

Banque PC Inter-ENS/X/ESPCI. - Session 2023

Rapport sur l'épreuve de Physique C

Jérôme Beugnon, Lionel Foret, Gabriel Hétet, Félix Werner

Épreuve de 6h, spécifique à l'ENS de Paris, option physique.

Coefficient : 41% du total d'admissibilité, 6% du total d'admission.

Descriptif du sujet

Le sujet porte sur la machine de Szilard. La partie 1 concerne la machine de Szilard originelle. Il s'agit d'une expérience de pensée très simple, mettant en jeu une particule, en contact avec un thermostat. On constate qu'une application naïve du second principe de la thermodynamique conduit à une contradiction. Dans la partie 2, on complète la description de la partie 1 en tenant compte de la présence d'un bit de mémoire, dont la réinitialisation nécessite de fournir un travail ; on vérifie alors que le second principe de la thermodynamique est bien respecté. Dans la suite du problème, on étudie trois variantes de machines de Szilard : une version à N particules (partie 3), une version quantique (partie 4), et enfin, une réalisation expérimentale récente avec un électron unique dans un double puits, que l'on décrit sans employer la mécanique quantique avec un modèle où l'électron passe d'un puits à l'autre à des instants aléatoires (partie 5).

Commentaires sur le niveau des copies

La moyenne est de 9,61 avec un écart-type de 3,58, ce qui assure une harmonisation avec l'épreuve de chimie B (qui concerne l'option chimie). 519 copies ont été rendues. Ce nombre est supérieur à ceux des sessions 2022 (487 copies) et 2021 (359 copies). Le jury a corrigé un grand nombre de copies d'un niveau faible. En outre, une fraction non négligeable des copies contient des erreurs surprenantes (exemples : confusion entre la variation ΔU et la valeur U dans le premier principe de la thermodynamique ; oubli de la présence d'un thermostat dans certaines questions). Même dans les bonnes copies, il n'est pas rare de rencontrer les problèmes suivants : les questions qualitatives demandant un commentaire physique sont souvent non traitées, ou traitées avec des réponses étranges ; la loi de Boltzmann est écrite de façon incorrecte (Q53) ; certains calculs contiennent des erreurs ou des défauts de méthode. L'épreuve a permis de classer correctement les candidats, en particulier les candidats admissibles, dont le niveau est satisfaisant.

Remarques générales

- Une application numérique non demandée par l'énoncé ne rapporte pas de points.
- Certains candidats gagneraient à lire plus attentivement l'énoncé, par exemple pour éviter d'oublier de répondre à certaines sous-questions.
- La justification aux réponses est un élément important dans la notation. Les réponses non justifiées aux questions simples ou dont le résultat est donné sont comptées comme fausses. Les justifications n'ont pas besoin d'être longues, et peuvent souvent se ramener à quelques mots pour citer la loi physique, l'équation ou le document utilisé. Pour les questions dont le résultat est une équation, écrire les calculs intermédiaires est souvent indispensable pour justifier ce

résultat. Une absence de justification est sanctionnée (de la même façon pour tous les candidats, y compris les meilleures copies).

- Les réponses incompréhensibles ou illisibles sont considérées comme fausses.
- Les erreurs d'inhomogénéité flagrantes sont sanctionnées.
- Dans les réponses aux questions qualitatives, il est important de citer explicitement les arguments pertinents (lois physiques utilisées ou phénomènes physiques en jeu par exemple).
- Les questions qualitatives, ainsi que les tracés de courbes et les applications numériques, sont valorisées dans le barème. Il est dommage de ne pas les traiter, ou de répondre sans prendre un minimum de temps de réflexion.

Remarques spécifiques

Parties 1, 2 et 3

- Les principes de la thermodynamique nécessitent de la rigueur dans leur application. Pour passer des principes et formules générales aux résultats particuliers valables pour le système considéré, il faut tenir compte d'hypothèses qu'il faut mentionner. Il fallait utiliser selon les questions : que la transformation est réversible ou non, que la transformation est cyclique, que la transformation se fait à température constante (présence d'un thermostat), que le gaz est considéré comme parfait (expression de la pression, de l'énergie interne).
- Il faut faire attention aux signes pour les quantités représentant des échanges d'énergie (travail et chaleur). Il est utile de justifier le signe si besoin lors du déroulement du calcul, et de vérifier que le signe du résultat obtenu est plausible.
- Un nombre important de candidats a formulé le premier principe comme $U = Q + W$ au lieu de $\Delta U = Q + W$. Il s'agit d'une erreur inacceptable indiquant une incompréhension profonde, et conduisant à des erreurs en cascade qui ont été sanctionnées.
- Aux questions calculatoires 22 et 26, très peu de candidats ont obtenu l'ensemble des points. Les erreurs de calcul sont souvent liées à un défaut de méthode. Par exemple, dans la question 22, beaucoup de candidats ont calculé la dérivée de $\ln\left(\frac{1}{x-1}\right)$ sans utiliser préalablement la relation $\ln\left(\frac{1}{x-1}\right) = -\ln(x-1)$, et dans la question 26, la majorité des candidats se sont limités à développer les logarithmes au premier ordre.
- L'énoncé de la question 26 contenait une coquille : dans la dernière phrase, le petit paramètre est $N_G - \overline{N_G}$ (et non pas $N - \overline{N_G}$), conformément au début de la question (« pour N_G assez proche de $\overline{N_G}$ »). Très peu de candidats semblent avoir été perturbés par cette coquille.
- Q13 : Dans ce cas, la transformation est irréversible, et le second principe conduit à $W_{\text{init}} > k_B T \ln 2$. De nombreuses copies ont obtenu des résultats incorrects en faisant des hypothèses infondées (transformation adiabatique réversible par exemple).
- Q14 : Beaucoup de candidats se sont contentés d'affirmer que le coût énergétique calculé est grand devant celui d'un ordinateur, sans comparaison quantitative ou en comparant parfois une énergie à une puissance.
- Q15 : 15% des candidats ont proposé un protocole valide, en utilisant une deuxième paroi. Les propositions basées sur une mesure répétée de la position de la particule M ne sont pas acceptables, car elles impliquent l'utilisation d'un bit de mémoire supplémentaire, ce qui ne fait que repousser le problème.

- Q17 : La réponse à la question étant donnée, il était particulièrement important de justifier chaque étape, y compris le signe du travail.
- Questions 18 à 20 : De nombreux candidats ont rencontré un problème de lecture de document : la présence d'une figure pour le cas $x = 1/2$ ne signifie pas que l'on doit prendre $x = 1/2$ pour toutes les questions apparaissant après cette figure. Assez souvent, cette erreur a été corrigée à la lecture de la suite de l'énoncé.
- Q21 : Certaines réponses contenaient un facteur $\frac{1}{N+1}$ en trop, ce qui constitue une erreur grossière.
- La question 29 est la seule du sujet pour laquelle aucun candidat n'a obtenu de points. On attendait une discussion de deux tendances qui se compensent.

Partie 4

- Peu de candidats ont compris entièrement la figure 3. Chacune des courbes en trait épais, y compris les courbes horizontales, montre l'évolution de la valeur de l'énergie d'un état stationnaire en fonction de V_0 . Ainsi, pour $V_0 = 0$, on retrouve le cas du potentiel harmonique sans barrière, donné par l'équation (9). Pour les indices n impairs, l'énergie est indépendante de V_0 . Dans la limite $V_0 \rightarrow \infty$, les énergies se regroupent par paires de même valeur ($E_0^{(b)} = E_1^{(b)}$, $E_2^{(b)} = E_3^{(b)}$, etc). Le jury a été très tolérant envers cette erreur et ses répercussions pour la suite du problème.
- Q33 : On attendait un équivalent de U dans la limite $T \rightarrow \infty$, à savoir $U \approx k_B T$, et pas simplement $U \rightarrow \infty$.
- Q34 : On attendait que Z soit remplacé par son expression en fonction X (le résultat était demandé « en fonction de X »).

Partie 5

- Q49 : Seule une petite minorité de candidats a répondu correctement à cette question. Il fallait tenir compte des passages de l'électron d'un puits à l'autre (si l'électron reste dans un puits, il ne reçoit ni travail, ni chaleur sur un cycle).
- Q53 : Beaucoup de copies donnent des expressions incorrectes pour la loi de Boltzmann, alors qu'il s'agit d'une application directe du cours (qui plus est, cette formule était rappelée dans l'énoncé en partie 4).
- Q58 : Il y a une coquille dans l'équation (17) de l'énoncé, où T ne devrait pas être au dénominateur mais en préfacteur multiplicatif. Cette erreur flagrante a été repérée par plusieurs candidats.
- Les questions 52, 57 et 58 ont très rarement été abordées avec succès.