

1/ REMARQUES GÉNÉRALES

Le sujet est constitué d'un problème sur le thème unique des générateurs thermoélectriques. Il comprend trois parties indépendantes traitant de plusieurs thématiques de première et de deuxième année (électrocinétique, thermodynamique, magnétostatique, mécanique du point en référentiels galiléen et non galiléen, phénomènes de transport).

La première partie porte sur la présentation et l'interprétation qualitative de l'effet Seebeck, puis sur l'analyse de l'expérience originale menée par Seebeck qui a mis en évidence cet effet. La seconde partie étudie le principe d'un générateur thermoélectrique sous un aspect énergétique. Enfin, la troisième partie détaille le principe de l'assistance gravitationnelle de sondes munies de générateurs thermoélectriques.

Plusieurs questions vérifient la bonne connaissance du cours et des démonstrations usuelles (Q1 ; Q10 ; Q17 ; Q27 à Q30). D'autres vérifient le sens physique et la faculté à développer et présenter des raisonnements construits (Q4 à Q6 ; Q15 ; Q26). Enfin, quelques questions vérifient l'habileté à mener de façon rigoureuse des calculs (Q18 à Q20 ; Q34).

La grande majorité des candidats ont abordé le sujet dans l'ordre et ont pu traiter des questions dans chacune des trois parties. Bien que guidée, la seconde partie conceptuellement plus délicate car faisant appel à des lois inconnues (généralisation des lois locales d'Ohm et de Fourier prenant en compte les effets thermoélectriques) a été la moins bien réussie. Le début de la troisième partie présentant de façon pourtant très classique les résultats généraux des mouvements à force centrale (lois de conservation, caractère plan et nature des trajectoires) a mis en évidence une maîtrise insuffisante des outils et notions sous-jacents. Dans la dernière partie, explicitant le principe de l'assistance gravitationnelle, de nombreux candidats n'ont pas su répondre aux dernières questions, à caractère quantitatif, à cause de lacunes dans les méthodes de calcul de la norme d'un vecteur.

Plusieurs points ont été soulevés par les correcteurs.

- Comme chaque année, quelques résultats intermédiaires étaient donnés dans le sujet (Q1 ; Q20 ; Q34) afin de permettre aux candidats de poursuivre en cas de blocage prématuré. Évidemment, les points du barème pour ces questions portaient sur la rigueur du raisonnement conduisant au résultat et à la qualité des justifications. Malheureusement, beaucoup trop de candidats pour arriver coûte que coûte aux résultats multiplient les justifications ambiguës, les contradictions au sein même du raisonnement, les longues phrases alambiquées, les calculs approximatifs voire complètement faux...
- La rigueur de l'écriture mathématique est trop souvent défectueuse, voire complètement absente dans certaines copies. Il est ainsi fréquent de constater des égalités entre vecteurs et scalaires, des relations inhomogènes, des intégrales écrites sans élément d'intégration, des confusions entre composantes algébriques et normes d'un vecteur, ou encore des confusions entre grandeurs finies et grandeurs élémentaires.
- Certains candidats montrent un manque flagrant de recul et de sens des réalités physiques face à des résultats numériques visiblement aberrants. Des intensités de l'ordre de 10^{12} A (Q9) ou bien des vitesses supérieures à 10^8 m·s⁻¹ (Q31) doivent impérativement appeler le candidat à s'interroger.
- Les candidats ont de plus en plus de difficultés à rédiger des réponses argumentées de façon concise et ordonnée. Cela est particulièrement criant pour des questions qualitatives (Q5 ; Q6) pour lesquelles

le correcteur en arrive à devoir relire plusieurs fois le propos pour tenter d'en comprendre le sens. S'agissant de questions appelant à un calcul, il arrive fréquemment que les éléments de la démonstration ne soient pas présentés de façon logique et organisée, rendant particulièrement délicate la correction. Il est enfin rare d'avoir un schéma permettant d'illustrer un raisonnement (Q10 ; Q12).

- Il est rappelé que les candidats doivent soigner autant que possible la présentation de leur copie en numérotant les questions et en entourant leurs résultats, en évitant ratures grossières et pans entiers de la copie barrés (utilisation préalable de brouillons), en écrivant de façon intelligible et soignée dans un français maîtrisé. Les candidats qui ne se donnent aucune peine à cet égard perdent le bonus alloué à la présentation et ne s'attirent aucune bienveillance de la part du correcteur. Il ne relève pas en particulier de ce dernier de devoir déchiffrer une copie illisible, si bien que le fait de ne pouvoir être lu conduit systématiquement à ne pas obtenir de points, réduisant à néant tout effort scientifique.

2/ REMARQUES SPÉCIFIQUES

Q1. La loi d'Ohm locale est connue, mais il est impératif de respecter la notation de l'énoncé (σ pour la conductivité électrique).

Le sens du champ électrique est souvent justifié par une assertion mal formulée du type « le champ descend les potentiels ». Il est attendu que soit précisée la relation entre champ et potentiel.

La démonstration de l'expression de la résistance électrique est rarement effectuée de façon rigoureuse. On lit souvent que $E = U / L$ sans la moindre justification, en particulier concernant la différence de potentiel U qui est rarement définie ou définie avec une erreur de signe.

Q2. L'expression de la résistance thermique est peu justifiée à partir des analogies formelles comme le demande l'énoncé. On attend compte tenu des lois locales que toutes les analogies soient évoquées : vecteurs densité de courant électrique/thermique, potentiel électrique/température ; conductivités électrique/thermique.

Q3. Beaucoup d'erreurs de signe et bien trop d'égalités entre vecteurs et scalaires.

Q4. Le lien entre énergie cinétique moyenne et température est connu, mais on constate des erreurs d'interprétation concernant la conséquence sur les densités électroniques, en particulier la transposition à une variation continue de température. Des réponses courtes sont souvent plus efficaces que de longues phrases.

Q5. Beaucoup d'erreurs sur le signe du coefficient Seebeck et peu d'explications convaincantes. L'excès d'électrons libres du côté froid (qui se charge négativement) et le défaut du côté chaud (qui se charge positivement) cause l'apparition d'un champ électrique orienté des charges positives vers les charges négatives, l'analogie avec un condensateur plan pouvant utilement être évoquée.

Certaines erreurs de signe sont liées à une méconnaissance du sens du gradient de température.

Q6. Trop de candidats concluent que les données expérimentales sont compatibles avec le modèle présenté. Pour cela, ils en arrivent à faire appel à des considérations hors propos liées à la conductivité électrique des métaux.

Q7. On trouve parfois des expressions contradictoires avec la Q3.

Q8. Le sens de circulation du courant d'intensité positive est très rarement justifié. On constate des erreurs dans le sens, alors même qu'il est indiqué sur la figure 4. Une analyse du signe des f.é.m. de la Q7 suffit pour conclure.

Q9. On constate des erreurs sur la très simple écriture de la loi des mailles, parfois liées à une méconnaissance des conventions générateur et récepteur.

Des candidats ne prennent pas en compte la f.é.m. de la portion en cuivre alors que l'énoncé spécifie que seule sa résistance est négligeable devant celle de la portion en bismuth.

Q10. Il s'agit d'un exemple très classique de magnétostatique, pourtant très mal traité.

L'analyse des invariances de la distribution de courant ne permet de conclure que sur les dépendances spatiales des composantes du champ.

L'analyse des invariances et des symétries porte uniquement sur la distribution de courant. On ne peut pas évoquer les invariances et les symétries du champ qui est inconnu : ceci relève d'une confusion entre la cause et la conséquence.

Le théorème d'Ampère repose sur le calcul de la circulation du champ le long d'un contour qui doit être fermé et orienté. Le contour et son orientation doivent être clairement spécifiés avec un schéma à l'appui.

Q11. Le champ résultant est trop souvent trouvé nul, alors même qu'il dévie une aiguille aimantée dans la question suivante.

Le théorème de superposition doit être évoqué. Rares sont les candidats qui ont exprimé le champ dû à chaque fil avec le vecteur unitaire \vec{u}_x .

Q12. Question rarement traitée. Il faut préciser que l'aiguille aimantée s'aligne dans le sens du champ total dû aux deux fils et à la Terre. Un schéma permet d'éviter des erreurs quant à l'expression de l'angle β .

Q13. On constate de très nombreuses erreurs de signe, témoignant d'une méconnaissance du fonctionnement d'une machine ditherme motrice et de la non prise en compte du caractère algébrique des puissances échangées avec le module. Ces erreurs ont une conséquence importante sur la définition du rendement.

Q14. De très nombreux candidats font la démonstration « classique » du rendement de Carnot apprise dans le cours de première année, alors que l'énoncé impose de travailler avec des puissances et de considérer des variations élémentaires des fonctions d'état en régime stationnaire.

Il n'est pas correct d'un point de vue dimensionnel d'écrire que $dU = dS = 0$. On voit également des confusions entre la fonction d'état et sa différentielle totale conduisant à des écritures sans aucun sens du type $dU(t + dt) - dU(t) = 0$.

L'énoncé demande de mettre en évidence une limite supérieure au rendement : il faut donc raisonner avec l'inégalité de Clausius qui doit cependant être justifiée. À ce titre, l'égalité et donc le rendement de Carnot sont obtenus pour un fonctionnement réversible du module et non adiabatique comme on le lit parfois.

Q15. Certains candidats évoquent une circulation des porteurs de charges vers la « gauche » ou vers la « droite » et n'ont pas compris que la circulation des deux types est vers la source froide.

Très peu de réponses convaincantes quant à l'impossibilité d'avoir des semi-conducteurs de même dopage.

Q16. Le vecteur densité volumique de courant électrique est un vecteur, il donc doit être écrit avec un vecteur unitaire.

Q17. Il s'agit d'un bilan thermique en régime stationnaire très basique et pourtant très mal rédigé. Le système d'étude doit être défini. Le premier principe en régime stationnaire doit être évoqué pour justifier que $dU = 0$ (ou $dH = 0$). On attend que les termes d'échange et de création soient clairement identifiés dans le bilan. Des candidats donnent un résultat faux en fonction de la température (soit parce qu'ils oublient le caractère stationnaire du régime, soit parce qu'ils appliquent la loi de Fourier) alors que l'énoncé attend une équation différentielle vérifiée par la densité de courant électrique.

Q18. Question plutôt bien réussie pour les candidats qui ont un résultat juste à la Q17.

Q19. Question calculatoire bien traitée.

Q20. Question rarement traitée.

Q21. Les expressions des puissance thermiques fournies par la source chaude à chacune des jambes a permis à la plupart des candidats de traiter correctement la question. Les expressions des résistances thermique et électrique équivalentes doivent toutefois être clairement explicitées.

Q22. Beaucoup d'erreurs de signe : de nombreux candidats écrivent que $P_{el} = P_C + P_F$.

Q23. Les erreurs de signe à la question précédente conduisent certains candidats à écrire que l'intensité est proportionnelle à $1/(R_c - R_{el})$. L'intensité infinie pour une résistance de charge $R_c = R_{el}$ ne semble toutefois pas les gêner.

Q24. Question peu traitée. La justification d'un extremum de la puissance reçue par la charge passe par un calcul de sa dérivée par rapport à sa résistance.

Q25. Question très peu traitée, mais souvent réussie pour les quelques candidats qui ont pris la peine de faire la lourde application numérique.

Q26. Beaucoup de candidats semblent avoir compris l'intérêt de maximiser le facteur de mérite, mais l'expliquent de façon souvent obscure. Écrire simplement que le rendement croît avec le facteur de mérite pour une température donnée de la source chaude suffit.

L'ordre de grandeur du rendement des machines thermiques usuelles est rarement connu.

Q27. Question classique de cours, mais rarement traitée de façon rigoureuse.

On attend que l'expression vectorielle déduite du théorème du moment cinétique soit correctement écrite, ainsi que celle du moment de la force d'attraction gravitationnelle. Il faut préciser que la force est centrale ou expliciter son expression pour justifier la nullité de son moment par rapport au centre de l'astre attracteur. On constate des confusions entre moment cinétique et moment d'une force.

Le caractère plan du mouvement de la sonde est rarement justifié correctement.

La vitesse comprend une composante radiale qu'il convient de faire apparaître dans le calcul du moment cinétique qui permet d'aboutir à l'expression de la constante des aires.

Q28. La relation entre force et énergie potentielle dont elle dérive n'est pas toujours connue. L'écriture élémentaire de cette relation n'est pas toujours convenable.

Q29. Le théorème de l'énergie mécanique doit être évoqué pour justifier le caractère conservatif de l'énergie mécanique. Si l'expression de l'énergie potentielle effective est souvent correcte, la discussion qui s'ensuit sur la nature des trajectoires est souvent approximative. Pour une valeur donnée de l'énergie mécanique, il convient de préciser que les valeurs de r autorisées et conditionnant la nature de la trajectoire sont telles que $E_m \geq E_{p,eff}(r)$.

Q30. La condition sur la nullité de l'énergie mécanique n'est pas toujours clairement mentionnée.

Q31. Bien que très simple, cette question n'est pas toujours traitée rigoureusement. La loi de la quantité de mouvement doit être évoquée. Certains candidats écrivent mal l'expression de l'accélération dans la base polaire (ou la base de Frenet).

Q32. Question bien traitée.

Q33. La pseudo-force d'inertie d'entraînement est souvent mal formulée. Elle est, en particulier, orientée vers l'axe de rotation donc centripète. Il est nécessaire de prendre en compte la pseudo-force d'inertie de Coriolis et il convient ensuite de justifier sa nullité par l'équilibre de la sonde dans le référentiel d'étude.

Il convient de clairement nommer les différentes forces s'exerçant sur la sonde, en particulier celles d'attraction gravitationnelles dues au Soleil et à Jupiter, en utilisant *a minima* une écriture qui permette de les distinguer, par exemple $\vec{F}_{J/P}$ et $\vec{F}_{S/P}$.

Q34. Il est particulièrement agaçant que certains candidats avec des expressions fausses des forces à la question précédente prétendent arriver à un résultat correct au prix de nombreux « arrangements ».

Le développement limité à l'ordre 0 d'un côté de l'égalité et à l'ordre 1 de l'autre côté a dérouté beaucoup de candidats qui n'ont pu aboutir à l'expression attendue du rayon de la sphère de Hill. On voit également quelques développements limités erronés.

Q35. Il faut justifier que l'énergie potentielle est la même à l'entrée et à la sortie de la sphère de Hill.

Q36. Il est très rare de voir une justification rigoureuse. La sonde venant de l'infini, elle est toujours dans un état de diffusion vis-à-vis de Jupiter donc a une vitesse toujours supérieure à sa vitesse de libération à la distance considérée.

Q37. Question bien traitée.

Q38. Les constructions vectorielles doivent être particulièrement soignées pour conclure. En particulier, les longueurs des vecteurs vitesse doivent être cohérents entre l'entrée et la sortie de la sphère de Hill (même longueur pour $\vec{v}_{e,h}$ et $\vec{v}_{s,h}$). Les candidats pouvaient utilement s'aider du quadrillage.

Q39. Question très peu abordée et nombreuses erreurs l'est sur l'écriture de $v_{s,h}$ quand elle l'est (le produit scalaire pouvait être utilisé pour exprimer la norme du vecteur).

Q40. Question très peu abordée (conséquence des rares réponses à la question précédente).

Q41. Question rarement abordée.

3/ CONCLUSION

Les correcteurs ont eu plaisir à corriger des copies absolument remarquables, mais ont malheureusement constaté une hausse des copies indigentes. Le niveau général des candidats semble toutefois s'être maintenu et le sujet a permis de répondre à l'objectif de sélection en balayant de nombreux thèmes du programme et en alternant les types de questions. Une parfaite connaissance du cours et des méthodes associées des deux années reste un gage de réussite pour cette épreuve.