

1/ REMARQUES GÉNÉRALES

Le sujet de cette année portait sur la physique des plasmas appliquée aux recherches sur la fusion thermonucléaire. Sa longueur est apparue tout à fait adaptée puisque de nombreux candidats l'ont abordé en entier, en traitant la majorité des questions. Les meilleures copies abordent toutes les questions, souvent avec succès.

Le bilan général de cette session est positif. Après plusieurs années de diminution de la moyenne de l'épreuve, nous constatons une nette augmentation de cette dernière. Si les correcteurs soulignent le plaisir qu'ils ont eu à corriger quelques très bonnes voire excellentes copies, c'est surtout la nette diminution du nombre de copies indigentes qui est encourageante. Un candidat ayant obtenu la moyenne à cette épreuve a su démontrer une bonne connaissance des fondamentaux du programme de physique. Les raisons de cette embellie sont probablement multiples : une meilleure maîtrise des situations de cours (qui étaient bien valorisées par le barème), de nombreux résultats intermédiaires fournis dans l'énoncé, dont les candidats ont su se servir pour rebondir au sein de chaque sous-partie, des thématiques abordées peut-être plus familières aux candidats... On peut également penser que les perturbations liées au COVID se sont aplanies, puisque l'intégralité des étudiants (3/2 comme 5/2) qui se sont présentés au concours ont suivi un cursus normal en CPGE. Nous félicitons les candidats et leurs professeurs pour la qualité du niveau atteint et espérons qu'il se maintiendra lors des prochaines sessions.

La première partie du sujet abordait des notions de magnétostatique et de mécanique des particules chargées : c'est celle qui a été la moins bien réussie, notamment en raison d'une méconnaissance générale de la base de Frenet. La seconde partie portait sur la diffusion de particules dans un plasma et a donné lieu à beaucoup de bonnes réponses. La fin de cette seconde partie demandait des qualités d'analyse physique qui ont distingué les meilleurs candidats. La troisième partie, traitant des moyens d'échauffer un plasma de fusion, a mis en évidence des insuffisances sur les phénomènes d'induction mutuelle, mais des bases solides sur la propagation des ondes électromagnétiques dans les plasmas. Enfin, la question ouverte (Q30) a été mieux résolue que lors des précédentes sessions, malgré beaucoup de rédactions qui ont fait l'impasse sur la démarche et les hypothèses conduisant au résultat : c'est ainsi que des candidats ayant trouvé un résultat juste n'ont pas obtenu l'intégralité des points prévus par le barème.

Dans l'ensemble, la présentation des copies est jugée satisfaisante par la majorité des correcteurs. De ce fait, les candidats qui ne se donnent aucune peine à cet égard se démarquent d'autant plus défavorablement qu'ils sont rares : ils perdent le bonus alloué à la présentation et ne s'attirent aucune bienveillance de la part du correcteur. L'usage d'un brouillon est vivement recommandé pour que ce ne soit pas la copie qui en fasse office : les ratures au milieu d'un calcul, les figures et les graphes où les tentatives successives se superposent, les réponses non numérotées et/ou dans le désordre et/ou interrompues sans préavis pour reprendre plus loin, sont à proscrire. Dans le pire des cas, on est confronté à des copies dont l'écriture est tellement illisible que la correction en devient impossible. Les candidats ont-ils bien conscience qu'un tel défaut anéantit tous les efforts qu'ils pourront faire sur le plan scientifique, car le fait de ne pas pouvoir être lu conduit systématiquement à ne pas obtenir de points ?

Sur le fond, quelques défauts perdurent d'année en année, sur lesquels le jury espère toujours voir des améliorations :

- Les candidats ont beaucoup de difficultés à analyser une situation qui convoque les outils du programme mais qu'ils n'ont pas rencontrée telle quelle au cours de leur formation. C'était par exemple le cas dans les questions 10 et 15 où le léger décalage avec le traitement classique du cours désarçonne plus de la moitié des candidats. Même si l'acquisition d'automatismes est indispensable dans l'apprentissage d'une discipline scientifique, on en attend davantage de la part de futurs ingénieurs. La capacité à réfléchir, à s'approprier un problème nouveau, voire surprenant, sont des qualités qui doivent être cultivées au cours de la formation.
- Les défauts relatifs à la maîtrise de la langue française handicapent une bonne part des candidats. L'orthographe et la syntaxe sont parfois si déficientes que la réponse n'a plus aucun sens. Savoir écrire dans sa propre langue est incontournable pour énoncer une pensée claire, y compris dans le domaine scientifique.
- Les raisonnements manquent trop souvent de précision. Mentionner les hypothèses nécessaires, citer au fur et à mesure de la démonstration tous les arguments utiles sans les mêler à d'autres considérations (qui prouvent que le candidat n'a pas réellement compris l'utilité des arguments qu'il cite), détailler les étapes d'un calcul, *a fortiori* lorsque le résultat final est fourni... sont autant de points sur lesquels les candidats doivent être plus vigilants.
- Beaucoup de candidats abordent le sujet comme une suite de questions indépendantes, sans s'approprier la logique qui prévaut dans chaque sous-partie. Cela peut conduire à des contradictions flagrantes d'une question à l'autre et à des propos hors-sujet. En outre, les questions conclusives des sous-parties demandent d'interpréter les résultats précédemment démontrés ; une lecture attentive des paragraphes introductifs et un minimum de prise de recul sur la progression de l'énoncé permettent en général d'y répondre, ce que bien peu de candidats parviennent à faire.
- Les applications numériques sont encore trop souvent non accompagnées de leur unité, ou d'une unité fantaisiste (en particulier pour l'inductance mutuelle et la pulsation plasma).

Enfin, le jury note une diminution des escroqueries de calcul visant à aboutir coûte que coûte à un résultat fourni par l'énoncé. Celles-ci n'ont certes pas disparu (en particulier dans les questions 41 et 43) mais il semble que de plus en plus de candidats ont pris conscience de l'inefficacité de cette stratégie, les correcteurs lisant attentivement les étapes intermédiaires de calcul. Corrélativement, il est plus fréquent que des candidats signalent honnêtement leur erreur par rapport au résultat de l'énoncé, ce qui est très apprécié du correcteur qui l'a déjà détectée et qui attend de voir comment le candidat va réagir au moment de conclure. Cet état d'esprit est vivement encouragé par le jury.

2/ REMARQUES SPÉCIFIQUES

Q1. Cette question de cours n'a que rarement été traitée avec le niveau de précision requis. Le jury souhaitait une analyse des symétries et des invariances dans laquelle les candidats distinguent les causes (distribution de courants) des conséquences (champ magnétique). Il fallait, au cours de cette analyse, invoquer le fait qu'on pouvait supposer le solénoïde infini puisque les effets de bord étaient négligés. En vue de l'application du théorème d'Ampère, le contour d'Ampère *orienté* devait figurer sur un schéma et on attendait une justification, même brève, de la nullité de la circulation sur trois des quatre segments. Enfin, le calcul des courants enlacés devait distinguer sans ambiguïté la longueur du contour de celle du solénoïde. On note que certains candidats appliquent le théorème d'Ampère sur des contours qui ne sont pas à cheval sur les spires en vue de prouver l'uniformité du champ à l'intérieur et à l'extérieur du solénoïde : cette démarche, inutile dans cette question, leur a fait perdre beaucoup de temps.

Q2. Question souvent bien traitée.

Q3. Beaucoup de difficultés sur cette question, en premier lieu parce que la base de Frenet est très mal connue de la plupart des candidats (souvent confondue avec la base polaire), et en second lieu parce que la trajectoire est souvent incohérente avec l'orientation de la force magnétique, ce qui révèle un manque de compréhension physique de l'effet d'une force sur la trajectoire.

Q4. Les lacunes relatives à la base de Frenet empêchent les candidats de produire une démonstration convaincante du caractère circulaire de la trajectoire. Rappelons que la base de Frenet a été introduite dans le programme de PCSI précisément pour conduire cette démonstration sans avoir à passer par les coordonnées cartésiennes. Pour les candidats qui parviennent à une expression du rayon de courbure, il faut mentionner que ce dernier est constant pour conclure que la trajectoire est circulaire.

Q5. De nombreux candidats n'ont pas pris le temps d'une analyse attentive de la situation ; ils confondent vitesse initiale et vitesse à tout instant pour conclure que la force magnétique est nulle par colinéarité de \vec{v} et \vec{B} . En outre, certains candidats concluent que le cation est confiné car « le solénoïde est infini » !

Q6. Question bien traitée uniquement par les candidats ayant conclu correctement à la question précédente.

Q7. L'application numérique est très souvent correcte. Mais comparer ce rayon au rayon des bobines ne suffit pas : il faut en déduire que le cation peut rester confiné dans le tokamak.

Q8. Si beaucoup de candidats savent interpréter le resserrement des lignes de champ magnétique comme une augmentation de l'intensité de ce champ, plus rares sont ceux qui le justifient par la conservation du flux. Lors du tracé, les axes doivent être désignés et les zones de champ uniforme doivent être clairement représentées. Notons sur cette question un manque de compréhension de l'énoncé chez certains candidats : tracé de la moitié de la courbe (car on parle de $|z|$) ou tracé de quelques vecteurs champ magnétique sur l'axe (Oz) en lieu et place de la courbe demandée (car on a demandé la norme du champ sur l'axe (Oz)).

Q9. Réponse correcte dans la plupart des copies. Certains omettent de faire le schéma ou d'orienter convenablement l'intensité de façon cohérente avec le sens du vecteur surface.

Q10. Question abordée par moins de la moitié des candidats et parmi ces derniers plus de la moitié n'y obtiennent aucun point. Il s'agissait pourtant d'adapter la démonstration de cours visant à établir le rapport gyromagnétique de l'électron. Nous félicitons les quelques rares candidats qui ont su justifier proprement le signe moins apparaissant dans l'expression.

Q11. Cette question nécessitait une interprétation physique qui a dérouté beaucoup de candidats. En considérant le cation comme un dipôle magnétique, on donnait une signification différente aux mêmes termes énergétiques : l'énergie cinétique du cation s'identifiait à l'énergie mécanique du dipôle magnétique. Les réponses lues ont révélé que bien peu avaient vraiment saisi cette subtilité.

Q12. Question très peu traitée de manière satisfaisante car elle demandait une bonne appropriation des questions précédentes. On regrette que certains candidats se lancent dans des réponses totalement hors-sujet, en traçant par exemple une courbe de type énergie potentielle effective dans un champ gravitationnel. Ils espèrent sans doute glaner quelques points « par accident » sans se douter du mauvais effet que cela produit sur le correcteur, qui n'est pas incité à l'indulgence dans la suite de l'évaluation.

Q13. Question très rarement traitée correctement.

Q14. Question bien réussie. La méthode relative à l'établissement de ce bilan local est connue de la majorité des candidats. La différence se fait sur la rigueur de la rédaction (préciser le système, distinguer le terme de variation des termes d'échanges...).

Q15. Cette question, nettement moins réussie que la précédente, a permis de distinguer les candidats qui s'étaient véritablement appropriés la méthode du bilan local de ceux qui l'appliquaient de façon mécanique.

Q16. La démarche a été souvent comprise, mais il était impératif de faire apparaître une constante d'intégration et de justifier sa nullité pour obtenir tous les points.

Q17. La loi de Fick a été reconnue dans la grande majorité des copies. En revanche, l'interprétation du second terme a été trop vague : parler d'un terme « lié au champ électrique » ne suffisait pas, il fallait au minimum mentionner qu'il s'agissait d'une conséquence de la force électrique. Dans la mesure où cela restituait le sens physique, les candidats ayant invoqué la loi d'Ohm locale ont été valorisés même si cette réponse était en toute rigueur incorrecte, car on avait ici des densités volumiques de particules et non de charges.

Q18. Les calculs, pourtant sans grande difficulté, ont été peu abordés. Il fallait simplifier au maximum l'expression de D_a pour obtenir tous les points.

Q19. Le résultat étant donné, il était indispensable d'explicitier les calculs.

- Q20.** Beaucoup de candidats ont bien fait apparaître une égalité entre deux termes s'exprimant à partir de variables indépendantes. Il faut toutefois bien préciser pourquoi ces deux termes sont nécessairement constants.
- Q21.** Ces équations différentielles très classiques sont correctement résolues par une grande majorité des candidats. En revanche, il fallait rassembler les trois constantes apparaissant dans les deux solutions pour n'en faire apparaître que deux dans la solution produit.
- Q22.** Un taux de réussite très élevé à cette question (plus de 75% de réponses justes).
- Q23.** Les justifications sont trop vagues : mentionner que τ_p évolue en $1/p^2$ est nécessaire pour justifier l'extinction des modes $n > 1$. L'expression de $n_1(x, t)$ devait être exprimée en fonction de D_a et L , puis simplifiée : des candidats perdent ainsi des points faute de prendre la peine de terminer leurs calculs.
- Q24.** L'analyse dimensionnelle est souvent correcte, du moins pour les candidats qui connaissent l'unité d'un coefficient de diffusion. Il n'en est pas de même pour l'interprétation physique, certains candidats confondant la durée entre deux chocs avec la fréquence des chocs, ce qui conduit à des discussions aberrantes.
- Q25.** Question très bien traitée. Rappelons cependant qu'écrire $\omega_c \tau^* \gg 0$ n'a aucun sens.
- Q26.** La notion de proportionnalité ne semble pas toujours bien comprise par les candidats. Certains, omettant de remplacer le coefficient de diffusion par son expression en fonction de τ^* , concluent que leur expression en $1/\tau^{*2}$ est proportionnelle à $1/\tau^*$!
- Q27.** La réponse la plus rigoureuse, à savoir la comparaison de τ^* avec la période cyclotron, n'a presque jamais été formulée. En revanche, de nombreux candidats constatent sur la figure (a) l'anisotropie de diffusion entre les directions parallèle et perpendiculaire, ce qui a été compté juste. Dire que τ^* est plus grand dans la figure (a) que dans la figure (b) est inexact car on ne connaît pas la vitesse de la particule dans chaque cas.
- Q28.** Cette question demandant des qualités de sens physique a permis à certains candidats de se distinguer. La plupart en revanche s'engagent dans des explications confuses.
- Q29.** Cette question permettait de faire la synthèse des résultats de cette sous-partie, en les confrontant avec les conclusions de la partie I. Beaucoup de tentatives d'explications ont été formulées, mais souvent sans mettre l'accent sur le point-clé, à savoir la limitation de la diffusion perpendiculaire vers les parois du tokamak.
- Q30.** Question ouverte souvent bien résolue... lorsqu'elle a été abordée ! À se demander s'il est pertinent d'indiquer qu'une question demande de l'initiative, tant cela semble faire fuir par principe les candidats...
- Q31.** L'effet tunnel a été peu cité.
- Q32.** Question peu traitée car les phénomènes de mutuelle induction sont mal connus des candidats. Mais ceux qui abordent la question le font souvent avec succès. Cependant, il ne faut pas négliger la rédaction : le flux calculé ici est le flux *extérieur* sur la spire de rayon a_2 produit par le solénoïde, et il convient de préciser qu'il est nul uniquement sur le disque de rayon a_1 car le champ magnétique est nul à l'extérieur du solénoïde. En outre, de nombreux candidats ignorent qu'une inductance mutuelle s'exprime en Henry.
- Q33.** Peu de démonstrations satisfaisantes. Le terme de mutuelle induction est le plus souvent oublié dans u_2 .
- Q34.** Question souvent bien traitée. Parfois, quelques erreurs sur le développement limité et des absences de justification de la continuité du courant.
- Q35.** Question peu traitée, du fait de fréquentes confusions entre puissance et énergie. Le fait d'exprimer l'énergie sous la forme d'une intégrale semble très difficile pour nombre de candidats.
- Q36.** Des explications peu convaincantes, les candidats se contentant d'affirmer que le modèle n'a pas pris en compte la température.
- Q37.** Question réussie dans presque toutes les copies. Le correcteur a sanctionné toute confusion scalaire/vecteur, en particulier sur l'écriture de l'opérateur rotationnel.
- Q38.** Affirmer que $\text{div}(\vec{E}) = 0$ car l'onde est transversale n'est pas suffisant. On attendait une écriture explicite de l'opérateur divergence en coordonnées cartésiennes pour montrer sa nullité. Certains

candidats ont voulu passer par la notation complexe, ce qui n'était pas pertinent ici puisque l'hypothèse d'onde harmonique n'avait pas encore été formulée.

Q39. Ce calcul classique manipulant les opérateurs vectoriels a été bien réalisé dans un grand nombre de copies. Il fallait cependant bien détailler les étapes intermédiaires, le résultat étant donné dans l'énoncé.

Q40. La comparaison des masses a été mentionnée dans les copies, parfois assortie de longs calculs. Invoquer la plus faible mobilité des cations par rapport aux électrons suffisait à obtenir les points.

Q41. Question plutôt bien traitée, mais certains candidats trafiquent leur calcul pour obtenir les signes de l'expression donnée dans l'énoncé. D'autres oublient qu'on se situe en $z = 0$.

Q42. Question assez correctement traitée mais peu de candidats savent expliquer pourquoi il s'agit d'un phénomène de résonance : indiquer que la vitesse passait par un maximum était correct, mais remarquer de plus que la pulsation de résonance était la pulsation cyclotron (celle qu'adopte l'électron en l'absence d'excitation extérieure) montrait une compréhension physique plus aboutie de ce qu'est une résonance.

Q43. Le passage à la notation complexe est souvent bien mené et la question est globalement réussie. Comme à la Q41, quelques tentatives de fraude pour obtenir le résultat de l'énoncé.

Q44. Des unités fantaisistes pour la pulsation plasma.

Q45. Certains candidats se lancent dans des calculs inutiles, alors qu'il s'agissait ici d'exploiter le graphe. Peu de candidats pensent à rappeler qu'il y a propagation si \underline{k} est réel donc si $\underline{k}^2 > 0$.

Q46. Ici encore, il suffisait de lire le graphe. Des candidats affirment que la vitesse de phase est égale à c .

3/ CONCLUSION

Le sujet de cette année a parfaitement rempli son rôle de sélection en permettant de déceler le degré de connaissances de chaque candidat. Bien que nous ayons mis l'accent dans ce rapport sur les erreurs fréquemment commises, c'est avant tout le meilleur niveau général des copies que nous souhaitons retenir de cette session. Une connaissance du cours solide, gage de réussite pour cette épreuve, a été constatée chez la majorité des candidats qui se sont donc préparés avec sérieux. Souhaitons que ce constat puisse être renouvelé au cours des prochaines sessions.

Enfin, le jury de l'épreuve souhaite avertir les candidats et leurs préparateurs que **la session 2025 sera la dernière pour laquelle l'usage de la calculatrice sera autorisé. À partir de la session 2026, la calculatrice sera interdite et les applications numériques devront être réalisées à la main** : un résultat sous forme de puissance de 10, ou avec un seul chiffre significatif, sera alors attendu. Par cette annonce anticipée, nous espérons que les candidats auront le temps de se préparer convenablement à cette nouvelle modalité de l'épreuve.