

Rapport SECOND CONCOURS 2023 - Interrogation de physique

Composition du jury : M. Rémy Gilles, M. Villain Pierre.

L'épreuve de la session 2023 s'est déroulée au sein de l'ENS Paris-Saclay les 23 et 24 mai 2023.

Composée de deux parties distinctes, cette épreuve vise d'une part à évaluer, à travers la résolution d'un court problème de physique, la maîtrise des connaissances fondamentales acquises jusqu'au niveau L3 (de physique fondamentale) et, d'autre part, de passer en revue certaines compétences expérimentales. Bien qu'aucune manipulation à proprement parler ne soit demandée, le jury souhaite vérifier si le candidat est capable de proposer des protocoles de mesures simples sur l'ensemble des domaines abordés en classes préparatoires aux grandes écoles (électricité, électronique, électrotechnique, électromagnétisme, optique, onde, mécanique (fluides inclus), thermodynamique et/ou d'analyser des résultats expérimentaux.

Le déroulé de l'épreuve est le suivant : le candidat prend connaissance de son sujet (énoncé d'un problème de physique + description d'une expérience ou d'un instrument de mesure accompagné de quelques questions) et dispose d'une heure de préparation qu'il répartit comme bon lui semble entre les 2 parties : un ratio de 45 min sur le problème et 15 min sur la partie expérimentale est plutôt conseillé ... et la découverte de la partie expérimentale devant le jury fortement déconseillée ! Vient ensuite la présentation orale débutant nécessairement par l'exercice théorique pendant 1h, suivi de 30 minutes sur la partie expérimentale. Le candidat dispose d'un tableau sur lequel il peut exposer ses différents résultats et qu'il peut utiliser pour dialoguer avec le jury. La durée de préparation est vraisemblablement insuffisante pour venir à bout de toutes les questions. Cela ne doit pas déstabiliser les candidats qui trouveront durant l'entretien avec le jury largement le temps de revenir sur certaines questions.

A ce titre l'exposé oral se veut très interactif. Le jury pouvant par exemple demander des approfondissements à une explication du candidat, ou lui en fournir pour avancer sur une question ayant non résolue pendant la préparation. Ainsi ne pas avoir une réponse immédiate à une question posée ne doit être perçu par le candidat comme forcément négatif. Une discussion avec le jury est toujours possible et même fortement conseillée.

Compte tenu du format et de la durée de l'épreuve, faire preuve d'une aisance orale et d'une gestion intelligente du tableau confèrent des atouts indéniables. Au-delà du concours, savoir communiquer clairement est par ailleurs un incontournable dans tout travail de recherche ou d'enseignement auquel le candidat sera amené dans son futur parcours. Le jury invite fortement les futurs candidats à prendre pleinement conscience de l'importance de cet aspect et à le travailler si possible.

Depuis la session 2019, le concours est ouvert exclusivement aux étudiants de niveau L3. En conséquence les sujets sont calibrés pour ce niveau d'étude. La partie théorique en particulier fait appel au plus à des notions de physique enseignées en L3 (mécanique quantique, relativité, physique statistique classique...). Les notions relatives à ces sujets sont apparues plutôt bien assimilées par la plupart des candidats. Il est cependant nécessaire d'aller au-delà des connaissances de cours et de savoir les appliquer au cas particulier concerné par l'étude proposée. Ce point n'a pas toujours été sans difficulté chez certains candidats. On peut citer par exemple la définition générale d'une fonction de partition qui n'apporte rien si l'on ne s'interroge ni sur les micro-états accessibles, ni sur le spectre associé. Par ailleurs les sujets proposés reposent aussi pour une large part sur la physique enseignée en L1 ou L2. Les questions ayant trait aux notions enseignées à ce niveau sont généralement celles qui posent le plus de problème aux candidats de manière récurrente à chaque session.

En cours d'interrogation les candidats sont souvent amenés à calculer des ordres de grandeur numériques sans aide particulière du jury. Il est absolument nécessaire de maîtriser et connaître les ordres de grandeur fondamentaux tels que la taille d'un atome ou d'un noyau atomique tout comme les valeurs numériques des constantes physiques usuelles (G , h , c , e , masse de l'électron, pour n'en citer que quelques-unes). Sur un plan plus général, le jury fait remarquer que maîtriser l'analyse dimensionnelle est très utile voir indispensable, mais qu'elle seule ne peut suffire pour répondre aux exigences de l'épreuve proposée qui

repose sur une modélisation mathématique d'un problème réel : une mise en équations rigoureuse et une résolution commentée sont des attendues pour cette première partie de l'épreuve.

Dans la seconde partie, le jury attend également du candidat une bonne connaissance des instruments de base de la métrologie présents dans les laboratoires d'enseignement (Michelson, goniomètre, APN, GBF, oscilloscope, multimètre, ...) et de leur mise en œuvre. Il doit avoir la capacité de faire une analyse raisonnée d'un jeu de données, d'une courbe, d'une image ou de toute autre représentation d'une série de mesures, en produisant une estimation cohérente des incertitudes-type. Une discussion et une confrontation réfléchie au modèle (par exemple, par l'utilisation d'un écart normalisé ou l'explicitation d'une méthode de Monte-Carlo) sont attendues. La notion de modèle d'ailleurs ne se limite pas à une loi mathématique. Il faut en connaître ses limites ainsi que ses hypothèses fondatrices. Par exemple, le calcul du nombre de Reynolds est pertinent pour valider l'utilisation d'une loi de frottement visqueux ...

Le jury a notamment apprécié la maîtrise de certains candidats dans l'évaluation d'une mesure et de son incertitude. Il ne saurait trop conseiller aux futurs candidats de se référer aux travaux de l'IREM de Paris sur la mesure en physique (<https://irem.u-paris.fr/mesurer-en-physique-chimie>) et notamment aux documents d'accompagnement des programmes de lycée auxquels ils ont participé (<https://eduscol.education.fr/document/7067/download>).

Malgré la difficulté et le caractère assez exigeant de l'interrogation, le jury se félicite d'avoir assisté cette année encore à d'excellentes prestations de candidats s'étant indéniablement préparés à l'épreuve.

Exemple de sujet théorique (partiel): Introduction à l'effet Hall quantique entier.

Les vecteurs sont notés en gras.

Les opérateurs sont désignés par des lettres surmontés d'un chapeau $\wedge$.

On étudie dans ce problème l'effet Hall. On cherche en particulier à dégager certaines propriétés liées à l'effet Hall quantique entier.

La géométrie envisagée est celle décrite par le schéma ci-dessous :

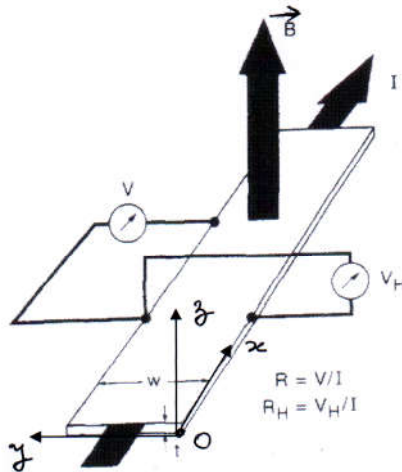


FIGURE 1. Montage expérimental.

Une bande d'un matériau conducteur disposée parallèlement au plan (xOy), de largeur w et d'épaisseur t , est soumise à une différence de potentiel V dans la direction (Ox) ce qui engendre un courant d'intensité I . On place l'échantillon dans un champ magnétique perpendiculaire $\mathbf{B} = B \mathbf{u}_z$. On observe alors une différence de potentiel V_H dans la direction perpendiculaire au courant et au champ magnétique. C'est l'effet Hall.

On appelle résistance Hall le rapport $R_H = V_H / I$.

1. En procédant à un raisonnement purement classique montrer que $R_H = \frac{B}{N_s e}$ où e est la charge élémentaire et N_s la densité surfacique d'électron dans le plan (xOy).

L'expression précédente amène une relation de proportionnalité entre R_H et B .

Pourtant en 1980, Von Klitzing et al., découvrirent expérimentalement que la résistance Hall présentait des propriétés de quantification pour des systèmes bidimensionnels et variait selon :

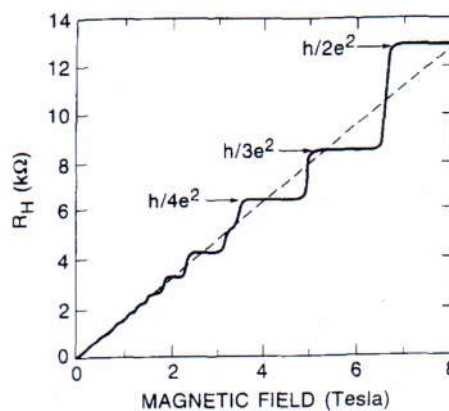


Figure 2. Résultats expérimentaux pour la résistance Hall

On parle d'effet Hall quantique entier car R_H ne prend que des valeurs par palier données par la relation :

$$R_H(j) = \frac{1}{j} \frac{h}{e^2} \text{ où } h \text{ est la constante de Planck et } j \text{ un entier naturel non-nul.}$$

2. Vérifier l'homogénéité de la relation précédente. Connaissez-vous une application de ce résultat ?

L'obtention d'un système d'électrons bidimensionnel se fait expérimentalement en envisageant des électrons de conduction à l'interface d'un semi-conducteur et d'un oxyde par exemple. Sans se préoccuper des conditions de validité de cette description, on admettra que les électrons concernés par l'étude sont astreints à se déplacer uniquement dans le plan (xOy) dans une zone de surface $S = L_x L_y$ avec $L_x = 1,0 \text{ cm}$ et $L_y = 1,0 \text{ mm}$. L'origine O est celle représentée sur la figure 1.

On opère maintenant un traitement quantique de la dynamique des électrons dans les conditions décrites précédemment. On néglige les interactions entre électrons de conduction et on se ramène alors à la dynamique d'un seul électron de masse m . Sauf mention contraire en fin d'énoncé on ne tient pas compte dans la suite du spin de l'électron.

On rappelle que le Hamiltonien d'une particule chargée sans spin, de masse m et de charge q en présence d'un champ magnétique s'écrit :

$$H = \frac{1}{2m}(\mathbf{p} - q\mathbf{A})^2$$

où $\mathbf{A}$ est le potentiel vecteur dont dérive le champ magnétique et $\mathbf{p}$ désigne l'impulsion de la particule.

3. Pour un champ magnétique uniforme $\mathbf{B} = B\mathbf{u}_z$, vérifier que le potentiel vecteur $\mathbf{A} = -yB\mathbf{u}_x$ convient.
4. En déduire l'expression de l'opérateur hamiltonien $\hat{H}$ d'un électron dans le champ magnétique proposé.
5. Calculer la valeur du commutateur $[\hat{p}_x, \hat{H}]$ où $\hat{p}_x$ désigne la composante suivante (Ox) de l'opérateur impulsion de l'électron.

On cherche les états propres de l'opérateur hamiltonien.

6. Justifier qu'il est intéressant de chercher les fonctions d'onde stationnaires sous la forme : $\psi(x, y) = f(x) \phi(y)$ où $f(x)$ est une fonction que l'on précisera.
7. Etablir alors que ϕ satisfait l'équation différentielle : $\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dy^2} + \frac{m\omega_c^2}{2} (y - y_0)^2 \right] \phi(y) = E\phi(y)$ où E désigne l'énergie de l'état propre correspondant et ω_c et y_0 sont des constantes à préciser.
8. Quelles sont les valeurs possibles de E ?
9. Préciser la fonction $\phi(y)$ pour l'état fondamental à une constante multiplicative près. On notera $l_0 = \sqrt{\frac{\hbar}{eB}}$ une grandeur dont on donnera la signification physique et la valeur numérique pour un champ magnétique de 5,0 T.
10.

Exemple de sujet expérimental : le câble coaxial

1. De quoi est constitué un câble coaxial ? Intérêt par rapport à un fil simple ?
2. Proposer un schéma électrique équivalent.
3. On dispose de 100 m de câble. Proposer un protocole expérimental permettant de mesurer la célérité c d'une onde électromagnétique se propageant dans le câble. On explicitera précisément les réglages des appareils utilisés.
4. En alimentant le câble avec un signal sinusoïdal, on s'aperçoit que pour certaines fréquences (voir tableau ci-dessous) l'amplitude passe par un maximum. Expliquer. En déduire une mesure de c .

f (MHz)	0,95	1,94	2,86	3,85	4,96	6,02
---------	------	------	------	------	------	------