

# Physique 1

## Présentation du sujet

L'épreuve, découpée en cinq parties, porte sur l'étude du rayonnement dit « synchrotron ».

La première partie, s'appuyant largement sur le cours, a pour but l'établissement de la formule de Larmor, donnant la puissance rayonnée par une particule chargée accélérée.

La deuxième partie étudie une méthode d'accélération linéaire électrostatique des particules, avant leur injection dans l'anneau de stockage.

La troisième partie s'intéresse au mouvement des particules dans l'anneau de stockage. Leurs vitesses étant proches de celle de la lumière, des corrections relativistes sont apportées. En fin de partie, la perte d'énergie par rayonnement des particules est évaluée.

La quatrième partie aborde le contenu spectral du rayonnement émis par les particules.

Enfin, la cinquième et dernière partie envisage les améliorations que peuvent apporter des structures particulières de champ magnétique créées par des dispositifs appelés onduleur et wiggler.

## Analyse globale des résultats et comportement des candidats

Le sujet est de longueur parfaitement adaptée : de nombreux candidats ont eu le temps de traiter la quasi-totalité des questions ou, au moins, d'aborder de manière significative les différentes parties. L'épreuve ne présente pas de réelles difficultés : une bonne connaissance du cours, une bonne maîtrise des méthodes habituelles, étaient suffisantes pour la réussir de manière satisfaisante.

Les trois premières parties ont en général été traitées successivement, linéairement à l'intérieur de chaque partie et de manière assez satisfaisante par un nombre conséquent de candidats. La tendance s'inverse pour les deux dernières parties, plus originales, plus ouvertes par certaines questions, ou demandant plus d'attention dans les calculs littéraux ou numériques demandés.

Cette année encore la présentation des copies est globalement satisfaisante, ce qui met en évidence de manière d'autant plus marquante les candidats qui la négligent. Comme l'année dernière, compte tenu de la relative facilité du sujet, le jury a été particulièrement attentif aux justifications données et à la qualité de la rédaction.

## Commentaires sur les réponses

### Partie I : Rayonnement d'une particule chargée accélérée

**I.A.1** Le jury attendait, entre autre, dans le commentaire, des références au fait que les variations de l'accélération de la particule ne peuvent être ressenties instantanément en un point éloigné, d'où un terme de retard (50 % de bonnes réponses). Notons que c'est le champ qui se propage, pas la particule, ni son accélération.

**I.A.2** La relation de structure permettant d'exprimer le champ électrique est très souvent fautive, et quasiment jamais justifiée correctement. De très nombreux candidats donnent un résultat en

utilisant un double produit vectoriel, mais en omettant les parenthèses, ce qui enlève tout sens à l'expression ! Certains considèrent que toute onde plane est nécessairement monochromatique, ce qui est bien sûr faux.

**I.B** La définition du vecteur de Poynting est connue (89% de bonnes réponses), mais les formulations relatives à sa signification physique sont très souvent maladroites (« le vecteur est un flux » n'a évidemment aucun sens) (20% de bonnes réponses). La norme, la direction et le sens du vecteur de Poynting sont porteurs d'informations.

Le calcul, quant à lui, a donné lieu à de trop nombreuses manipulations frauduleuses : malgré des expressions des champs électrique et magnétique, au minimum fausses, voire inhomogènes, on ne compte plus les expressions miraculeusement justes du vecteur de Poynting permettant d'obtenir une réponse correcte à la question suivante où le résultat était donné. Une telle attitude (qui est plus est, dès le début du problème) est bien sûr à proscrire absolument et a été systématiquement sanctionnée.

**I.C** Il s'agissait ici d'un calcul classique du cours. Cependant des candidats ont été troublés par le fait qu'il fallait calculer la puissance rayonnée dans « tout l'espace » : ceux-ci ont alors calculé une intégrale triple (!) du flux du vecteur de Poynting ... (50% de bonnes réponses). Une description de la surface utilisée pour calculer le flux était bien sûr attendue mais obtenue seulement dans 23% des copies.

## Partie II : Injecteur

**II.A.1** Application du théorème de Gauss dans une situation très classique. Pour bénéficier de tous les points de la question, il fallait bien sûr faire une étude soignée des symétries (l'argument « Par symétrie, on a ... » est à cet égard très largement insuffisant). Il fallait également bien décrire la surface de Gauss utilisée (un vague schéma ne suffisait pas ici) et justifier très précisément l'origine du facteur 2 apparaissant dans le flux (certains candidats prétendent même que le plan chargé est un plan d'antisymétrie de la distribution de charges pour y arriver !). Rares sont les candidats ayant satisfait à toutes ces exigences.

Pour la vérification des relations de passage, il fallait là aussi bien rédiger : donner les relations dans le cas général et prouver de manière convaincante qu'elles étaient satisfaites en l'espèce.

C'était une question assez longue si on voulait la traiter correctement, ce qui justifie qu'elle représentait à elle seule 8% du barème total.

**II.A.2** Il fallait bien sûr évoquer le principe de superposition ou la linéarité des équations (50% des copies le font).

**II.B** On attendait au moins l'évocation de la relation champ-potentiel. Les candidats ayant reconnu la situation de cours du condensateur plan ont bien sûr bénéficié des points de la question.

**II.C** Il s'agissait là de cinématique élémentaire. La question pouvait se résoudre par une approche énergétique ou par l'utilisation du principe fondamental de la dynamique, mais dans tous les cas, il y avait une justification physique à donner (choix du signe devant une racine carrée). Le barème valorisait les copies suivant la méthode classique (système, référentiel, bilan des actions, nom des théorèmes, ...).

**II.D** Le bilan d'énergie a été mal traité. De très nombreux candidats oublient de compter la variation d'énergie potentielle électrique. Dans le bilan, le signe, quand il est correct, avec lequel

il fallait compter la puissance rayonnée (donnée par la formule de Larmor) n'est quasiment jamais justifié. La détermination de la dimension de  $\tau$  a été plutôt correctement effectuée.

### Partie III : Anneau de stockage

**III.A.1** Il fallait justifier que la force de Lorentz ne travaillait pas. Le théorème de l'énergie (ou de la puissance) cinétique révèle des faiblesses : les forces doivent-elles être conservatives, ou pas ? Fréquents mélanges entre travail et puissance.

**III.A.2** L'erreur très classique qui consiste à utiliser la vitesse initiale pour calculer la force de Lorentz a malheureusement été rencontrée très souvent. Ceux qui n'ont pas fait cette erreur ont buté sur la difficulté de la détermination des constantes d'intégration compte tenu du choix inhabituel des axes vis-à-vis de la vitesse initiale. Seuls 16% des candidats ont eu tous les points de cette question.

**III.A.3** Compte tenu de la difficulté précédente, le jury a valorisé les démonstrations correctes d'un mouvement circulaire, même si ce n'était pas le bon. En revanche, il est à regretter que de nombreux candidats n'hésitent pas à affirmer que la trajectoire est un cercle dont le rayon varie au cours du temps, ou dont le centre est la position initiale de l'électron ... Il est donc vraiment dommage que les candidats ne vérifient quasiment jamais la pertinence de leurs résultats, alors qu'un peu de bon sens, allié à la connaissance des résultats essentiels du cours sur le mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique stationnaire et uniforme, explicitement au programme de première année, permettaient de trouver les résultats.

**III.B** Il fallait, avant de réutiliser la formule de Larmor, bien justifier l'expression de l'accélération. Dans l'hypothèse d'un rayonnement faible, on mettait en évidence une décroissance exponentielle de l'énergie.

**III.C** Certains candidats perdent un temps précieux pour retrouver l'accélération d'un mouvement circulaire uniforme.

**III.D.1** Le nombre de chiffres significatifs avec lequel était exprimée la vitesse aurait dû interpeller les candidats quant à ceux nécessaires pour donner la valeur numérique de  $\gamma$ . Ici compte tenu de la dépendance particulière de  $\gamma$  avec  $v$ , seuls 2 chiffres significatifs étaient possibles. Si 74% de candidats trouvent la « bonne » valeur numérique, seuls 3% ont perçu la difficulté liée aux chiffres significatifs. Des erreurs dans la lecture du nombre de 9 dans la vitesse ont été à l'origine de valeurs erronées, ce qui fut dommageable pour la suite des applications numériques, car beaucoup d'entre-elles reposaient sur cette valeur de  $\gamma$ .

**III.D.2** La conversion en keV, d'une énergie calculée en joules, a posé de nombreux problèmes. Le nom évocateur « d'électron-volt » est pourtant, si on a compris la situation physique servant à le définir, un bon moyen mnémotechnique.

**III.D.3** Le faisceau perd 10% de son énergie en 3,5 ms, ce qui impose d'accélérer régulièrement les électrons pour que le faisceau garde son énergie nominale.

### Partie IV : Spectre du rayonnement émis

**IV.A.1** Il y avait deux choses à justifier : le fait que le détecteur ne recevait que des impulsions brèves d'une part, et la périodicité de ces impulsions d'autre part.

**IV.A.2** Le jury attendait un schéma (ou une bonne description littéraire) montrant la bonne compréhension de la position de l'électron au début et à la fin de l'émission de l'impulsion, vis-à-vis de la ligne de lumière.  $\beta$  s'en déduisait par un peu de géométrie élémentaire.

**IV.A.3** Cette question anodine demandait un sérieux effort de compréhension pour bien visualiser ce que l'énoncé appelait « longueur » de l'impulsion : il s'agissait de la distance séparant la position du début de l'impulsion (émise quand l'électron était en A) et le point B, quand l'électron était au point B. Le jury a senti et regretté, à travers la lecture des copies, que de très nombreux candidats, soit ont répondu trop rapidement, soit ont baissé les bras devant le petit effort à fournir (seulement 11% de réponses correctes).

**IV.A.4** Question très facile quasiment toujours réussie quand elle a été abordée.

**IV.A.5** Compte tenu de ce qui précède la question a été très peu abordée. Par ailleurs une confusion entre l'arc AB et la distance AB dans le calcul de la longueur de l'impulsion donnait le résultat attendu, mais sans le pré-facteur  $4/3$ . Là aussi, le jury a sanctionné toute tentative frauduleuse pour arriver au résultat juste à partir de données fausses, et valorisé partiellement les candidats qui, constatant l'écart entre la formule attendue et leurs résultats, l'ont au moins signalé, voire ont tenté d'en trouver l'origine (4% de réponses justes à cette question).

**IV.B.1** Avec les outils du programme, on ne pouvait que « tenter » une évaluation des deux fréquences demandées en les reliant à la période et à largeur des impulsions, ce qui fut fait dans environs 10 % des copies. Le spectre s'étend des rayons X aux ondes radios.

**IV.B.2** Le rayonnement présente un maximum dans les rayons X, ce qui est conforme à l'utilisation que l'on veut en faire. On peut noter par ailleurs une assez grande étendue spectrale qui peut être gênante dans les applications.

## Partie V : Onduleurs et wigglers

**V.A.1** Le jury a valorisé, outre la bonne réponse, les explications menant à sa découverte, ainsi que le lien entre la périodicité spatiale du champ et celle de la répartition des aimants.

**V.A.2** Dans le vide de charges et de courants, en régime stationnaire, le rotationnel de  $\vec{B}$  doit être nul, ce qui n'est pas le cas avec l'expression proposée. L'équation relative au flux de  $\vec{B}$  était quant à elle vérifiée. Cependant, un assez grand nombre de candidats, ne sachant pas calculer correctement la divergence en coordonnées cartésiennes, a affirmé le contraire.

**V.B** Question qui aurait dû être traitée sans difficulté, mais, trop souvent, les candidats intègrent les équations différentielles sans se soucier de savoir si les termes qui y apparaissent sont constants ou pas, ce qui amenait ici des résultats absurdes : il fallait faire attention à ce que  $z = v_0 t$  dans l'expression du champ  $\vec{B}$ , ce qui amenait des solutions en  $\cos(k_0 v_0 t)$  et sûrement pas en  $\cos(k_0 z)t^2$  !

On retrouve par ailleurs la difficulté habituelle de la prise en compte correcte des conditions initiales.

**V.C** Il s'agissait d'une application simple de la formule de Larmor. Le peu de bonnes réponses (18%) s'explique par les erreurs dans les questions précédentes.

**V.D** Question sans difficulté, mais qui nécessitait de disposer de la bonne valeur numérique de  $\gamma$ .

**V.E** Il s'agissait d'une simple règle de trois, mais qui a été souvent conduite de manière erronée, en confondant puissance (du rayonnement) et énergie (des photons). Parmi le peu de candidats

ayant trouvé la bonne réponse, à savoir 1 photon, certains se sont légitimement étonnés de la faible valeur obtenue.

**V.F** La principale difficulté était de calculer correctement l'angle  $\Psi_0$  à partir des équations du mouvement. Ensuite, seule une évaluation numérique explicite permettait d'avoir tous les points de la question. Certains candidats ont bien vu qu'il fallait calculer la valeur numérique de  $K$  pour conclure, mais les points n'ont bien sûr été attribués que si tout ceci était justifié.

**V.G** Question ouverte de fin de problème qui valorise la démarche et la rédaction. Par exemple, il était possible de définir ce qu'était la polarisation circulaire, puis, compte tenu du mouvement étudié qui donnait une polarisation rectiligne, d'en déduire quel devrait être le nouveau mouvement des électrons, puis d'en déduire alors une forme probable du champ  $\vec{B}$  et enfin de proposer une structure d'aimants permanents réalisant ce champ  $\vec{B}$ .

**V.H** De même le jury attendait une réflexion qui distinguait la décomposition spatiale du champ magnétique en série de Fourier, la linéarité des équations et les conséquences sur le mouvement des électrons, qui se traduisaient alors par une décomposition temporelle en série de Fourier. En général les réponses ont été trop floues pour pouvoir bénéficier des points de la question.

## Conclusions

Comme l'année dernière, ce sujet, abordable tant par sa longueur que par sa difficulté, utilisait des éléments variés du programme des deux années de physique des classes préparatoires aux grandes écoles (le programme de première année était d'ailleurs majoritairement représenté). Il a parfaitement rempli son rôle de classement des candidats, le barème récompensant les démarches *honnêtes, justes et justifiées*.

Au delà des recommandations que le lecteur trouvera dans les rapports des années antérieures, toujours d'actualité, le jury conseille aux futurs candidats d'utiliser tous les moyens (légaux !) pour vérifier, *a priori*, la validité de leurs réponses : bon sens physique, cas limite, homogénéité des formules. Cela leur évitera de répondre inutilement à un grand nombre de questions et de se bercer d'illusions quant à la réussite à l'épreuve.

Il faut de même maîtriser un ensemble, finalement assez restreint, de techniques et de résultats élémentaires pour aborder sereinement cette épreuve : cette capacité est malheureusement trop souvent déficiente et obère de fait les possibilités de raisonnements plus poussés pour les situations plus subtiles. C'est une idée fondamentale à garder en tête lors des deux années de préparation.