

# Physique-chimie 1

## Présentation du sujet

Intitulé « Vie et mort d'un photon », le sujet propose aux candidats d'étudier différents aspects d'une expérience non destructive d'electrodynamique quantique. Le questionnement permet de comprendre comment il est possible de détecter la présence d'un photon piégé dans une cavité grâce à l'interaction de ce photon avec un faisceau d'atomes de rubidium, préalablement portés dans un état de Rydberg.

Le sujet est constitué de trois parties indépendantes entre elles, de poids relatifs très différents. De longueur raisonnable, il aborde des thématiques figurant dans les programmes de physique des deux années de classes préparatoires (mouvement dans un champ à force centrale, mouvement dans un champ électrostatique, physique quantique, optique ondulatoire, circuits en interaction magnétique) et comprend — entre autres — une unique question de chimie (la première question du sujet), quelques questions d'analyse documentaire et deux questions non guidées. Les capacités à mobiliser sont ainsi très variées, laissant à chaque candidat l'opportunité de mettre en évidence ses qualités et son niveau de maîtrise des notions en jeu.

## Analyse globale des résultats

Le sujet étant bien calibré et progressif, une bonne partie des candidats a abordé, sans survol, l'ensemble des parties et sous-parties proposées, en respectant la progression suggérée par l'énoncé. Les questions correspondant à des démonstrations classiques du cours ou à des applications directes sont très souvent bien traitées. Les questions plus techniques sur le plan calculatoire, ou plus fines sur le plan de l'analyse physique, ont permis quant à elles de bien différencier les candidats. Les meilleurs candidats ont bien compris l'ensemble des enjeux du problème posé et ont remis des copies très plaisantes à lire.

La présentation des copies est globalement satisfaisante ; le jury apprécie fortement les efforts réalisés par les candidats dans ce domaine par rapport aux sessions précédentes. En revanche, les défauts de rédaction, déjà soulignés dans les rapports antérieurs, perdurent et font souvent perdre des points qui pourraient s'avérer précieux. Le jury attend des raisonnements précis et des explications concernant l'enchaînement des idées dans la résolution des questions complexes. En outre, une tautologie ne devrait jamais faire office de réponse à une question qualitative.

La plupart des candidats a fait l'effort de lire les documents scientifiques associés à la sous-partie I.D (qui représente environ 22 % du barème) et de réfléchir aux questions portant sur ces documents. Le jury tient à souligner cet effort, même si l'extraction des données pertinentes et l'interprétation des résultats est parfois maladroite. En revanche, les deux questions non guidées, repérées par une marge dans l'énoncé, ont été délaissées d'emblée par plus de 80 % des candidats. Cela est regrettable dans la mesure où ces deux questions représentent environ 18 % du barème, sans être particulièrement chronophages. Les candidats qui ont proposé des éléments de réponse sont souvent récompensés : un quart d'entre eux obtient au moins la moitié du total des points alloués.

## Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

### I Étude des atomes de Rydberg circulaires

**Q1.** La structure électronique est presque toujours bien transcrise. L'identification des électrons de valence dans cette structure est parfois source de confusion. Quant à la famille des alcalins, elle est souvent confondue avec celles des halogènes et souvent mal orthographiée.

**Q3.** Seuls 17 % des candidats ont répondu correctement à cette question ! Une bonne partie des réponses erronées rencontrées peut sans doute être attribuée à une lecture trop superficielle de l'énoncé. De façon générale, le jury recommande de consacrer un temps suffisant aux questions qualitatives posées au début de l'épreuve car celles-ci permettent aux candidats de s'approprier le modèle proposé.

**Q6.** La démonstration du caractère constant de  $\vec{L}$  est bien réalisée. En revanche, la planéité du mouvement qui en découle est souvent affirmée sans aucun élément de justification.

**Q7.** Il faut expliquer pourquoi l'énergie mécanique se conserve (quelques mots suffisent). L'expression de l'énergie potentielle effective est correcte dans plus de 70 % des copies, ce qui témoigne de la bonne assimilation de cette notion par les candidats.

**Q8.** La formulation de la première partie de cette question a manifestement dérouté les candidats. Le jury attendait une argumentation faisant le lien entre le graphe de l'énergie potentielle effective, l'énergie mécanique de l'électron et les valeurs de  $r$  accessibles. Pour la détermination du rayon, certains candidats résolvent l'équation  $\mathcal{E}_{p,\text{eff}}(r_C) = 0$  au lieu de  $\frac{d\mathcal{E}_{p,\text{eff}}}{dr}(r_C) = 0$ .

**Q9.** Cette question, pourtant proche du cours, est fréquemment mal traitée. Si la majorité des candidats pense à injecter la forme de  $\psi$  dans l'équation de Schrödinger, une part non négligeable d'entre eux ne procède pas correctement à la séparation des variables temps et espace qui permet d'aboutir à l'équation différentielle vérifiée par  $\chi$ .

**Q10.** Le signe de l'énergie  $\mathcal{E}$  ne peut pas être justifié à partir d'une hypothétique divergence de la fonction  $\chi$  lorsque  $t \rightarrow \pm \infty$  !

**Q11.** L'intervalle des valeurs permises pour le nombre quantique  $\ell$  est étonnamment mal connu (seuls 42 % des réponses apportées sont correctes).

**Q14.** Le changement de variables  $r \rightarrow \rho$  dans l'équation différentielle est plutôt bien réalisé. Le jury a rencontré quelques erreurs de conversion d'unités lors de l'évaluation numérique de  $\mathcal{E}_0$ .

**Q15.** Certains candidats semblent ignorer que la densité de probabilité de présence de l'électron est donnée par  $|\psi|^2$  (et non par  $|\psi^2|$  par exemple).

**Q17.** L'application numérique est correcte pour deux tiers des candidats ayant proposé une valeur. L'interprétation physique du résultat laisse parfois à désirer : on ne peut pas répondre correctement à la question « Pourquoi qualifie-t-on les atomes de Rydberg circulaires d'atomes géants ? » sans faire une comparaison explicite avec la taille d'un atome usuel.

**Q18.** Cette question a été mal comprise par certains candidats, qui évoquent le caractère non relativiste de l'électron ou qui cherchent à montrer que la relation d'indétermination de Heisenberg n'est pas vérifiée ! Le jury attendait des candidats qu'ils expliquent que l'électron étudié a une très forte probabilité de présence au voisinage de l'orbite classique caractérisée dans la sous-partie I.B.

**Q19.** Les candidats ont généralement réussi à exprimer correctement la fonction  $u(\rho)$ . L'obtention de l'expression de  $\epsilon$ , puis de l'énergie  $\mathcal{E}$ , s'avère plus délicate : les erreurs de calcul lors de l'injection de  $u(\rho)$  dans l'équation (I.2) sont très fréquentes.

**Q21.** Que de confusions entre les notions de champ électrique, de potentiel électrique ou encore de force électrostatique ! Il en découle de nombreuses erreurs sur l'unité du champ  $E$  recherché ; le jury rappelle qu'une valeur numérique — même juste — accompagnée d'une unité incorrecte est systématiquement considérée comme fausse. Par ailleurs, lorsque l'énoncé demande d'évaluer un ordre de grandeur, le résultat doit être exprimé avec un unique chiffre significatif.

**Q24.** Il fallait exploiter correctement la figure 12 du document annexe et comprendre que la largeur de la courbe correspond au temps de passage au-dessus du diaphragme, dont le diamètre vaut 6 mm.

**Q25.** Les candidats qui l'ont abordée ont souvent bien, voire très bien, traité cette question. Félicitations à eux !

**Q26.** Les réponses apportées sont généralement pertinentes, même de la part de candidats qui n'ont pas traité la question précédente.

## II Étude de la cavité micro-ondes

Cette partie, qui représente 25 % du barème a globalement été mal traitée, comme en attestent les statistiques : la médiane des scores obtenus se situe à 20 % du nombre de points récupérables et seuls un quart des candidats obtient plus de 33 % des points alloués à cette partie.

**Q28 et Q29.** Il s'agissait de traduire rigoureusement le caractère progressif des ondes entre les points utiles, sans oublier de prendre en compte les relations sur les amplitudes imposées par les coefficients de réflexion des miroirs.

**Q31.** Cette question est traitée de façon satisfaisante dans une large majorité des copies où elle a été abordée.

**Q32.** De façon étonnante, le jury a été confronté à un grand nombre d'erreurs de calcul algébrique lors de la résolution de l'équation  $I_{\max}(\delta\Phi/2) = I_M/2$  ! L'erreur la plus fréquente consiste en l'oubli d'un facteur 1/2 dans l'argument du sinus figurant dans l'expression de  $I_{\max}$ .

**Q33.** Le lien entre largeur spectrale et durée typique de l'onde est bien connu.

**Q34.** Le jury a eu le plaisir de lire quelques belles démonstrations, reposant sur l'espérance mathématique de la durée de vie du photon dans la cavité.

**Q37.** L'angle  $\theta$  caractérisant l'ouverture angulaire du faisceau diffracté est souvent relié correctement aux paramètres utiles. En revanche, peu de candidats pensent à exploiter la conservation de l'énergie entre les bords de la cavité, et donc à comparer les sections du faisceau diffracté en  $z = 0$  et en  $z = d$ . Parmi ceux-là, certains se trompent sur la géométrie du système et oublient la symétrie de révolution du problème : les surfaces à considérer sont des disques et non des triangles.

**Q38.** Beaucoup d'erreurs sur la dimension de  $w_0$ , souvent assimilée à une pulsation au lieu d'une longueur.

**Q39 et Q40.** Ces questions, relativement délicates, ont rarement été abordées.

## III Couplage entre un atome de Rydberg et la cavité

**Q41.** Quelques candidats écrivent des relations de la forme  $i = C \frac{du_C}{dt}$  pour le condensateur ou  $u_L = L \frac{di}{dt}$  pour la bobine sans s'être assurés au préalable que ces dipôles étaient orientés en convention récepteur. La réalisation d'un schéma électrique faisant apparaître les grandeurs utiles aurait certainement permis d'éviter cet écueil. Par ailleurs, l'utilisation des impédances complexes s'avère assez peu pertinente ici.

**Q42.** Cette question a été assez mal comprise car elle nécessitait de relier le modèle électrocinétique envisagé aux différents phénomènes physiques étudiés dans les parties I et II.

**Q43.** Les candidats qui ont traité correctement la question 41 parviennent généralement à établir le système différentiel donné dans l'énoncé. En revanche, l'expression de  $\varepsilon$  en fonction des paramètres indiqués pose quelques problèmes.

**Q44.** Si la plupart des candidats parvenus à cette question injectent correctement les expressions complexes des courants dans le système établi à la question précédente, rares sont ceux qui comprennent que  $I_{c0}$  et  $I_{a0}$  sont des inconnues du problème et qui pensent à exploiter la nullité du déterminant associé au système linéaire obtenu.

**Q45.** La consigne demandant de « reproduire la figure » et de la compléter en pointillés n'a pas toujours été respectée. Comment faire alors pour mettre en évidence visuellement l'effet du couplage sur le positionnement relatif des niveaux d'énergie ?

## Conclusion

Comme tous les ans, le jury attire l'attention des candidats sur l'importance d'une lecture attentive de l'énoncé. À ce titre, il est également judicieux de prendre connaissance, dès le début de l'épreuve, du formulaire proposé en fin d'énoncé.

Afin d'aider au mieux les futurs candidats à se préparer aux épreuves du Concours Centrale-Supélec, il paraît important d'insister sur les points suivants.

- La parfaite maîtrise du cours est une condition absolument nécessaire à la réussite de cette épreuve. Il importe en particulier d'avoir les idées claires quant aux dimensions des grandeurs physiques manipulées et aux ordres de grandeur classiques.
- Il est inutile de se précipiter lors des réponses aux questions proches du cours, au risque d'oublier certains éléments-clés dans les démonstrations, faisant ainsi perdre des points. La qualité de la rédaction constitue une part importante de la notation.
- Les réponses aux questions qualitatives doivent être argumentées.
- Le jury apprécie toujours autant les candidats qui prennent le temps de commenter les valeurs numériques obtenues. Il valorise également ceux qui font preuve d'honnêteté intellectuelle et de sens critique lorsqu'ils obtiennent une valeur aberrante eu égard au cadre de l'étude.
- Le jury encourage vivement les candidats à prendre connaissance des questions identifiées comme non guidées, ainsi qu'à consigner sur leur copie leurs pistes de réflexion, accompagnées des éléments d'explication utiles, et ce même si le raisonnement n'est pas totalement abouti. Le barème réserve en effet de nombreux points à la mise en place de la démarche scientifique.
- Les candidats doivent veiller à la bonne présentation de leur copie et à la lisibilité de leurs réponses, particulièrement sur les questions calculatoires. Le recours à une ou plusieurs feuilles de brouillon ne constitue pas une perte de temps et permet, au contraire, de restituer sur la copie une version efficace et claire des démonstrations. Les résultats définitifs doivent également être mis en valeur (soulignés ou encadrés).

Le jury espère que ces quelques conseils seront profitables aux candidats des sessions futures et tient encore à féliciter les candidats ayant remis cette année d'excellentes copies, témoignant des efforts intellectuels engagés au cours des deux années de classes préparatoires.