma explicatif.
- 8 En remplaçant la grille par un objet (lettre), réaliser un filtre passe-haut dans le plan de Fourier afin de ne garder que l'image des bords de la lettre sur l'écran. Quel objet avez-vous utilisé pour réaliser le filtre ?
- 9 Proposer et réaliser un montage en lumière blanche permettant de réaliser simultanément (côte à côte) l'image filtrée passe-bas et l'image filtrée passe-haut d'une plume (diapositive).