

## **Banque PC inter-ENS - Session 2022**

### **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** :

Eric Brillaux, Delphine Chareyron, Timothée de Guillebon, Jérémy Ferrand, Raphaël Jeanneret, Léa Lachaud, Vincent Langlois, Arnaud Le Diffon, François Marquier, Cendrine Moskalenko, Ludivine Oruba, Benoît Semin

# Plan

I. Introduction.....	3
II. Déroulement de l'épreuve.....	3
II. 1. Énoncés.....	4
II. 2. Outils informatiques.....	5
II. 3. Moyens d'évaluation.....	5
II. 4. Pannes de matériel ou incidents.....	5
III. Bilan de l'épreuve 2022.....	6
III. 1. Remarques générales.....	6
III. 2. Électricité - Électronique.....	7
III. 3. Mécanique et mécanique des fluides.....	9
III. 4. Optique.....	10
III. 5. Électromagnétisme.....	10
III. 6. Thermodynamique.....	10
III. 7. Temps de mesure et fréquence d'échantillonnage.....	10
IV. Compétences évaluées.....	11
IV. 1. Choix et mise en œuvre des protocoles expérimentaux.....	11
IV. 2. Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus.....	11
IV. 3. Mesures et tracés de graphe.....	12
IV. 4. Incertitudes de mesures.....	12
IV. 5. Ajustement des données expérimentales.....	13
IV. 6. Communication des résultats obtenus.....	14
IV. 7. Discussion avec le jury.....	14
V. Évolutions pour la session 2023.....	14
VI. Exemples de sujets donnés à la session 2022.....	14

## I. Introduction

L'épreuve de travaux pratiques est une épreuve commune aux trois ENS, d'une durée de 4h. La session 2022 s'est déroulée dans les locaux du département de physique de l'ENS de Lyon. Vu le contexte sanitaire, le port du masque était autorisé mais pas obligatoire. Un bon renouvellement de l'air était assurée par des ventilations mécaniques contrôlées, et par l'ouverture des portes et des fenêtres.

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

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

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

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

## II. Déroulement de l'épreuve

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

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

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

À l'issue des 4h d'épreuve, les candidats sont invités à ranger le matériel utilisé et remettre la paillasse dans l'état dans lequel ils l'ont trouvée en arrivant dans la salle. Le jury attend des candidats une bonne tenue de leur paillasse pendant et à l'issue de l'épreuve, pour faire preuve d'une qualité indispensable à un bon expérimentateur et par respect envers les candidats suivants. Des paillasses particulièrement mal tenues 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. Les éventuelles parties qui ne feraient pas appel explicitement au programme sont présentées dans le sujet de manière à donner aux candidats toutes les informations et les bases nécessaires pour effectuer les mesures expérimentales et leurs analyses.

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

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

### Notices et annexes

Dans certains cas, l'énoncé est complété par des annexes ou des notices simplifiées. Il peut s'agir d'extraits de notice constructeur ou de courtes présentations du fonctionnement des appareils à la disposition des candidats. Les candidats doivent pouvoir en extraire les informations nécessaires à la réalisation des expériences ou à leur analyse, lors de l'estimation des barres d'erreur par exemple.

## II. 2. Outils informatiques

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
- Distribution Python Anaconda
- le logiciel Latis Pro était également disponible sur la plupart des ordinateurs.

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

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

Il était fréquent que des sujets demandent l'utilisation de routines Python fournies au candidat, par exemple pour interfacer des cartes Arduino. Le candidat 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 est amenée à se généraliser.

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 étaient interdites, des calculatrices « collège » étaient fournies aux candidats.

### II. 3. Moyens d'évaluation

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

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

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

### II. 4. Pannes de matériel ou incidents

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

La réactivité du candidat, quant à elle, est prise en compte dans la notation : pour les pannes simples, il est attendu du candidat qu'il détecte l'existence d'un problème, et pour les pannes élémentaires (ampoule grillée, source de tension qui ne délivre plus de tension ou de courant, etc.) qu'il identifie la nature du problème, surtout s'il dispose du matériel adéquat (par exemple, un

multimètre permet de tester si une alimentation est défectueuse ou non). Le candidat qui suspecterait une panne de matériel est encouragé à la signaler rapidement aux examinateurs.

### III. Bilan de l'épreuve 2022

250 candidats ont passé l'épreuve de TP de physique. La moyenne de l'épreuve sur l'ensemble des ENS est de 12,11 avec un écart-type de 3,11, les notes s'étalant de 3 à 18.

Le jury tient à signaler que cette année le niveau expérimental des candidats est meilleur que celui de la session 2021, mais reste en retrait par rapport à celui de l'année 2019 et des années précédentes, avec notamment moins d'excellents candidats. La plupart des candidats sont lents et peu réactifs. Peu de candidats profitent de la discussion avec les examinateurs pour améliorer leur protocole expérimental ou s'apercevoir d'une erreur de raisonnement, et beaucoup s'accrochent à leur première idée. Très peu de candidats sont suffisamment à l'aise pour prendre du recul sur les mesures qu'ils effectuent, ce qui dénote un manque d'habitude dans la réalisation des expériences. Certains candidats manquent aussi de sens pratique : par exemple, un pied à coulisse ne sert à rien pour mesurer une distance ou une longueur au mm près, car une règle remplit très bien ce rôle ; certains candidats ne pensent pas à utiliser (ou utilisent mal) les accessoires présents sur la paillasse (serre-joint, papier millimétré, tuyau ou bouchon, ...). Le jury a conscience que la formation expérimentale des candidats a pu, cette année encore, pâtir des conditions sanitaires. Cependant, il espère que la formation expérimentale reprendra toute sa place dans la formation lors des prochaines années.

#### III. 1. Remarques générales

##### Préambule

Il est évident que, s'agissant d'une épreuve de travaux pratiques, les candidats sont évalués sur leur pratique expérimentale (mesure, protocole, représentation de données, etc.) ainsi que l'interprétation de ces mesures, plutôt que sur leur capacité à calculer ou à restituer le cours. Le jury attend donc du candidat qu'il fasse des mesures ou des observations expérimentales pour répondre aux questions du sujet ! Le jury est frappé, tout autant que lors de la session précédente, par le nombre de candidats pour lesquels cela ne va pas de soi. La réponse à une question du type « 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 possibles : le **soin** dans la prise de mesure et dans le tracé des courbes est un **élément clé de la notation**. Des mesures faites à la va-vite sont systématiquement sanctionnées, alors même que le candidat pense avoir bien avancé dans le sujet. Des notes très largement différentes ont ainsi pu être attribuées à des candidats ayant atteint le même niveau du sujet. Le jury tient notamment à insister sur le fait qu'une trop forte imprécision des résultats peut faire manquer au candidat certains aspects importants du problème permettant, par exemple, de faire le choix entre deux modèles.

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

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

### 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.

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

### Traitement des données

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

## III. 2. 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 10 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

certaines 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 connu 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.

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.

## 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>). 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.**

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.

### Bobines

Trop peu de candidats savent élaborer un protocole pour déterminer la valeur de l'inductance d'une bobine.

### Composants réels

Les candidats doivent être conscients que les composants réels (bobines, condensateur, ...) et les appareils électronique (générateur de basses fréquences, oscilloscopes, ...) ont un comportement plus complexe que celui des modèles idéals. 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, ...

## III. 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 savoir que la vitesse instantanée d'un écoulement turbulent fluctue, ou que la force sur un objet n'est approximativement quadratique qu'à grand nombre de Reynolds.

L'importance de la hauteur du tube de vidange sur l'écoulement est souvent incomprise. L'effet du tube de Mariotte sur l'écoulement semble souvent mystérieux aux candidats.

## III. 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.

### III. 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.

### III. 6. Thermodynamique

Les candidats doivent savoir qu'un thermomètre dont le capteur est entouré d'une gaine métallique ne mesure pas la température en un point.

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. Il faut donc choisir la position du thermomètre par rapport à l'objet pour mesurer la température de la zone pertinente, et en particulier pour ne pas mesurer la température d'un autre objet.

De manière générale, la compréhension qualitative des transferts thermiques (diffusion, convection, rayonnement) a posé beaucoup de problèmes aux candidats.

Certains candidats ne pensent pas qu'une variation de pression dans un récipient fermé puisse provenir d'une variation de température.

### III. 7. Temps de mesure et fréquence d'échantillonnage

Certains candidats ont éprouvés des difficultés à choisir une durée pertinente de mesure, ou une fréquence d'échantillonnage adaptée. Cette difficulté est assez générique, et concerne aussi bien les mesures par chronomètre, à l'aide d'un logiciel d'interfaçage de type LatisPro ou d'une caméra. Par exemple, il n'est pas pertinent de prendre 10 mesures espacées de 20 ms dans l'expérience de Clément-Desormes.

## IV. Compétences évaluées

L'épreuve de TP est une épreuve de physique expérimentale où le candidat doit montrer sa capacité à mener à bien des expériences en suivant une démarche scientifique rigoureuse. Le jury

observe le candidat manipuler, mesurer, analyser et commenter. Il juge aussi l'autonomie et la réactivité aux différentes questions.

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

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

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

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

#### IV. 2. Interprétation qualitative et quantitative des résultats obtenus

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

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

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

### IV. 3. Mesures et tracés de graphe

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

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

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

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

### IV. 4. Incertitudes de mesures

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

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

Le jury n'attend **aucun développement métrologique technique** mais une estimation raisonnable de l'incertitude : 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. 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 l'anémomètre sans comparer aux fortes fluctuations turbulentes de l'écoulement considéré).

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

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

#### IV. 5. Ajustement des données expérimentales

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

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

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

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

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

#### IV. 6. Communication des résultats obtenus

Il est obligatoire de rendre un **compte-rendu** à la fin de l'épreuve. Il fait partie de l'épreuve et est indispensable à la notation. Il doit être concis (3 à 6 pages typiquement) mais contenir toutes les informations importantes. Celui-ci doit notamment **inclure** les différentes **courbes** demandées. Il doit comporter les 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. 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 difficile à trouver au milieu des paragraphes).

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

#### IV. 7. Discussion avec le jury

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

### V. Évolutions pour la session 2023

La quasi-totalité des candidats utilisent Régressi, Python ou LibreOffice pour tracer les courbes. Le jury envisage de ne conserver que ces 3 logiciels pour le tracé des courbes, et de ne plus fournir LatisPro et Scidavis. Les postes informatiques seront 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. Des fichiers d'exemple de tracés de courbe sous Python seront fournis. Vu les nouveaux programmes, les examinateurs espèrent que les candidats seront plus familiers avec Python dès la session 2023.

### VI. Exemples de sujets donnés à la session 2022

Deux exemples de sujet sont donnés dans les pages suivantes.

---

## SUJET N°1

---

Le facteur adiabatique  $\gamma$  caractérise le comportement d'un système au cours d'une transformation adiabatique, c'est-à-dire en l'absence de transfert thermique. Il est défini à partir des capacités calorifiques à pression constante  $C_p$  et volume constant  $C_V$  selon

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}. \quad (1)$$

Nous proposons de mesurer le facteur  $\gamma$  de l'air par deux méthodes historiques : l'expérience de Clément-Désormes et l'expérience de Rüchardt.

Le ou la candidat(e) devra décrire le protocole expérimental choisi et présenter ses résultats de manière claire, en les interprétant. Il ou elle discutera les incertitudes de mesure. Il ou elle devra imprimer une courbe d'acquisition pour chacune des deux expériences proposées ci-dessous.

### 1. Introduction

Nous traiterons l'air comme un mélange idéal de gaz parfaits diatomiques.

- 1) On rappelle que  $C_V = \frac{3}{2}nR$  et  $C_p = \frac{5}{2}nR$  pour un gaz parfait diatomique. En déduire la valeur numérique (décimale) de  $\gamma$  attendue pour l'air.

### 2. Expérience de Clément-Désormes

Pour cette expérience, on dispose d'un grand récipient, d'une pompe manuelle, de bouchons, de tuyaux, et d'un capteur de pression relative relié à une carte d'acquisition interfacée avec le logiciel *LatisPro* (la notice est fournie).

L'air enfermé dans un récipient à température ambiante est d'abord soumis par l'opérateur à une surpression  $\delta p$  par rapport à la pression atmosphérique. Ensuite, on laisse une partie de l'air s'échapper brusquement avant de reboucher immédiatement le récipient, de sorte que l'air dans le récipient retourne à la pression atmosphérique. Finalement, on attend l'équilibre thermodynamique ; dans l'état final, l'air est à température ambiante et est à une surpression  $\delta p'$ .

- 2) Proposer un protocole précis pour réaliser cette expérience avec le matériel disponible (en particulier, expliquer comment réaliser l'état initial du gaz et la phase d'échappement). Réaliser un schéma.
- 3) Justifier que l'échappement de l'air puisse être considérée comme une transformation adiabatique. Expliquer l'apparition d'une surpression  $\delta p'$  en fin d'expérience.

On admettra la relation

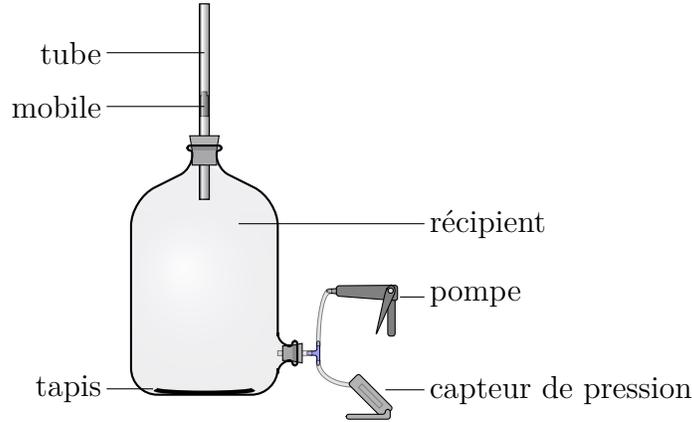
$$\delta p = \gamma(\delta p - \delta p'). \quad (2)$$

- 4) Réaliser plusieurs acquisitions sur *LatisPro* en justifiant le choix des paramètres et montrer comment mesurer  $\delta p$  et  $\delta p'$ . Proposer une régression linéaire pour déterminer  $\gamma$ . Comparer à la valeur attendue pour un gaz parfait diatomique, calculée en question 1. Commenter.

### 3. Expérience de Rüchardt

Pour cette expérience, on dispose, en plus du matériel précédent, d'un tube avec un mobile (une masse coulissante), de petites masses avec de la pâte adhésive, d'une balance, d'un pied à coulisse, d'un capteur de pression absolue interfacé avec le logiciel *LatisPro*, et d'un thermomètre.

L'expérience de Rüchardt consiste à étudier les oscillations d'un mobile soumis à son poids et à la force de pression d'un gaz (ici de l'air) enfermé dans un récipient. Le mobile coulisse dans un tube cylindrique vertical de même diamètre.



**Figure 1** Expérience de Rüchardt. Le capteur de pression est interfacé avec le logiciel **LatisPro**.

- 5) Maintenez le mobile dans le haut du tube, imposez une légère surpression en donnant un ou deux coups de pompe, puis lâchez le mobile. Expliquez par un argument qualitatif l'origine des oscillations. Justifiez rapidement que l'accélération  $\ddot{z}$  est proportionnelle à la surpression  $\delta p$ , et que  $\delta p$  est proportionnel à l'altitude  $z$  du mobile par rapport à sa position d'équilibre.

On suppose que la transformation que subit le gaz est adiabatique. On admet alors que la pulsation des oscillations vaut

$$\omega = \sqrt{\gamma \frac{p_e s^2}{m V_e}}. \quad (3)$$

où  $p_e$  et  $V_e$  désignent les pression et volume du gaz à l'équilibre dans le récipient,  $s$  la section du tube (homogène à une surface), et  $m$  la masse du mobile.

- 6) Mesurer le paramètre  $s$  en expliquant votre démarche.
- 7) Réaliser plusieurs acquisitions sur **LatisPro** en lestant éventuellement le mobile avec les petites masses. Décrire le protocole et imprimer une courbe d'acquisition.
- 8) Pour chaque acquisition, mesurer la pression d'équilibre  $p_e$ , la pulsation  $\omega$  des oscillations, et la masse  $m$  du mobile lesté, en expliquant votre démarche. On donne  $V_e = 11,2 \text{ L}$  pour le volume à l'équilibre. En déduire  $\gamma$  et comparer à la valeur attendue.
- 9) Les oscillations sont-elles parfaitement sinusoïdales ? Proposez plusieurs explications. La raison principale est que le gaz subit des échanges conducto-convectifs au niveau des parois du récipient, qui conduisent à un amortissement des oscillations, de coefficient (en  $\text{s}^{-1}$ )

$$\Lambda \simeq \frac{h S T_e}{10 p_e V_e}. \quad (4)$$

avec  $S \simeq 0,3 \text{ m}^2$  la surface du récipient,  $T_e$  la température d'équilibre de l'air dans le récipient, et  $h$  le coefficient de Newton. Rappelez la définition de  $h$ . Expliquez comment mesurer  $\Lambda$ , faire une mesure, puis estimer  $h$ .

\*\*\*

FIN DU SUJET

---

## Sujet n°17

---

Ce sujet porte sur les effets thermiques de la lumière.

Les caractéristiques du matériel disponible sont données en partie II.

**Le (la) candidat(e) veillera à toujours respecter les mesures de sécurité relatives aux lasers.**

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

### I. Mesures

#### I.1. Chauffage d'un liquide

Allumer la lampe quartz-iodé. Ne pas éteindre cette lampe avant la fin de la partie I.2. Si cela est nécessaire, il est possible de cacher le faisceau lumineux à l'aide de l'écran blanc, que l'on peut fixer à une potence.

Prendre un bécher en plastique transparent de contenance 50 mL. Verser 40 mL d'eau. Placer ce bécher au dessus de la lampe quartz-iodé, à une position où les dimensions de la tache lumineuse est la même que la dimension du fond du bécher. On veillera à ne pas renverser d'eau sur la lampe.

On utilisera dans cette partie le thermomètre à sonde métallique pour mesurer la température.

##### 1. Température en fonction du temps dans l'eau.

Mesurer la température de l'eau au centre du bécher en fonction du temps, lorsque le bécher est éclairé par la lampe. On effectuera la mesure pendant 5 minutes. Tracer la courbe correspondante, et ajuster les données par une fonction appropriée.

##### 2. Température en fonction du temps dans la sauce soja.

Faire la même mesure pour une solution contenant 10% de sauce soja. Tracer et ajuster les points obtenus.

#### I.2. Chauffage d'une plaque

Le but de cette partie est de mesurer la variation au cours du temps de la température d'une plaque éclairée par la lampe quartz-iodé. Plusieurs configurations seront étudiées : plaque noire, plaque blanche, et plaque noire soumise à un écoulement d'air créé par un ventilateur.

### 3. Mesure de la vitesse de l'écoulement du ventilateur.

Mesurer la vitesse moyenne de l'écoulement créé par le ventilateur, en fonction de la tension appliquée. On ne dépassera pas la tension maximale de 12 V. On placera l'anémomètre à 15 cm du centre du ventilateur. Attention, le fil chaud est très fragile, il ne faut pas le toucher !

### 4. Mesure de la variation de température d'une plaque noire.

Placer une plaque noire de manière à ce que la tache lumineuse ait un diamètre de 60 mm. Placer le thermomètre infrarouge de manière à mesurer la température dans la zone éclairée de la plaque. Faire un test de mesure pendant 10 s pour vérifier la bonne mise en place du montage.

Mesurer la température de la zone éclairée d'une plaque noire en fonction du temps pendant 600 s. Pour cette mesure, on mettra en place un protocole expérimental à l'aide du matériel disponible pour que la température initiale de la plaque soit la température ambiante.

En déduire le temps caractéristique nécessaire pour atteindre le régime permanent, ainsi que l'augmentation de température en régime permanent lié au chauffage par la lumière.

### 5. Mesure de la variation de température d'une plaque blanche.

Faire la même mesure et la même analyse pour une plaque blanche.

### 6. Mesure de la variation de température en présence d'écoulement.

Placer le ventilateur à 15 cm du centre de la plaque.

Faire la même mesure et la même analyse que pour les questions précédentes, pour une plaque noire et pour un ventilateur allumé avec une tension de 12 V.

## I.3. Diode laser

Pour les expériences de cette partie, on utilisera la diode laser, dont la lumière émise est verte.

**7. Mesure de la largeur du faisceau laser.** Focaliser le faisceau laser à l'aide d'une lentille de longueur focale 10 cm (*respecter scrupuleusement les règles de sécurité relatives aux lasers*).

Mesurer la largeur à mi-hauteur du faisceau en fonction de la distance du capteur au point de focalisation. On utilisera une caméra linéaire Caliens comme capteur, et on veillera à ce que ce capteur ne sature pas. La caméra sera reliée à l'oscilloscope.

**8. Effet d'une lame contenant un colorant.** Mettre la sauce soja dans la lame. Placer la lame près du point focal du faisceau laser. On n'atténuera pas le faisceau laser avant le point focal. Placer la caméra de manière à ce que la largeur à mi-hauteur soit de l'ordre de 10 mm.

Déplacer la lame contenant le colorant au voisinage du point de focalisation. Observer l'effet sur le profil du faisceau laser. Mesurer les largeurs à mi-hauteur des profils extrêmes.

## II. Caractéristiques du matériel utilisé

**Lampe quartz-iode.** Il s'agit d'une lampe à incandescence, dont l'ampoule est remplie de xénon et de diode. Le spectre d'émission est large. Le maximum d'émission est atteint pour une longueur d'onde de 820 nm. La puissance de la lampe vaut 250 W.

**Thermomètre à sonde métallique.** Il s'agit d'un thermomètre à thermocouple. La précision absolue donnée par le fabricant est de  $\pm 0,8$  °C.

Ce thermomètre s'éteint automatiquement. Il peut être rallumé en appuyant sur "ON".

**Thermomètre infrarouge.** Le thermomètre infrarouge est relié à une carte Arduino, elle-même reliée via un câble USB à l'ordinateur. Le programme Python `Mesure_Temperature_IR.py` permet de mesurer la température au cours du temps. Utiliser Spyder pour lancer ce programme. Le seul paramètre à régler est le temps d'acquisition. Les mesures sont sauvegardées automatiquement, et le nom du fichier est lié à l'heure du début de la mesure.

L'angle de mesure du capteur vaut  $35^\circ$ , ce qui signifie que 50% de l'énergie qui parvient au capteur est compris dans le cône  $\pm 17,5^\circ$ .

Le capteur utilise les longueurs d'onde entre  $5,5 \mu\text{m}$  et  $14 \mu\text{m}$ .

**Anémomètre.** Les boutons sont un peu durs, ne pas hésiter à appuyer fortement.

**Caméra linéaire.** Cette caméra mesure l'intensité lumineuse sur une ligne. La caméra choisie possède une sensibilité élevée. Il est nécessaire d'utiliser des filtres pour atténuer le signal, qui sont placés avant le capteur. La transmittance de ces filtres est indépendante de l'intensité lumineuse.

Il est possible de retirer ces filtres si la caméra est éteinte. Il faut absolument éviter de toucher la ligne de capteurs.

Un bouton "sensibilité" permet de régler la sensibilité de la caméra.

Le lien entre la longueur  $l$  sur la caméra et le temps mesuré à l'oscilloscope  $\Delta t$  est  $l = K\Delta t$ , avec  $K = 5,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Une notice simplifiée est fournie.

**Polariseur rectiligne.** Ces polariseurs sont souvent mal fixés dans leur support. En conséquence, la direction d'extinction n'est pas connue, et ne correspond pas forcément avec l'axe de l'aiguille.

**Oscilloscope, anémomètre à fil chaud, caméra linéaire Caliens.**

Une notice est fournie pour ces appareils.

## III. Matériel

- Lampe quartz-iode + condensateur 8 cm
- 2 supports éleveurs Prolabo + 1 support éleveur
- 1 planche en bois aggloméré, dimension approximative  $27 \text{ cm} \times 28 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$
- Thermomètre à sonde métallique
- Chronomètre
- Bêchers de 50 mL en plastique transparent

- pipette plastique
- Bouteille d'eau
- Solution de sauce soja 10%
- Flacon de sauce soja pure
- Papier de nettoyage pour lentilles
- 2 potences
- 1 potence à crémaillère
- 6 pieds
- 5 noix, 1 pince rigide, 2 pinces flexibles
- 2 porte plaque
- Écran blanc
- 2 plaques en carton recouverts de papier Canson blanc, 2 plaques en carton recouverts de papier Canson noir.
- Diode laser verte
- Thermomètre infrarouge relié à une carte Arduino interfacée sous Python.
- 1 réglet 300 mm, 1 réglet métallique 50 cm, 1 réglet métallique 100 cm
- Oscilloscope Agilent DSO X 2002 A
- Lentille focale 10 cm
- Caméra linéaire Caliens
- 2 câbles BNC-BNC
- 1 polariseur rectiligne
- Une lame avec lamelle collée, pour y placer la sauce soja
- Adhésif papier, facile à enlever
- Ventilateur
- Anémomètre à fil chaud
- Alimentation continue réglable
- 2 fils bananes