

# 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 :

Erwan Allys, Delphine Chareyron, Eline Dehandshoewercker, Arnaud Le Diffon, Timothée de Guillebon, Julien Laurat, Cendrine Moskalenko, Philippe Odier, Arnaud Raoux, Clément Sayrin, Benoît Semin, Romain Volk.

<b>I. Bilan de l'épreuve 2019 .....</b>	<b>4</b>
1. Remarques générales.....	5
2. Électricité - Électronique.....	6
3. Mécanique et mécanique des fluides .....	7
4. Optique .....	8
5. Ondes .....	8
6. Thermodynamique.....	8
<b>II. Compétences évaluées.....</b>	<b>9</b>
Choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux.....	9
Mesures et tracés de graphe .....	9
Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus .....	10
Incertitudes de mesures .....	10
Ajustement des données expérimentales par un modèle .....	11
Communication des résultats obtenus .....	11
Discussion avec le jury .....	12
<b>III. Exemples de questions posées.....</b>	<b>12</b>
1. Acoustique .....	12
2. Électronique .....	12
3. Optique .....	12
4. Thermodynamique.....	12
5. Description d'un sujet donné lors de la session 2018.....	13
<b>IV. Évolutions pour la session 2020 .....</b>	<b>13</b>

L'épreuve de travaux pratiques est une épreuve commune aux trois ENS, d'une durée de 4h. La session 2019 s'est déroulée au département de physique de l'ENS Lyon. 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 leurs paillasses 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.

Les candidats n'avaient accès qu'à ces 3 logiciels par défaut. Pour certains sujets, des logiciels d'acquisition spécifiques étaient utilisés, leur fonctionnement était systématiquement expliqué aux candidats.

Le jury tient particulièrement 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 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.

Les calculatrices personnelles étaient interdites, et une calculatrice de type « collègue » était mise à disposition de chaque candidat.

## 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... 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. **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.

## Modalités 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...) 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.

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...) 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 2019

261 candidats ont passé l'épreuve de TP. La moyenne de l'épreuve sur l'ensemble des ENS est de 10,91 avec un écart-type de 3,66, les notes s'étalant de 3 à 20.

Comme lors des sessions précédentes, le jury constate une forte hétérogénéité dans le niveau des candidats. Si quelques candidats ont fait preuve de qualités indéniables d'expérimentateurs en réalisant des prestations excellentes, beaucoup de candidats, au contraire, ne maîtrisent pas les appareils de base (multimètre, oscilloscope notamment) ou les montages simples (formation d'une image par exemple), pourtant explicitement au programme, ou montrent de grandes difficultés pour rédiger un rapport satisfaisant.

Le jury regrette par ailleurs que de nombreux candidats aient une approche trop théorique de la physique expérimentale. Aligner un dispositif optique ou monter un circuit électronique ne devrait pas nécessiter de longs calculs.

Cela traduit un manque regrettable de préparation aux épreuves de physique expérimentale pour un trop grand nombre de candidats. La physique expérimentale nécessite une certaine maturité qui ne peut s'acquérir que par une pratique active. Nous encourageons les futurs candidats à renforcer leur préparation à ce genre d'épreuve.

## 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, ...) 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 surpris, 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 avancé de façon identique dans un 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, impédances) 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 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 réaliser celui qui a été dessiné. 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 est en pour le matériel qu'ils ont à leur disposition.

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. 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.

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 doivent 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 sanctionnés. 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,...) 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.

Concernant les fonctions plus évoluées (mode <monocoup>, calcul de la transformée de Fourier <FFT>, mode de défilement <Roll>), leurs 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 leurs principes de fonctionnement.**

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.

## 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. L'évaluation de ce nombre de Reynolds a posé problème à beaucoup de candidats dans le cas simple d'une vidange de Toricelli. 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.

## 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 des différents éléments. Il faut notamment faire passer les faisceaux lumineux par le centre des lentilles pour respecter les conditions de Gauss.

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. Ondes

Les notions de vitesse de phase et de vitesse de groupe sont mal connues. La vitesse de phase est mesurable : il s'agit bien d'une quantité « physique » !

Les ondes sonores dans l'air peuvent être considérées comme non-dispersives.

## 6. Thermodynamique

Les critères de choix d'un thermomètre sont mal connus, notamment entre un thermocouple et un capteur de température à infrarouge.

Les candidats doivent savoir utiliser les thermomètres à capteur infrarouge. Ils doivent être conscients que ces thermomètres mesurent une température de surface (si le coefficient d'émissivité a été bien choisi) sur une zone dont l'extension spatiale dépend de la distance entre le capteur et l'objet. Ils doivent savoir que la gamme de longueurs d'onde mesurées par ces capteurs est choisie pour ne pas mesurer la température de l'air.

Les candidats doivent savoir qu'un thermocouple entouré d'une gaine métallique utilisé dans l'air ne mesure pas à la température de l'air en un seul point.

## 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 de ce dernier 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 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 ?

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 comptes-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. Exemples de questions posées

Nous donnons ici des exemples de questions posées dans les énoncés des épreuves de TP en 2019 ainsi que la trame d'un des sujets donnés lors de la session 2018. Le jury tient à rappeler que le protocole complet n'est jamais donné au candidat, qui doit notamment être capable de choisir les composants électroniques ou optiques, par exemple, les plus adaptés et de justifier ses choix. Une grande importance est donc accordée à la discussion avec les membres du jury lors de l'épreuve.

#### 1. Acoustique

Le candidat dispose de deux transducteurs piézoélectriques, d'un générateur basse-fréquence et d'un oscilloscope.

*Mesurez la vitesse du son dans l'air. Estimez la précision de la mesure réalisée.*

#### 2. Électronique

Le candidat dispose d'un ventilateur d'ordinateur (qui est un dipôle), d'une alimentation stabilisée et de deux multimètres.

*Mesurer la caractéristique statique courant-tension du ventilateur.*

#### 3. Optique

Le candidat dispose de lentilles de plusieurs focales, d'un réseau de diffraction, d'un écran blanc et d'une source lumineuse.

*Observer le spectre de la source lumineuse sur l'écran en utilisant les lentilles de votre choix.*

#### 4. Thermodynamique

Le candidat dispose d'un thermomètre à thermocouple, d'une caméra thermique interfacée, d'un décapeur thermique, d'un chronomètre et d'un objet métallique à chauffer. Des notices simplifiées sont fournies pour le thermomètre et de la caméra thermique. Il est précisé dans la notice de la caméra thermique que le capteur de celle-ci est formé d'une matrice de capteurs de température infrarouge.

*Mesurer la température maximale de la surface de l'objet chauffé par le décapeur thermique, en fonction du temps.*

## 5. Description d'un sujet donné lors de la session 2018

L'une des expériences proposées cette année proposait l'étude du comportement d'un laser He-Ne lorsque le faisceau laser est réfléchi vers le tube laser. Le laser est un laser polarisé, cette information n'étant pas donnée au candidat.

L'étude se séparait en plusieurs parties :

- Observation des fluctuations d'intensité à l'allumage en enregistrant l'intensité sur une photodiode (notice fournie) placée après un polariseur. Le candidat doit choisir de façon appropriée la façon d'observer ces signaux sur un oscilloscope ou sur un multimètre, régler les calibres et la base de temps, etc. Aucune information n'est donnée au préalable sur l'amplitude caractéristique ou l'échelle de temps de ces variations ;
- Mesure de l'intensité lumineuse après un polariseur, loi de Malus. Le candidat doit en déduire que le laser est polarisé rectilignement et dans quelle direction ;
- Le faisceau laser est envoyé sur un cube séparateur. Il s'agit d'un cube polariseur mais cette information n'est pas donnée dans le sujet. Le candidat est invité à identifier l'action du cube, pour chacun des deux bras de sortie, en fonction de la polarisation en entrée du cube : comment l'intensité est répartie entre les deux bras et comment l'onde est polarisée en sortie de chacun des deux bras du cube. Ici, le candidat doit notamment identifier par lui-même la lame  $\lambda/2$  comme étant le choix approprié pour faire varier la polarisation de l'onde en entrée du cube ;
- Un miroir est placé sur un des bras de sortie du cube pour renvoyer une partie du faisceau dans le tube laser. L'autre bras permet d'enregistrer les fluctuations d'intensité du laser. Le signal est observé sur oscilloscope et une FFT permet d'en identifier les principales caractéristiques.

## IV. Évolutions pour la session 2020

Comme pour la session précédente, les calculatrices personnelles seront interdites. De plus, et contrairement à la session 2019, 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.