

Physique 2

Présentation du sujet

Dans le sillage du sujet de l'an passé, le sujet de cette année est très visuel et centré sur la détection de molécules individuelles à température ambiante.

Inspiré de travaux de recherche menés au sein des laboratoires d'Orsay (Université Paris Saclay), le sujet nous propose d'étudier la possibilité de détecter individuellement, par microscopie confocale, des molécules fluorescentes dispersées dans un échantillon. La détection individuelle, en éliminant le moyennage spatial, permet d'exploiter ces molécules comme des sondes locales, à l'échelle nanométrique, de leur environnement.

Le sujet présente naturellement une première partie destinée à étudier le système optique et le taux de fluorescence émis par une molécule pour établir un rapport signal sur bruit et la faisabilité d'acquérir des images dans un temps raisonnable. Une illustration est ensuite donnée dans une seconde partie par le suivi de la diffusion d'une seule molécule dans une matrice sol-gel. Dans une troisième partie, une extension de la méthode de détection est présentée : un substrat métallique présentant une rugosité à l'échelle nanométrique peut amplifier le signal émis par une molécule adsorbée à sa surface.

Le sujet est largement documenté tout au long de la progression et accompagné d'annexes relatives à de l'optique géométrique.

Les problématiques des nanosciences étant diverses, celles de ce sujet le sont tout autant, permettant aux candidats de balayer largement le spectre des connaissances acquises au cours de leurs deux années de classes préparatoires : optique géométrique, physique des lasers, traitement d'images, électromagnétisme dans les milieux... Les angles d'attaque variés sont autant de portes d'entrées, ayant permis une épreuve de très bonne facture et bien calibrée.

Analyse globale des résultats

Bien que s'intéressant à ce qui se passe à l'échelle nanoscopique, ce sujet permet d'ouvrir un champ large sur les connaissances acquises au cours des deux années de classes préparatoires et les candidats ont su le reconnaître.

Globalement, les candidats ont eu la possibilité d'aller au bout du sujet pour une majorité d'entre eux et ont su trouver les questions proches du cours. La progressivité des questions, au sein de chaque partie, a permis à tout étudiant sérieux de valoriser ses savoirs et savoir-faire acquis au cours de ses deux années de classes préparatoires. Le jury a pleinement conscience que cette génération d'étudiants a été particulièrement éprouvée par la pandémie et, eu égard à cette situation, est tout spécialement admiratif de la bonne tenue de beaucoup de copies. Il tient par conséquent à en féliciter les candidats et les enseignants qui ont su faire preuve, tout au long de cette formation, d'une adaptabilité sans précédent.

Avant une analyse plus détaillée sur les réponses apportées, le jury note toutefois les difficultés relatives à l'optique géométrique : de nombreux candidats ne maîtrisent pas les connaissances acquises au cours de la première année de classes préparatoires, ce qui les handicape clairement dans un tel sujet. Étonnamment, la physique du laser, bien guidée, a posé moins de problèmes.

Globalement, le jury est satisfait de voir que cette épreuve a rempli pleinement son rôle d'épreuve clasante, conduisant les candidats sérieux à une note honorable et permettant aux meilleurs de s'exprimer avec brio.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Remarques générales

Dans le contexte actuel, le jury a eu à cœur de valoriser les réponses du candidat, prenant le soin de toujours vérifier la cohérence de ses raisonnements, en dépit d'une éventuelle erreur commise antérieurement et pouvant se répercuter sur plusieurs questions. C'est un effort qui a demandé sans aucun doute plus de concentration à chacun des correcteurs, mais qui nous permet d'être plus justes avec les candidats ayant fait une erreur perlée sur une succession de questions.

La très belle question ouverte, s'appuyant sur des observations expérimentales, a suscité bien des inquiétudes aux candidats. Dans une telle question, le jury tient à dire qu'il a favorisé avant tout l'évaluation par compétences, afin d'accueillir avec bienveillance tout raisonnement cohérent, même si le résultat final n'était pas celui attendu. Il tient à cette occasion à faire remarquer au candidat que ce qu'il a appris lors des approches documentaires abordées au cours de sa formation doit lui permettre de mieux appréhender cette question. Le jury regrette ainsi que la majorité des candidats n'ait pas abordé cette question et encourage les futurs ingénieurs qu'ils sont à élaborer rapidement ce que nous nous sommes permis d'appeler un « plan de bataille » : tel est l'état d'esprit à avoir face à une question ouverte, question qui ne tardera pas à se poser, d'une manière ou d'une autre à ces jeunes diplômés et qu'ils sauront résoudre grâce à tout ce qu'ils auront acquis au cours de leurs années passées en classes préparatoires et en école d'ingénieur.

La seconde partie, qui avait pour but d'établir l'équation de diffusion, a souvent été bien abordée, avec toutefois deux niveaux de lecture, dont le jury a tenu compte.

Enfin, la troisième partie, particulièrement proche du cours, a permis aux candidats quelque peu fragiles, mais sérieux, de valoriser leurs connaissances.

De façon globale, le jury tient à encourager les candidats à ne pas négliger les analyses dimensionnelles au cours de leur formation : cette approche, réalisée proprement, leur sera précieuse pour éprouver la véracité de leurs raisonnements et vérifier l'homogénéité de leurs expressions littérales. Dans la même veine, il n'est pas admissible, pour un candidat à l'entrée en grande école d'ingénieur, d'omettre régulièrement les unités lors de ses calculs et d'avoir des difficultés dans les conversions lorsqu'une unité particulière est demandée.

Cette année, une uniformisation des consignes quant à la présentation a amené le jury à mettre quelques malus : leur proportion n'excède pas quelques pour cent, mais permet une clarification quant à la politique adoptée. En effet, il nous paraît essentiel de rappeler que la démarche de l'ingénieur se fait en deux temps : comprendre, se faire comprendre. Si la compréhension du texte est souvent acquise, la démarche consistant à se faire comprendre est encore, pour certains, difficile. Nous rappelons à ce titre que si le « blanco » est interdit, les couleurs ne le sont pas, ainsi que les encres effaçables, ni d'ailleurs que les traits propres suite à une fausse piste : il n'est pas répréhensible de partir sur une fausse piste, mais cela ne doit jamais conduire à des gribouillis innombrables !

I Détection du signal de fluorescence de molécules individuelles à température ambiante

I.A – Objectif de microscope et microscopie classique

Q1. Cette question est globalement bien réussie, mais demande à l'étudiant d'aller plus loin qu'une simple paraphrase mentionnant l'« accommodation », terme faisant partie de la question.

Q2. Cette question doit faire apparaître une cohérence claire avec la première question : cela n'est malheureusement pas toujours le cas. Le jury est particulièrement surpris qu'une majorité de candidats ne poursuive pas ses rayons au-delà du plan focal objet de l'oculaire : les rayons sont déviés lors du passage dans la lentille et non lors du passage dans les plans focaux.

Q3. Si plusieurs méthodes sont envisageables afin de répondre à cette question, l'utilisation judicieuse du dessin réalisé dans la question précédente permet une résolution rapide et efficace. Le jury regrette toutefois la négligence de certains candidats qui semblent juger superflus les indices associés aux lentilles : ils sont en fait indispensables !

Q4. Cette question, dans le droit fil de la précédente, n'offrait pas de difficulté particulière, si ce n'est celle de la rigueur scripturale.

Q5. La notion de latitude de mise au point est compliquée pour la majorité des étudiants et la moitié d'entre eux laisse de côté cette question. Seule une infime partie a obtenu ici la totalité des points attribués.

I.B – Observation des sillages

Q6 et Q7. Ces questions faisaient appel aux mêmes compétences d'optique géométrique que la **Q2**, mais ont été souvent moins bien traitées. Une construction claire des images B' et C' est attendue. Trouver B' hors du plan de l'image A' , ou C' hors de l'axe optique, peut révéler des incompréhensions. Toutefois, les rédactions qui relèvent une maladresse de tracé et précisent les corrections à apporter sont traitées avec mansuétude (il est difficile de refaire le dessin en raturant). Le traitement complet de ces questions implique le tracé des faisceaux, donc de leurs rayons extrêmes, comme le suggérait le faisceau issu du point A indiqué par l'énoncé. Peu de candidats ont fourni une réponse complète.

Q8. Ici, le jury attend que le candidat fasse un lien explicite entre cette question et les deux précédentes : certains l'ont fait brillamment, mais ils sont peu nombreux.

Q9. Cette question, d'apparence tout à fait anodine, est fondamentale pour bien appréhender la suite, et particulièrement la question ouverte : la notion de construction « point par point » est une notion abordée par les étudiants lorsqu'ils se penchent sur l'approche documentaire relative aux microscopes à effet tunnel.

I.C – Séparation de la lumière de fluorescence de la lumière diffuse

Q10. Cette question ne présente aucune difficulté particulière, mais le jury ne peut accepter une réponse sans justification.

Q11. Une analyse simple de la figure 2 permet de répondre à cette question. Divers types de filtres sont acceptés, si tant est que leur comportement est clairement différent pour la lumière laser et pour celle du signal de fluorescence.

I.D – Émission de la lumière de fluorescence par un fluorophore

Q12 et Q13. Non seulement la première de ces questions n'offre aucune difficulté particulière à qui sait lire avec attention les données fournies, mais la seconde vient corroborer ce qui est initialement avancé.

Q14. Avec cette question, le niveau d'analyse du candidat doit s'élever pour répondre convenablement. En effet, un bon observateur remarquera qu'entre les figures a et b, certaines tâches ont disparu, attestant de l'arrêt de la fluorescence entre l'enregistrement de ces deux images. Il pourra aussi remarquer qu'une tâche (en haut à droite de la figure b) a été tronquée, manifestant l'arrêt brutal de la fluorescence lors de l'enregistrement de l'image b. C'est ici que l'on comprend mieux l'intérêt de la question 9. Si le jury n'a pas trouvé beaucoup de bonnes réponses, il a toutefois été agréablement surpris par l'excellence de certaines analyses.

Q15 et Q16. La difficulté de ces questions est essentiellement calculatoire. Le jury attend toutefois au préalable la traduction claire et simple du caractère « stationnaire ». Il aimerait que le candidat mentionne plus souvent les niveaux P_1 et P_2 pour étayer son propos souvent très flou.

Q17. Une bonne lecture de l'énoncé permettait d'évoquer la photostabilité, ou l'augmentation du bruit sans augmentation du signal : les deux arguments étaient acceptés.

Q18. Une simple application numérique est attendue ici, en notant toutefois l'importance de l'unité et en rappelant que si la fréquence d'un signal périodique s'exprime en Hz, celle d'un signal aléatoire s'exprime en s^{-1} .

Q19. Dans cette question, le candidat est guidé et celui qui sait s'appuyer sur ce qui précède aboutit aisément à la forme attendue.

Q20. Cette question n'appelle pas à des développements complexes, mais à une clarification de l'unité $L \cdot cm^{-1}$ qui vient naturellement à l'esprit. Dès lors, les candidats rigoureux ont su donner immédiatement la réponse idoine, alors que d'autres se sont malencontreusement embrouillés entre le symbole « L » et la dimension « L ». Le jury se permet de faire remarquer au candidat que la lettre « σ » peut avantageusement faire penser à une surface. Malheureusement, certains candidats l'identifient à une charge surfacique. Il semble alors naturel, lorsque l'application numérique est effectuée, de faire le lien avec la dimension de la molécule. Une comparaison avec une grandeur ayant une autre unité (par exemple la charge de l'électron) n'a évidemment aucun sens.

Q21. Cette question, fort intéressante, peut être abordée avec plusieurs niveaux de lecture différents. Si le calcul de I_s est facilité par l'indication de l'unité (pas toujours respectée), la comparaison avec le laser He-Ne requiert un commentaire faisant appel à la réflexion du candidat quant à la capacité que l'on a à focaliser un laser. Une fois cette difficulté conceptuelle franchie, l'application numérique aboutit à un résultat dont l'ordre de grandeur vient confirmer l'intuition. Une valeur manifestement fausse doit susciter le questionnement du candidat. Le jury tient à souligner à ce titre que la comparaison avec le laser He-Ne nécessite d'avoir une idée de la section d'un faisceau laser, illustrant l'importance des travaux pratiques, non décorrélés des cours.

I.E – Excitation laser

Q22. La notion d'ouverture numérique n'est pas toujours bien appréhendée par le candidat, mais si elle l'est, la question devient très abordable et les données de l'énoncé permettent de se rassurer quant à la valeur effectivement calculée. Peu de candidats ont exploité la fonction gaussienne fournie pour déterminer ω_r et ainsi en déduire ON.

Q23 et Q24. Ces questions ne nécessitent pas de calculs particulièrement développés. Le jury s'attache plus à la cohérence et la clarté du propos (mentionner qu'une puissance correspond à une intensité multipliée par une surface ne lui paraît pas pertinent si la surface n'est pas spécifiée) qu'à la valeur des résultats, les différentes méthodes pouvant conduire à des résultats divers. Une confusion est régulièrement relevée entre section du laser et section efficace.

Q25. Si, dans les dernières questions, le candidat pouvait se sentir un peu étranger aux grandeurs qui lui étaient demandées, il a dans cette question l'occasion de se retrouver en terrain de connaissance, avec le calcul d'une concentration ! Mais il est évident qu'il n'a pas coutume de s'y prendre de la sorte en comptant le nombres d'entités sur une image.

I.F – Rapport signal sur bruit

Q26. Cette question simple n'appelle aucun développement particulier : il suffit de traduire en équation ce qui est donné dans l'énoncé. Une majorité de candidats l'ayant abordée l'a fait correctement.

Q27. Cette question est annoncée comme une question ouverte, et assurément, elle l'est ! Manifestement, elle a fait peur aux candidats qui, dans leur grande majorité, l'ont ignorée. Et pourtant, le jury tient à faire part de sa grande mansuétude face à des réponses cohérentes, et non forcément justes, lors d'une telle question. Afin d'être le plus en accord possible avec le programme, nous avons tenu à noter cette question par compétences et avons commencé par privilégier la formalisation de la démarche envisagée par le candidat. Cette démarche d'appropriation semble essentielle pour un futur ingénieur qui devra faire siennes les problématiques auxquelles il sera confronté. L'analyse, puis la réalisation, peuvent révéler

plusieurs méthodes, mais ne sont parachevées que si elles s'accompagnent de la démarche de validation : le candidat est alors amené à réfléchir à la pertinence de son modèle, voire aux insuffisances lui ayant interdit d'aller au bout. Le jury remercie particulièrement les candidats ayant mené une démarche de grande qualité : ils se sont alors vus attribuer l'ensemble des points.

Q28 et Q29. Ces deux questions sont simplement une application de la question **Q26**. On imagine aisément qu'elles peuvent être le début d'une longue analyse, mais cela dépasserait largement le cadre d'une épreuve de quatre heures.

II. Analyse de la lumière de fluorescence

Q30 et Q31. Si la première question ne réclame aucun développement et ne pose pas de difficultés particulières à la majorité des candidats, la seconde met en exergue toute la difficulté liée aux questions sous la forme « montrer que... » Dès lors, le candidat ne peut se contenter de recopier la solution, puisqu'elle lui est fournie, mais doit se demander pourquoi il est possible de l'écrire. Nous déplorons toutefois quelques erreurs sur les indices, qui traduisent parfois une incompréhension de leur signification.

Q32. Cette question non plus ne présente pas de difficulté particulière, notons toutefois des erreurs dans les coefficients des développements limités pour certains. Si le jury se doit de les sanctionner ici, il ne répercute pas l'erreur sur les questions suivantes si le raisonnement s'avère correct.

Q33 et Q34. Ces questions, liées, sont globalement assez bien traitées et apportent la satisfaction au candidat de retrouver une question bien connue.

Q35. Si l'expression de la valeur moyenne demandée est bien nulle, mentionner l'importance de l'équiprobabilité paraît indispensable.

Q36 et Q37. Ici, plusieurs niveaux de réponse sont possibles. Une approche en ordres de grandeur est acceptée, mais une approche plus fine est valorisée, conduisant l'une et l'autre à un résultat proche, à un facteur 2 près.

III. Exaltation du signal par un substrat métallique présentant une rugosité

III.A – Dipôle induit dans une nanoparticule métallique sphérique de taille 10 nm

Q38. Le jury constate avec satisfaction que la polarisabilité est connue par la grande majorité des candidats, en revanche il attire leur attention sur les termes « préciser, en la justifiant » qui n'ont pas la même signification que « quelle est la dimension » de la **Q20**. Ici, une démonstration claire est attendue ! Elle n'est pas univoque et la variété des choix est apprécié, mais une réponse non justifiée est inacceptable.

Q39. Cette question permet de bien prendre la mesure de l'« exaltation » mentionnée dans le titre. Malheureusement, ce titre de paragraphe n'est entré en résonance avec la question que dans bien peu de raisonnements. Le jury se désole de voir régulièrement des rapports de vecteurs ici, ainsi que des conclusions hâtives résultant d'une confusion entre α_1 et α_2 . Il invite par conséquent les candidats à lire attentivement l'énoncé.

III.B – Modèle de Drude pour les électrons métalliques de la nanoparticule

Q40 et Q41. Ces questions de cours sont reconnues comme telles par un bon nombre de candidats et donnent lieu à l'attribution de beaucoup de points. Toutefois, le jury déplore la négligence de certains candidats quant à l'écriture des vecteurs, qui se retrouvent régulièrement identifiés à des scalaires.

Q42. Cette question, d'apparence simple, nécessite toutefois un soin particulier que le jury se doit d'expliquer. En premier lieu, il paraît important de rappeler qu'une grandeur physique est toujours considérée grande ou petite par rapport à une autre, ainsi ici τ se devait d'être comparé à $1/\omega$. En second lien, deviner que la puissance moyenne cédée par le champ est nulle est tout à fait louable, mais insuffisant

pour l'obtention de la totalité des points : en expliquer la raison est ostensiblement attendu ! Le jury relève des confusions trop fréquentes entre grandeurs quadratiques réelles, produit de représentations complexes, valeurs moyennes, pouvant déboucher sur un facteur dépourvu de sens comme $\exp(2j\omega t)$ ou une expression incorrecte comme $\langle P \rangle = \operatorname{Re}(\vec{j} \cdot \vec{E}^*)$.

Q43 et Q44. Ces questions ne nécessitent qu'un peu de techniques calculatoires, mais si la première est régulièrement bien traitée par les candidats, la seconde est plus compliquée, alors qu'elle ne fait appel à aucune compétence supplémentaire et conduit à la pulsation résonante.

Conclusion

À l'issue de ce tour d'horizon, il paraît essentiel au jury de renouveler ses remerciements chaleureux aux collègues qui ont su s'adapter aux cours des deux années passées aux côtés des candidats et qui ont su montrer la force émanant des classes préparatoires. Cette force ne saurait être sans les candidats eux-mêmes, qui ont fait preuve d'une résilience hors du commun. Alors que nous aurions pu craindre un amoindrissement des connaissances, nous avons pu constater chez la majorité des candidats des bonnes copies, tant sur le fond que sur la forme.

Aux futurs candidats qui liront ce rapport, le jury ne peut que conseiller de profiter pleinement de l'enseignement qui leur est dispensé dès leur entrée en classes préparatoires. Ce sujet illustre, comme beaucoup d'autres, l'importance de maîtriser l'ensemble du programme y compris celui de première année.

Nous rappelons qu'une maîtrise sur le fond doit naturellement être accompagnée d'une maîtrise sur la forme, posant ainsi les prémisses de ce que sera leur travail d'ingénieur et leur rôle dans la société. À cette fin, nous demandons aux candidats d'avoir le souci constant d'être compris, grâce à un langage clair, des dessins explicites et légendés, des résultats mise en évidence, ainsi qu'une prise de recul, indispensable. Trouver un résultat notoirement faux peut arriver à chacun, ne pas s'en rendre compte est beaucoup plus gênant, essayer de le cacher par quelque subterfuge est pire que tout ! Des moyens sont donnés pour éviter certaines erreurs, analyse dimensionnelle, calculs en ordre de grandeurs, il est toujours intéressant de s'en saisir.

Enfin, le jury conseille aux candidats de ne pas se détourner des questions ouvertes : elles sont là pour mettre en valeur leur raisonnement, leurs initiatives et sont un marqueur puissant leur offrant la possibilité de se transcender.

Laissons la conclusion à Louis Pasteur : « Le charme de nos études, l'enchantement de la science, consiste en ce que, partout et toujours, nous pouvons donner la justification de nos principes et la preuve de nos découvertes ».