

1/ REMARQUES GÉNÉRALES

1.1- PRÉSENTATION DU SUJET

Cette année, le sujet de physique de la filière PC était constitué, pour la deuxième fois, d'un unique problème. Il abordait certaines étapes de l'histoire des sciences qui ont permis, au cours du XX^e siècle, de préciser la structure et les propriétés de l'atome.

Il était composé de six parties indépendantes et comportait 49 questions qui permettaient de « balayer » la mécanique, l'électromagnétisme, l'optique, la physique quantique et le bon sens... La variété des termes abordés devait permettre à une majorité de candidats d'obtenir une note honorable, ce qui n'a pas été le cas. Cependant, ce problème devait « classer » correctement les candidats car se côtoyaient de nombreuses questions de cours très simples et des questions plus délicates.

Dans la **partie I**, on s'intéressait à l'expérience de *E. Rutherford*, qui conduisit à abandonner le modèle de *J. J. Thomson* au profit de celui de *J. Perrin*. Les limites de ce modèle faisaient l'objet de la **partie II**, limites qui étaient partiellement levées dans la **partie III** avec les postulats de *N. Bohr*. L'expérience historique de *O. Stern* et *W. Gerlach*, décrite dans la **partie IV**, apportait la preuve de l'existence d'un moment magnétique propre de l'électron. Et dans la **partie V**, on voyait de quelle manière l'interprétation première de cette expérience a été mise en défaut avec l'effet Zeeman. La mécanique quantique, qui apporte à ce jour la description la plus complète de l'atome, était abordée dans la **partie VI** avec l'étude du mouvement de l'électron d'un atome d'hydrogène à partir de l'équation de *E. Schrödinger*.

Dans ce problème, plusieurs résultats étaient fournis à des endroits « stratégiques » pour permettre au candidat d'aller plus loin et de montrer un plus vaste champ de ses compétences et savoirs. Mais attention, comme les années précédentes, nous avons constaté chez de nombreux candidats un manque de rigueur dans les calculs, sans doute accentué par le fait qu'ils savent par avance le résultat à obtenir. Cela a même conduit à des tentatives très malvenues de « passage en force » pour obtenir le résultat. L'honnêteté qui consiste à constater que le calcul n'aboutit pas au résultat demandé est toujours préférable. Il ne faut d'ailleurs pas oublier que, dans le barème, des points sont prévus pour les étapes intermédiaires au sein d'une question. **Attention, les correcteurs lisent avec attention la totalité des réponses écrites.**

De plus, si les candidats ont compris que les différentes parties étaient indépendantes, ils n'ont pas toujours vu que de nombreuses questions étaient abordables, même si les précédentes étaient fausses ou non traitées.

Par ailleurs, certains candidats esquivent systématiquement les applications numériques et se privent de points souvent faciles à avoir.

Il y a eu d'excellentes copies, plus que les années précédentes, dans lesquelles chacune des parties a été abordée, avec des notes supérieures à 15. En revanche, il y a aussi eu un nombre non négligeable de copies avec une note inférieure à 2 et très peu de questions abordées ou bien avec des réponses complètement farfelues. Pour les copies les plus faibles, on remarque qu'il n'y a pas eu de stratégie

d'évitement de certaines notions. On note toujours que les étudiants semblent avoir des difficultés à restituer leurs connaissances de première année.

1.2- PROBLÈMES CONSTATÉS PAR LES CORRECTEURS

Des notions très basiques de première année ne sont pas du tout maîtrisées par certains candidats. Pêle-mêle, on pourra citer la définition du moment cinétique (confondu avec le moment d'une force), la projection d'un simple vecteur unitaire dans une autre base, la loi de Coulomb, le calcul d'une énergie potentielle, le calcul de la vitesse et de l'accélération d'un point matériel dans une base polaire, l'expression de la longueur d'onde de De Broglie etc.

On peut regretter que certains candidats n'aient pas le moindre recul et le moindre regard critique quant aux ordres de grandeur. Ceci est flagrant à propos du calcul du rayon de Bohr, de l'énergie du niveau fondamental de l'atome d'hydrogène ou de la distance minimale d'approche de la particule alpha dans l'expérience de Rutherford.

Dans la partie III, l'expression de la vitesse et de l'énergie de l'électron sur une orbite circulaire a été donnée en préambule. Il s'agissait en fait de la réponse aux questions **Q13** et **Q14**. Beaucoup de candidats se sont ainsi arrangés sans la moindre vergogne pour retrouver ces résultats malgré des calculs intermédiaires absolument faux.

De façon générale, une bonne connaissance du cours et une bonne maîtrise des méthodes vues en TD restent les clés de la réussite pour une telle épreuve. Or, il est fréquent de voir des lacunes, parfois grossières, sur le cours de physique, de niveau PCSI comme de niveau PC.

Nous avons noté cette année, pour un nombre important de candidats, une non-maîtrise de savoirs mathématiques : produit vectoriel, mélanges scalaires/vectoriels, projection de vecteur,... Sur le plan mathématique, des erreurs d'étourderie pourraient être évitées, par une plus grande relecture ou de l'analyse dimensionnelle, ou même simplement avec du bon sens. Il faut néanmoins rappeler que l'analyse dimensionnelle ne peut faire office de démonstration (sauf si la question la demande explicitement).

Par ailleurs, il faut être particulièrement attentif aux unités et au respect de l'homogénéité des expressions. Il a aussi été noté **un manque de rigueur scientifique dans l'expression écrite**. Beaucoup de candidats rencontrent des **difficultés de rédaction et ont du mal à communiquer** : vocabulaire inadapté, explications embrouillées, etc. Certains ont aussi répondu « à côté » de la question sans doute parce qu'ils l'avaient mal lue, ce qui est dommage car il y avait de très nombreux points à obtenir pour qui savait lire correctement un énoncé... À noter que beaucoup d'étudiants paraphrasent la question posée, sans vraiment y répondre, ce qui ne donne pas de points (**Q1, Q27, Q41**).

Les correcteurs notent une bonne qualité générale des présentations des copies. Mais attention, certains ont une écriture minuscule et illisible qu'il faut, bien évidemment, s'attacher à bannir. Quelques copies ressemblent encore à des brouillons, leur rareté soulignant encore plus ce manque de soin.

La rédaction est trop souvent réduite à sa plus simple expression. **Il est regrettable de constater que de nombreux candidats se permettent de répondre à une question par l'écriture d'une relation sans aucun commentaire ou justification**. Le barème 2019 a tenu compte, comme l'année précédente, de la qualité de présentation et de rédaction des copies. Il faut penser à écrire lisiblement et éviter les ratures « à tout va » (utiliser des brouillons). Pour les prochaines sessions du concours, il importe de maintenir la qualité de présentation des copies et d'améliorer leur rédaction (la communication écrite est au cœur du métier d'ingénieur). Ces dernières remarques sont identiques à celles du rapport des deux dernières années.

La correction des copies a fait ressortir un certain nombre d'erreurs récurrentes qui font l'objet de l'analyse détaillée ci-après.

2/ REMARQUES SPÉCIFIQUES

PARTIE I - LIMITE DU MODÈLE DE J. J. THOMSON À TRAVERS L'EXPÉRIENCE DE E. RUTHERFORD

Cette première partie montrait la mise en défaut du modèle de Thomson par l'expérience de Rutherford. Il s'agissait principalement d'interpréter la rétrodiffusion de particules alpha à proximité d'un noyau atomique. Cette partie faisait appel essentiellement à des notions de mécanique de première année (moment cinétique, énergie et lois de conservation en mouvement à force centrale).

Q1. Peu de bonnes réponses argumentées. Une majorité se contente de redécrire le phénomène sans argumenter et en affirmant l'incompatibilité. Nous avons pu observer que certains candidats transforment le faisceau de particules alpha en « faisceau d'atomes », voire en « faisceau d'électrons », avec, à la clé, des descriptions fantaisistes de l'expérience.

Q2. Ne pas connaître correctement la force d'interaction coulombienne, avec signes et vecteurs justes, est navrant. Beaucoup de confusion ou d'incompréhension sur les concepts de force centrale, force conservative. Concernant les lois de conservation, on attend du candidat qu'il attache à chaque loi une propriété bien précise et non pas qu'il donne une réponse générale : force centrale/newtonienne conservative. C'est ici uniquement le caractère central de la force qui implique la conservation du moment cinétique et le caractère conservatif qui implique la conservation de l'énergie mécanique. Certains candidats ont en revanche pris le soin d'argumenter à partir du théorème du moment cinétique. Parfois, on trouve une erreur dans la primitive pour calculer l'énergie potentielle dont elle dérive.

Q3. La question était claire : on demandait une expression en fonction de m_α et v_0 , on a pourtant souvent vu des réponses avec le terme en K/d (nul à l'infini comme spécifié dans le sujet).

Q4. Formule du moment cinétique parfois non connue ou fautive (des erreurs de signe dans le produit vectoriel, introduction d'un moment d'inertie, ou pire : $\vec{L}_0 = \vec{OM} \wedge \vec{E}_c \dots$).

Q5. Les candidats ont parfois été gênés par le signe « moins » du moment cinétique initial, certains ont tenté de s'en débarrasser en conservant la norme du moment cinétique. Rappelons que la plupart des grandeurs physiques scalaires sont algébriques, et que leur signe (apparent ou pas) a une signification physique.

Q6. Cette question et la suivante, qui étaient classiques il y a une vingtaine d'années, sont maintenant assez difficiles pour des candidats moyens, beaucoup sautant les questions 7 à 12 pour reprendre à la **Q13**. Bien traitée en général pour ceux qui ont bien traité **Q4** et **Q5**.

Q7. Question très guidée pour laquelle certains obtiennent un résultat juste à partir de résultats intermédiaires faux. On a vu des projections du vecteur vitesse selon l'axe (0x) écrites sous la forme $v_x \cdot \cos\theta$ ce qui montre que le candidat ne sait pas ce que représente une composante d'un vecteur.

Q8. Peu d'explications convaincantes de l'interprétation des observations de Rutherford : les candidats ne font pas le lien entre le paramètre d'impact b lié à la position du noyau relativement à la direction de la particule alpha à l'infini et la déviation. Ils font plutôt souvent référence à la dépendance de φ avec la vitesse incidente v_0 , qui est pourtant la même pour toutes les particules.

Q10. Des calculs de dérivée fastidieux et inutiles. On voit des réponses $\varphi = -\pi$ sans aucun sens physique et qui conduisent à $dm = 0$!

Q11. $b = 0$ a beaucoup gêné les candidats et leur dessin montrait une particule déviée ne revenant pas sur elle-même...

Q12. Peu d'applications numériques.

PARTIE II - LIMITE DU MODÈLE PLANÉTAIRE

La seconde partie montrait la limite du modèle planétaire de Rutherford par la prise en compte de la puissance dissipée par rayonnement par l'électron chargé qui gravite autour du noyau. Les questions portaient aussi ici sur les mouvements à force centrale.

Q13. Des candidats y arrivent (réponse donnée dans la partie suivante) mais que d'horreurs alors que toute cette partie est abordée en première année ! On voit encore des intégrations directes de la force comme si celle-ci était constante et pour certains, ils orientent \vec{v} selon \vec{e}_r ! Bien que pas au programme, des candidats passent à juste titre par l'accélération dans la base de Frenet.

Q14. Une question assurément bien travaillée en classe compte tenu de son taux de réussite.

Q15. L'analyse dimensionnelle élémentaire demandée n'a souvent pas été correctement traitée. On voit des décompositions surprenantes (voire délirantes) en unités du système international pour donner l'unité de P_0 alors qu'il était beaucoup plus simple de passer plutôt par l'expression de $P(r)$.

Peu de justifications convaincantes sur la diminution du rayon. Beaucoup écrivent que c'est parce que $P(r)$ augmente au cours du temps, ce qui dénote une confusion entre une grandeur (l'énergie) et sa variation (la puissance). On retrouve cette confusion à la question 31.

Quelques « démonstrations » expliquant que l'énergie mécanique de l'électron devait se conserver...

Q16. Oubli souvent du signe moins : $P(r) > 0$ est définie comme la puissance moyenne cédée par le système. Du coup, des oublis « malencontreux » du même signe dans le calcul de la différentielle de E_M pour retrouver le bon résultat. De nombreux candidats arrivent au bon résultat après une double erreur de signe...

Q17. Peu d'applications numériques.

PARTIE III - POSTULATS DE N. BOHR

La troisième partie était consacrée à l'atome de Bohr avec quelques questions autour de notions vues en première année sur le monde quantique (onde de matière de De Broglie, transitions entre niveaux énergétiques...).

De nombreux points ont été gagnés sur cette partie même si les questions étaient traitées partiellement.

Q18. La plupart des étudiants connaissent bien le rayon de Bohr. Question presque toujours traitée de la bonne manière. Cependant, de nombreux candidats ne semblent pas savoir utiliser leur calculatrice en notation scientifique car ils écrivent « que sur leur calculatrice, r_0 et E_0 (Q20) sont quasi-nuls ».

Q19. Inégalement traitée.

Q20. La valeur de E_0 est bien connue.

Q21. Souvent bien traitée, même si plusieurs candidats trouvent une valeur négative de la constante de Rydberg.

Q22. Plusieurs candidats trouvent les bons résultats mais oublient de confirmer la validité du modèle. Les ultraviolets ne s'imposent pas à tous !

PARTIE IV – EXPÉRIENCE DE O. STERN ET W. GERLACH

La quatrième partie était une étude de l'expérience de Stern et Gerlach au programme de deuxième année sous forme documentaire. La plupart des questions portaient sur l'électromagnétisme (équations de Maxwell, analyse d'une carte de champ, dipôle magnétique plongé dans un champ appliqué uniforme).

Q23. Question souvent mal traitée. Très peu de convention d'orientation du vecteur surface en fonction du sens du courant. Les candidats n'ont pas tenu compte de l'orientation des électrons donnée sur la figure 5 d'où des erreurs de signe ou un résultat juste mais via une double erreur de signe... Méconnaissance du cours pour de nombreux candidats.

Q24. et Q25. Questions difficiles pour beaucoup de candidats, dû probablement au fait que l'expérience de Stern et Gerlach ne fait l'objet en PC que d'une approche documentaire sans calculs.

Q24. Question plutôt bien réussie dans les bonnes copies. En revanche, les candidats qui ne font pas la différence entre \vec{e}_z et \overline{e}_z se retrouvent avec un couple nul donc un moment cinétique et un moment magnétique constant !

Q25. Question peu abordée.

Q26. Beaucoup de réponses du style « car sinon l'atome n'est pas dévié ». Certes, mais on attend de façon plus rigoureuse que le candidat fasse le lien avec l'expression de la force car potentiellement un champ uniforme peut modifier la trajectoire d'une particule chargée.

Q27. Peu d'explications : les candidats reprennent le texte de l'énoncé... Trop souvent, les candidats ne s'appuient pas sur un schéma pour expliquer la topologie de \vec{B} . Rares sont ceux qui ont fait état du resserrement des lignes de champ, plus marqué au sud qu'au nord.

Q28. Bien traitée dans l'ensemble, même si pour certains, il manque les flèches sur les vecteurs \vec{E} et \vec{B} .

Q29. L'opérateur $\overline{m \cdot grad}$ a souvent été mal calculé bien que cette forme soit semblable à celle qui apparaît dans l'accélération convective en mécanique des fluides. Le résultat étant donné, beaucoup de candidats ne se sont pas donnés la peine d'effectuer un calcul correct et vont au plus pressé, cette habitude doit être corrigée.

Q30. On a vu des comparaisons entre la pulsation de Larmor et le temps de transit. Peu de justifications claires au fait que $\langle m_y \rangle = 0$.

Q31. On attendait de justifier que le champ magnétique est croissant avec z car les lignes de champ se resserrent (le champ est à flux conservatif). Il y a eu des confusions avec l'orientation des lignes de champ (dirigées du Nord vers le Sud donc dans le sens des z croissants) qui ne justifient pas la dépendance du champ avec z . La distinction entre la dépendance et l'orientation d'un champ semble donc mal comprise bien que vue en électromagnétisme lors de l'étude des invariances des sources et de leurs éléments de symétrie. L'orientation de \vec{B} ne suffit pas à prouver que $\frac{\partial B_z}{\partial z} > 0$.

Q32. Globalement mal traitée.

Q33. La quantification du moment magnétique de spin est inégalement sue. Tout le monde n'a pas compris les conclusions de l'expérience de Stern et Gerlach. On a pu lire qu'il s'agissait de la quantification de la charge, ou d'un phénomène d'interférence...

PARTIE V - L'EFFET ZEEMAN NORMAL

La cinquième partie permettait essentiellement d'interroger le candidat sur le programme d'optique ondulatoire de deuxième année à travers l'utilisation d'un interféromètre de Fabry-Pérot pour mettre en évidence l'effet Zeeman normal.

Q34. Inégalement traitée. Pour certains, $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ implique $\Delta E = \frac{h \cdot c}{\Delta \lambda} \dots$

Q35. Le théorème de Malus n'est pas bien compris ou du moins bien appliqué. On voit beaucoup de réponses fausses du type : $\delta = (M_1O_1) + (O_1M_2)$. Il faut s'appuyer sur un schéma clair et précis.

Q36. L'interféromètre de Michelson ne permet d'observer des anneaux d'égale inclinaison qu'en réglage en lame d'air. Attention à la confusion entre foyer image et plan focal image et certains ne font pas la distinction entre objet et image. Sur ce type de question, il faut être précis dans sa rédaction.

Q37. R.A.S.

Q38. Peu de réponses justes.

Q39. R.A.S.

Q40. Question très rarement abordée et comprise.

Q41. Les candidats semblent penser qu'une figure d'interférences lumineuses se limite à deux zones : une zone d'éclairement maximal et une zone d'éclairement minimal. L'éclairement est une grandeur continue et il sera quelconque si l'ordre d'interférence est quelconque.

Q42. Question très rarement abordée et comprise.

Q43. Question peu abordée.

PARTIE VI - ORBITALES ATOMIQUES

La dernière partie était consacrée à l'étude de l'orbitale 1s de l'atome d'hydrogène avec des questions sur la partie approche ondulatoire de la mécanique quantique (densité de probabilité de présence, équation de Schrödinger stationnaire).

Bien que situées en fin de problème, on peut noter, avec satisfaction, que ces questions ont été autant traitées que les autres sur la globalité des copies, et assez correctement.

Q44. Plutôt bien traitée.

Q45. Les réponses manquent souvent de précision : $|\varphi(\vec{r})|^2$ est dimensionné, c'est une densité de probabilité de présence (ou une probabilité par unité de volume) et non simplement une probabilité.

Q46. Pas de difficultés majeures notées jusqu'au calcul du laplacien de la fonction d'onde. Par contre, l'expression de l'énergie est souvent donnée avec une dépendance en r .

Q47. Très peu réussie. Les candidats s'arrêtent à l'expression de E_{1s} en fonction de r et ne précisent pas que l'état est stationnaire.

Q48. Très peu réussie. Le bon résultat a parfois été obtenu avec un « bricolage » entre éléments de volume et éléments de surface...

Q49. Peu de candidats ont cité l'asymétrie de la courbe.