

## **Banque PC inter-ENS - Session 2024**

### **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, Maxime Lanoy, François Marquier, Cendrine Moskalenko, Hugo Roussille, Benoît Semin

# Sommaire

## Sommaire

I. Bilan de l'épreuve 2024.....	3
II. Déroulement de l'épreuve.....	3
II. 1. Énoncés.....	4
II. 2. Outils informatiques.....	5
II. 3. Pannes de matériel ou incidents.....	5
III. Critères de notations.....	5
III. 1. Une épreuve expérimentale.....	5
III. 2. Choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux.....	6
III. 3. Évaluation des incertitudes.....	7
III. 4. Tracés de graphe.....	7
III. 5. Ajustement des données expérimentales.....	8
III. 6. Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus.....	8
III. 7. Communication des résultats obtenus.....	9
IV. Aspects scientifiques.....	9
IV. 1. Électricité - Électronique.....	9
IV. 2. Optique.....	11
IV. 3. Électromagnétisme.....	12
IV. 4. Mécanique et mécanique des fluides.....	12
IV. 5. Thermodynamique.....	12
IV. 6. Ondes.....	12
V. Exemples d'énoncés.....	12

## I. Bilan de l'épreuve 2024

L'épreuve de travaux pratiques est une épreuve commune aux trois ENS, d'une durée de 4h. La session 2024 s'est déroulée dans les locaux du département de physique de l'ENS Paris Saclay.

314 candidats ont passé l'épreuve de TP de physique. La moyenne de l'épreuve sur l'ensemble des ENS est de 11,58 avec un écart-type de 3,41. Les notes s'étalent de 2 à 18, 31,2 % des candidats ont obtenu une note inférieure strictement à 10, et 33,4 % une note supérieure ou égale à 14.

Le niveau expérimental des meilleurs candidats est moins bon que celui des meilleurs de la session 2023. Plus généralement, le niveau expérimental de l'ensemble des candidats est nettement 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, qui est systématiquement une question mobilisant une capacité expérimentale exigible du programme de PCSI-PC.

## II. Déroulement de l'épreuve

Les candidats sont accueillis ensemble pour recevoir les consignes relatives au bon déroulement de l'épreuve. Ils sont également informés des critères de notation, et en particulier que l'essentiel de la note est lié aux aspects expérimentaux.

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. Le fonctionnement du matériel courant d'instrumentation est également présenté.

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. **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 réalisés (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.

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. Des paillasses mal tenues ont été 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.

Une grande partie des **questions**, notamment celles du début des sujets, correspondent directement aux **items identifiés en caractères gras dans le programme** parce ce qu'ils « se prêtent particulièrement à une approche expérimentale » et qu'ils « doivent être abordés en priorité lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant doivent être privilégiées ».

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. **Une lecture attentive de l'énoncé est indispensable !**

Dans certains cas, l'énoncé est complété par des annexes ou des notices simplifiées des appareils et des capteurs. 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. En particulier, des notices simplifiées sont souvent fournies pour les capteurs : il est vivement conseillé de les lire avant d'utiliser le capteur en question.

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).

## 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.

Le jury aidait les candidats pour l'utilisation de ces logiciels, notamment pour importer les données, mettre les barres d'erreur et exporter les graphes en pdf en vue de l'impression.

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.

Les calculatrices personnelles étaient interdites. Les candidats disposaient de la calculatrice Windows, de Python, Regressi et LibreOffice. Un exemple de programme Python avec les fonctions de bases était fourni.

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.

## II. 3. 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.

## III. Critères de notations

### III. 1. Une épreuve expérimentale

**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. 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.

L'**évaluation** de l'épreuve de TP porte essentiellement sur les **compétences** et les connaissances en physique **expérimentale**, à savoir :

- choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux,
- soin et précisions des mesures,
- évaluation des incertitudes,
- tracé des graphes,
- ajustement des données expérimentales par un modèle,
- interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus,
- communication des résultats obtenus.

Ces différents points sont discutés ci-dessous.

### III. 2. Choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux

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. De nombreux candidats semblent étonnés que le jury pose des questions sur les choix expérimentaux : cette compétence est à travailler davantage.

Le candidat doit effectuer suffisamment de points de mesures, et choisir ces points de manière pertinente, en couvrant toute la gamme et en resserrant les points là où cela est pertinent, par exemple au voisinage d'une résonance. Si un point semble aberrant, il est souhaitable de refaire la mesure.

### III. 2. Soin et précisions des mesures

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 réalisation des protocoles expérimentaux et dans la prise de mesure 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 fortement pénalisés.

### III. 3. Évaluation des incertitudes

**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 honnête 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. Si un candidat utilise des notions métrologiques élaborées comme la division par  $\sqrt{3}$  de la valeur graduation, il doit en connaître les hypothèses et les limites ce qui en pratique a rarement été le cas. Très peu de candidats sont capables en pratique de mesurer les fractions de graduation d'un réglet : il est dans ce cas irréaliste d'estimer l'incertitude à  $1/(2\sqrt{3})$  graduation (quelques centaines de microns).

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.

### III. 4. Tracés de graphe

Lorsque plusieurs mesures similaires ont été réalisées, **une représentation graphique des données est indispensable**. En particulier, 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.

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 logiciels à disposition du candidat. Il est attendu que les **barres d'erreur correspondantes aux incertitudes liées à chaque point soient affichées sur les courbes.**

### III. 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 cela est pertinent ou par une autre loi. Il est indispensable de **superposer l'ajustement aux données expérimentales.** 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 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 ?

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

Il est recommandé de n'utiliser les simulations Monte-Carlo pour évaluer l'incertitude sur les paramètres du modèle que dans les très rares cas où les méthodes plus simples ne donnent pas de résultat satisfaisant.

### III. 6. Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus

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.

Pour pouvoir interpréter ses résultats, il est ainsi attendu que le candidat 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, vitesse des ondes sonores dans l'air, viscosité de l'eau, etc.

### III. 7. 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 descriptions des protocoles expérimentaux utilisés, 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 comptes-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.

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.

## IV. Aspects scientifiques

### IV. 1. 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.

Pour un nombre important d'expériences, il est indispensable de savoir brancher un câble coaxial dont une extrémité possède une connectique BNC et dont l'autre extrémité possède une connectique avec 2 fiches bananes dont la masse est identifiée par la couleur noire.

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 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>) doit également être connu des candidats. En particulier, pour la FFT, les candidats doivent savoir régler le signal principal et la gamme de représentation de la FFT pour obtenir des fréquences précises. L'accès à 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.

### 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, ...

### Câble coaxial

La propagation d'une onde électrique dans un câble coaxial est mal maîtrisée.

### 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.

## IV. 2. 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 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.

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.

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

Les expériences de polarisation de la lumière ont été sources de nombreuses confusions.

### **IV. 3. 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.

### **IV. 4. Mécanique et mécanique des fluides**

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

### **IV. 5. 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.

Une majorité de candidats a été incapable d'obtenir la pression à partir d'un capteur de pression qui délivre une tension, et de la sensibilité du capteur, malgré la simplicité du calcul. La notion de décalage du zéro (« offset ») est largement ignorée.

### **IV. 6. 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.

La majorité des candidats n'arrivent pas à expliquer si la vitesse de l'onde qu'ils mesurent est une mesure de vitesse de phase ou de groupe.

## **V. Exemples d'énoncés**

Deux énoncés sont données dans les pages suivantes.

## Sujet n°15

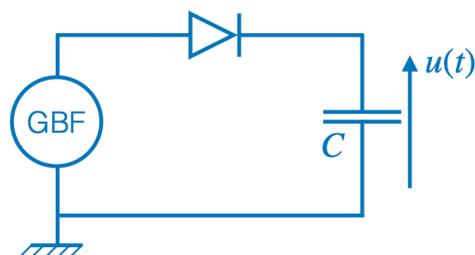
*Le (la) candidat(e) devra présenter ses résultats de manière claire, en les interprétant. Il (elle) veillera particulièrement à détailler la prise en compte des incertitudes de mesure, et à proposer une ou des explication(s) aux éventuels écarts avec le résultat attendu.*

Ce TP aborde la thématique des cavités sonores. Les différentes notices dont vous pourrez avoir besoin se trouvent sur l'ordinateur à disposition (dossier Concours sur le bureau).

**Vous ne dépasserez pas la fréquence de 2000Hz pour le signal à envoyer à l'émetteur sonore.**

1. Alimentez l'émetteur sonore grâce au GBF puis mesurez l'amplitude  $A$  du signal du récepteur en fonction de la distance entre la source et le détecteur (à 1500Hz). Vous pourrez utiliser l'amplificateur à gain variable pour amplifier le signal du récepteur. Ajustez vos mesures avec un modèle du type  $A(r) = B/r^\alpha$  avec  $B$  une constante et  $\alpha$  un exposant (entier) à déterminer. D'après ce résultat, que pouvez-vous en conclure quant à la grandeur physique que mesure le récepteur ?
2. Grâce au bouchon en polystyrène, fixez l'émetteur et le récepteur en haut de l'éprouvette graduée en plastique de 1L qui servira de cavité sonore dans toute la suite. Mesurez les premières fréquences de résonances de la cavité (au-dessus de 200Hz) et ajustez vos mesures par la loi théorique  $f_n = \frac{nc}{2L}$  avec  $c$  la vitesse du son,  $L$  la longueur de la cavité et  $n$  le numéro du mode de résonance. Quelle vitesse du son  $c$  obtenez-vous ?
3. Mesurez l'amplitude autour de la quatrième résonance, en veillant à faire des mesures entre les deux minima entourant la résonance.
4. Répétez l'opération après avoir ajouté un volume connu de liquide dans l'éprouvette graduée, 25mL et 50mL. Tracez les trois diagrammes sur la même figure. Que remarquez-vous ? **Faites attention à ne pas mouiller l'émetteur et le récepteur.** Dans la suite nous voulons suivre la dynamique de remplissage de l'éprouvette grâce au son dans la cavité. Quelle fréquence d'excitation devez-vous choisir pour avoir une variation linéaire de l'amplitude lors d'un remplissage à débit constant de la cavité (sur la gamme de volume 0-50mL)?

5. Réalisez le circuit ci-contre avec la diode et la boîte à décades de capacités. Observez le signal  $u(t)$  aux bornes du condensateur en fonction de la fréquence du signal en entrée et de la valeur de la capacité. Expliquez le principe de fonctionnement du montage.



6. Remplacez le signal du GBF du montage de la question 5 par le signal du récepteur sonore (en sortie de l'amplificateur) de sorte à avoir une mesure directe de l'amplitude du signal sonore.
7. En utilisant la colonne d'eau (avec un robinet), la platine à translation verticale et le tuyau en plastique, faites un montage pour injecter de l'eau dans l'éprouvette (en faisant ruisseler le liquide le long de la paroi de l'éprouvette afin d'éviter les perturbations acoustiques). Mesurez la dynamique de remplissage de l'éprouvette pour une hauteur

donnée de la platine et d'eau dans la colonne (en ouvrant le robinet au maximum). Enregistrez la trace sur clé USB puis extraire la vitesse de remplissage.

8. Mesurez la vitesse pour différentes hauteurs d'eau dans la colonne (sans changer la hauteur de la platine de translation). Vos mesures de vitesses sont-elles en accord avec la formule de Torricelli ? La formule de Torricelli est obtenue en appliquant le théorème de Bernoulli dans la colonne d'eau.
9. En revenant au montage simple de la question 2, avec le GBF quel type de signal pourriez-vous envoyer à l'émetteur afin de visualiser directement sur l'oscilloscope le spectre de la cavité sonore ?
10. Utilisez cette méthode pour observer l'évolution du spectre du son émis lorsque vous laissez tomber un jet d'eau dans l'éprouvette. Décrivez vos observations.

## Matériel

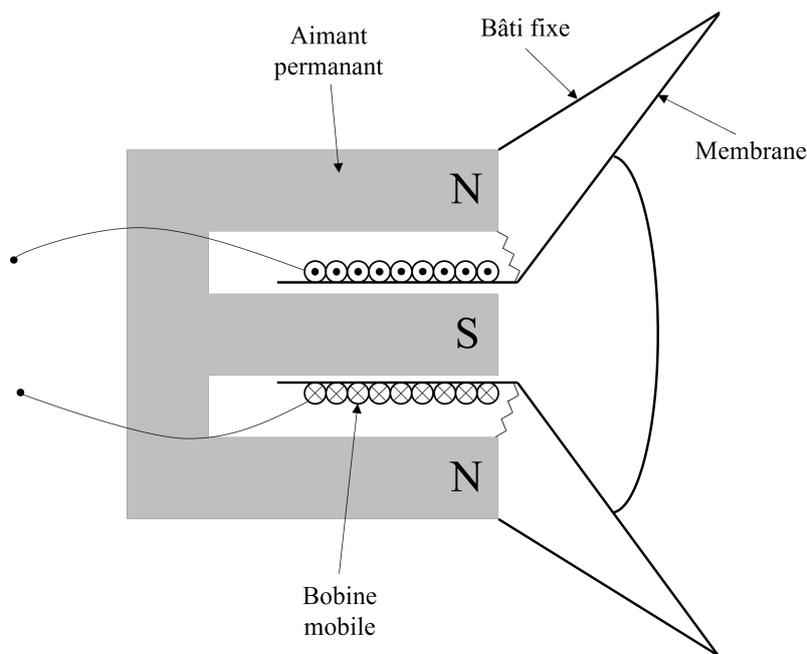
- Oscilloscope Keysight
- GBF Agilent 33500B
- Boite à décades de capacités
- 1 diode de redressement
- 1 amplificateur à gain variable
- Câbles et connecteurs (BNC, bananes, Y, Pincés crocodile)
- Potences, tiges, pincés, noix de fixation
- 1 platine de translation verticale
- 1 colonne d'eau avec robinet (2L)
- 1 tuyau en plastique
- 1 bécher 100mL
- 1 bouteille plastique 2L
- 1 éprouvette graduée 1L
- 1 émetteur sonore
- 1 récepteur sonore
- 1 réglet 30 cm
- 1 réglet 50 cm
- 1 seringue 50mL
- Morceaux de polystyrène pour fixer le récepteur et l'émetteur
- 1 rouleau d'essuie-tout
- 1 éponge

Concours commun 2024 - ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE  
Filière PC

Épreuve de TP  
Sujet n°22

*L'ensemble des valeurs mesurées seront accompagnées de barres d'erreur ou d'incertitudes qui devront être systématiquement justifiées. Les ajustements que vous ferez ne seront pas nécessairement accompagnés d'incertitudes sur les coefficients.*

Ce TP propose l'étude mécanique et électrique d'un haut-parleur. Un haut-parleur est un appareil électro-mécanique composé d'un aimant permanent en forme de double cylindre concentrique permettant de créer un champ radial constant. Autour du cylindre intérieur est enroulé une bobine mobile relié à une membrane souple. Cette membrane est maintenue par un bâti fixe. Une coupe est présenté ci-dessous :



L'application d'un courant dans la bobine crée une force de Laplace permettant de faire bouger la bobine et donc la membrane. Une fois la membrane mise en mouvement, l'air est entraîné et une onde acoustique peut alors se propager.

Ce TP se focalisera sur le haut-parleur en lui-même et non sur la propagation acoustique. Après une étude de la réponse impulsionnelle, nous proposons d'étudier la partie électrique du haut-parleur avec l'étude de son impédance. Nous effectuerons par la suite la réponse en accélération de la membrane puis la réponse en position de celle-ci.

# 1 Réponse impulsionnelle

L'ensemble mécanique (membrane + bobine) peut être modélisé par un ressort de raideur  $k$ , une masse  $m$  et une dissipation visqueuse de coefficient  $\alpha$  en série. L'ensemble peut se déplacer que selon un axe que l'on nommera  $x$ . Dans cette partie, nous étudions la réponse temporelle.

1. Brancher l'oscilloscope directement sur le haut-parleur (sans alimentation) et faire bouger la membrane manuellement en appuyant dessus. Qu'observez-vous sur l'oscilloscope ? Expliquer quelle est le phénomène physique sous-jacent. Quelle est la grandeur mécanique que vous observez (à une constante près) sur l'oscillogramme ?
2. On écarte la membrane d'une distance  $x_0$  de sa position d'équilibre et on lâche celle-ci sans vitesse initiale. Qu'observez-vous à l'oscilloscope ? Mettre en équation le système mécanique et on posera  $\lambda = \frac{\alpha}{2\sqrt{km}} < 1$  et  $\omega_0$  la pulsation caractéristique. Dans quel régime est le système mécanique ? En déduire la valeur de  $\lambda$  et de  $\omega_0$  de vos mesures.

# 2 Impédance

On propose à présent d'étudier la réponse électrique du haut-parleur. Il est possible de montrer que l'impédance équivalente du système vaut :

$$Z_{\text{HP}} = R + jL\omega + \frac{B^2\ell^2}{\alpha + j\left(m\omega - \frac{k}{\omega}\right)}$$

avec  $B$  le champ magnétique créé par l'aimant et  $\ell$  la longueur du fil de la bobine. Le premier terme  $R + jL\omega$  est le terme purement électrique avec une bobine composée d'une inductance pure  $L$  et d'une résistance en série  $R$ . Le dernier terme est la rétroaction du mouvement de la bobine dans un champ magnétique.

3. Mesurer expérimentalement l'impédance du haut-parleur (module et phase) en fonction de la fréquence.
4. À partir de votre courbe expérimentale estimer la valeur de  $R$ ,  $L$ ,  $\omega_0$  et le produit  $B^2\ell^2/\alpha$ .

# 3 Réponse en accélération

Une grandeur pertinente à étudier pour la propagation du son est l'accélération de la membrane du haut-parleur. Afin de pouvoir mesurer l'accélération, vous disposez d'un accéléromètre de petite taille pouvant se coller sur la membrane. Il est nécessaire de l'alimenter grâce au conditionneur mis à disposition.

5. À partir du développement théorique de la partie 1, quelle est la réponse en position de la membrane en fonction de la fréquence d'excitation ?
6. En déduire la réponse en accélération en fonction de la fréquence d'excitation.
7. La réponse de l'accéléromètre possède nécessairement un offset dû à l'accélération de la pesanteur, comment pouvez-vous vous en affranchir directement sur l'oscilloscope ?
8. Tracer la réponse du haut-parleur en accélération. On veillera à identifier quelle est la grandeur d'entrée du système mécanique et la grandeur de sortie.
9. Est-ce cohérent avec les équations mécaniques du haut-parleur ? Quels paramètres pouvez-vous retrouver ?

## 4 Réponse en position

Afin d'étudier la réponse du système en régime sinusoïdal forcé on étudiera dans cette partie la position de la membrane. Pour cela vous avez à votre disposition un capteur de position LVDT (Linear Variable Differential Transformer) fonctionnant sur le principe d'induction mutuelle (non étudié ici). Il est nécessaire d'alimenter ce capteur sous 24 V continu.

10. Afin de vérifier la réponse du capteur, tracer la tension de sortie du capteur en fonction de la position de la tige. Commenter cette réponse et déterminer la sensibilité du capteur.
11. Alimenter le haut-parleur à l'aide du GBF et visualiser la position de la membrane au cours du temps. Tracer alors la réponse  $20\log(U_{LVDT}/I_{HP})$  en fonction de la fréquence alors  $U_{LVDT}$  la tension de sortie du capteur et  $I_{HP}$  le courant traversant le haut-parleur. On tracera également le déphasage entre  $U_{LVDT}$  et  $I_{HP}$ .
12. Quelle réponse obtenez-vous ? Est-ce en accord avec les prédictions de la question 3 ? En déduire la valeur de  $\omega_0$  et  $\lambda$  et comparer à vos valeurs de la partie précédente.
13. Pour le moment, il est impossible de trouver les valeurs de  $k$  et de  $m$  séparément. Mettre en place un protocole simple pour changer la valeur de  $m$  ou de  $k$  et en déduire ces valeurs pour le haut-parleur.