

Physique 2

Présentation du sujet

Le titre de l'épreuve — « *Du neuf dans les sillages* » — est emprunté à celui d'une publication de 2013 dans la revue *Reflets de la Physique* par deux chercheurs, Marc Rabaud et Frédéric Moisy, dont le laboratoire se situe à quelques encablures de CentraleSupélec.

Ainsi, après une large contextualisation, le corps du sujet est logiquement accompagné de deux annexes : une première annexe de 3 pages correspondant à un très large extrait de l'article en question, suivie d'une seconde, intitulée « Imagerie satellitaire », reprenant les données techniques fournies par Astrium pour ses satellites Spot 6 et Spot 7.

Un tel sujet, subdivisé en trois parties, présente l'avantage d'aborder plusieurs aspects du programme, de première comme de seconde année : mécanique des fluides, optique géométrique et ondulatoire, physique des ondes, aussi bien acoustiques que de surface. Il nécessite une lecture attentive des documents fournis.

Son atout majeur est de montrer aux candidats que des problèmes observés et étudiés depuis des siècles font encore l'objet d'études scientifiques poussées et pourront être observés par bon nombres de candidats au cours de leurs vacances bien méritées !

Comme pour l'épreuve de physique 1, il fait appel à l'esprit de synthèse des candidats, qui devaient être en mesure d'extraire la substantifique moelle des documents fournis, tout en s'appuyant sur les savoirs et savoir-faire acquis au cours des deux années de classe préparatoire.

Analyse globale des résultats

Ce sujet, qui s'appuie sur une publication récente, nécessite de la part des candidats un esprit de synthèse afin de savoir extraire les données essentielles des deux annexes et d'en comprendre le sens. Nous nous réjouissons que la majorité des candidats aient su y trouver l'essentiel.

De nombreuses questions font appel à des analyses dimensionnelles, ou demandent des ordres de grandeur. Le jury s'est rendu compte que, pour bien des candidats, il est difficile de faire la différence entre un ordre de grandeur et une application numérique. Évidemment, ceci a occasionné des pertes de points préjudiciables, alors qu'il eût été si simple de répondre à la question posée, en y proposant une réponse présentant le nombre de chiffres significatifs idoine.

Si les trois parties sont équilibrées du point de vue de la répartition des points, force est de constater que la première a été mieux traitée que la seconde (à l'exception de l'optique géométrique qui semble être un lointain souvenir pour certains), elle-même plus complète que la troisième. Mais le jury a aussi constaté que cette épreuve a su répondre à sa fonction : celle de classer les candidats, avec une grande diversité au niveau des résultats.

Le jury ne saurait trop insister sur la force d'un schéma : dans bien des situations, et à fortiori en optique géométrique, les candidats qui parviennent le mieux à répondre sont ceux qui savent s'appuyer sur un schéma. Qu'ils soient remerciés pour ce souci de clarification, qui devrait être un réflexe pour chacun.

Les candidats le savent, les sujets fournissent certains résultats intermédiaires afin que chacun puisse, malgré ses éventuelles difficultés sur certaines questions, repartir sur des bases saines. Le jury a été déçu de voir des candidats se comporter comme s'ils avaient obtenu la forme demandée, alors que leur raisonnement ne pouvait y aboutir. Il est d'autant plus reconnaissant vis à vis des candidats honnêtes qui ont su s'interroger sur leur résultat différent de celui attendu : leur démarche se voit régulièrement récompensée.

Enfin, comment analyser les résultats de cette année sans mentionner l'immense courage dont chaque candidat a fait preuve en restant mobilisé près de deux mois de plus que prévu en raison de la pandémie de la covid-19, le jury félicite chacun des candidats pour la ténacité dont il a su faire preuve.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

I Analyse des données de sillages

I.A – Généralités

Q1. Le principal problème, ici, a été un problème d'appropriation : il suffisait d'identifier la vitesse des ondes à l'aide de l'annexe, alors que certains candidats, toutefois peu nombreux, ont essayé d'évaluer la vitesse du bateau.

Q2. Si cette question est majoritairement bien traitée, rappelons que l'utilisation de la conservation de l'énergie mécanique est la méthode la plus efficace. Le jury remercie les candidats qui ont su citer le théorème utilisé en précisant les hypothèses associées.

Q3. Le nombre de Reynolds est quasiment toujours évoqué conformément au contenu du programme. Encore faut-il définir convenablement les grandeurs utilisées : les confusions entre viscosité dynamique et cinématique sont fréquentes. Certaines copies donnent une définition claire du rapport utilisé, d'autres se perdent en évocations imprécises ; ainsi nous retrouvons régulièrement des comparaisons de grandeurs non homogènes comme une force et une accélération ou une confusion entre les effets que ce nombre de Reynolds permet de comparer et la conséquence sur le type d'écoulement.

I.B – Observation des sillages

Q4. Cette question est la seule « question ouverte », identifiée par une barre verticale.

Étant placée en début de sujet, elle a été davantage traitée que les questions ouvertes proposées dans les sujets des années précédentes. Une longueur de 18 à 20 m paraît acceptable sur la figure. Annoncer 3, voire 4 chiffres significatifs paraît abusif. Une incertitude basée sur l'évaluation simple de l'erreur visuelle et en lecture sur la règle doit suffire, encore faut-il que les chiffres significatifs de L et de l'incertitude affichée soient cohérents. Beaucoup de candidats éludent la détermination de l'angle de sillage, un peu inférieur à 20° , parfois aussi celle de la vitesse du bateau. À contrario, certains perdent beaucoup de temps sur des calculs d'incertitude non demandés, sur α et sur U .

Le jury a souvent relevé de longues phrases inutiles, là où un simple tableau aurait été tellement plus efficace.

Notons toutefois que cette question pouvait donner un résultat erroné en utilisant la valeur de l'accélération de la pesanteur donnée par l'énoncé, dans laquelle une virgule a été omise. Si l'immense majorité des candidats ne s'est pas laissée troubler par cette valeur, le jury a fait preuve de bienveillance envers ceux qui se sont laissés abuser par cette erreur. Le jury a également été attentifs en Q15, où l'erreur pouvait être filée.

Quoi qu'il en soit, le jury invite vraiment les candidats à être attentifs à la valeur qu'ils obtiennent : certaines copies proposent une longueur de bateau accompagnée d'une incertitude de 600 m ! Même si le stress est à son comble et le pétrole encore abondant, on ne peut imaginer une telle incertitude, fût-il un « super-tanker ».

Q5. Le nombre de Froude doit être donné en cohérence avec les chiffres significatifs de la vitesse et de la longueur du bateau. Un rapide rapprochement avec la courbe de l'annexe permet de se rassurer quant

au résultat. Quelques candidats inversent bizarrement le raisonnement, et déduisent l'angle de sillage de la valeur de Fr et du graphe, ce n'est pas ce qui est attendu.

I.C – Capillarité

Q6. Sachant que cette notion est essentiellement abordée sous l'aspect expérimental mais que figure dans le programme la capacité exigible « Mesurer un coefficient de tension superficielle », le jury été sensible aux candidats qui ont su partir de la relation connue pour nous présenter l'unité demandée. Nous notons quelques confusions entre γ et η .

Q7. Lorsque la question précédente est bien traitée, alors la construction de We se fait le plus souvent proprement. Bien évidemment, le jury ne peut accepter un résultat qui ne serait accompagné d'aucune justification, et simplement vérifier que ce nombre est sans dimension ne peut suffire.

Q8. L'application numérique conforte le bon sens : la mécanique du navire dépend peu des phénomènes de tension superficielle.

I.D – Force de traînée de vague

Q9. Le jury ne peut se contenter, dans une telle question, d'« énergie potentielle » : il est indispensable de préciser à quoi elle se rapporte, « de pesanteur », comme « de gravitation » était accepté.

Q10. Cette question a régulièrement conduit à de longs développements pas toujours exacts. Une construction d'un terme « mgz » semblait pourtant accessible, sans confondre largeur, hauteur et longueur de la vague, mais surtout en n'omettant pas une partie de la question : il était demandée une énergie « par unité de longueur ».

Q11 à Q13. Ces questions ne nécessitaient pas de longs développements et ont été majoritairement bien réussies. Le jury s'est attaché au caractère logique des questions, sans appliquer une « double peine » aux candidats qui, s'étant trompés à la question Q10, n'obtenaient pas une expression correcte par la suite. En revanche, la démarche devait être explicite. « En déduire » paraît tout de même suffisamment explicite pour ne pas proposer au correcteur une force de traînée sortie de nulle part.

Q14. Trouver une puissance du bateau inférieure à celle fournie aux vagues devait à minima interpeler le candidat. Une marge de fonctionnement constituait un résultat raisonnable, à commenter en conséquence.

I.E – Imagerie satellitaire

Q15. La définition du référentiel (autre que terrestre) était attendue. Si ce cas particulier de la loi de Kepler est souvent bien retrouvé, des erreurs sont souvent intervenues au moment d'identifier le champ de pesanteur (pas à la hauteur du satellite), et la période obtenue en a souffert. Dans quelques cas extrêmes, les candidats ne semblent pas s'émouvoir d'un résultat totalement incompatible avec les données relatives aux satellites d'observation.

Q16. Un dessin permet de comprendre ce que le candidat avance, le correcteur peut alors s'adapter à l'interprétation de l'angle proposé, mais évidemment ne peut se contenter d'une valeur numérique sans la moindre justification.

Q17. Très rarement correctement traitée, cette conjugaison objet réel — image réelle par une lentille convergente est pourtant basique. Par ailleurs, insistons sur le fait que faire de l'optique géométrique sans le moindre dessin est aberrant.

Q18. Simple formule d'ordre de grandeur pour la diffraction par une ouverture. Il faut définir les éléments contenus dans la formule proposée, surtout si les notations diffèrent de celles de l'énoncé. Encore une fois, un ordre de grandeur suffisait, mais il était important de ne pas se tromper de formule. Pour cela, une rapide analyse dimensionnelle peut être salvatrice : une ouverture angulaire est sans unité !

Q19. Si cette discussion ne présentait, à priori, aucune difficulté majeure, nous avons conscience que la définition de l'énoncé était ambiguë. Dans un tel contexte, le jury a privilégié la démarche au résultat.

Q20. Si la tâche de diffraction est un peu plus grande que les pixels, un commentaire adéquat s'impose sur la résolution effective du capteur.

Q21. Pour les commentaires du rapport, notons que quelques (rares) candidats ne font pas de différence entre résolution et nombre de pixels et donc répondent à la question par un nombre de pixels.

II. Modèle hydrodynamique des ondes de surface

II.A – Champ des vitesses

Q22. La loi de la statique du fluide pesant est généralement bien établie, si ce n'est la confusion récurrente entre P et p_0 .

Notons qu'avec cette question s'ouvre une partie qui nécessite une vigilance particulière pour ne pas écrire qu'un scalaire est égal à un vecteur. Si le jury est conscient qu'il arrive à tous d'oublier une flèche dans une démonstration, il demande aux candidats d'être vigilants à ce que leurs résultats ne soient pas entachés de telles erreurs.

Q23. L'expression du champ de pression est également bien établie. Quelques candidats oublient une constante d'intégration, pourtant explicitement nommée dans le texte, ou trouvent une pression qui diminue avec la profondeur !

Q24. L'élimination des termes d'ordre 2 est parfois bien expliquée, mais ce n'est pas une règle générale malheureusement. Le signe disparaît régulièrement devant le gradient.

Q25. Le critère « linéarité » était attendu, si toutefois l'équation précédente était bien linéaire ! Si tel n'est pas le cas, il est légitime que le correcteur se demande ce que signifie « linéaire » pour le candidat.

Q26. Ici, la vitesse cesse parfois d'être vectorielle, ce qui n'empêche pourtant pas ensuite de calculer son rotationnel ! Notons toutefois, qu'ici comme dans la suite, savoir manipuler les opérateurs permet une efficacité vraiment appréciable : certains candidats se sont perdus dans des projections inutiles.

Q27. Le choix du signe dans le gradient est laissé à l'appréciation des candidats, qui devront se rendre compte d'une éventuelle difficulté pour répondre à la question 35, dont le résultat sous-entendait le choix $\vec{v} = \text{grad } \phi$.

Q28. Le critère « incompressible » est attendu et permet une solution immédiate.

Q29. L'électrostatique, la diffusion thermique ou celle de particules, constituaient des exemples possibles. Encore fallait-il préciser « en l'absence de source » et, dans les deux derniers cas suscités, « en régime stationnaire ». Nous avons pu relever, de façon heureusement anecdotique, la mention « équation de d'Alembert en régime permanent ».

Q30. Si cette question est traitée le plus souvent correctement, il est essentiel de ne pas confondre vitesse et vitesse verticale.

Q31. La plupart des réponses sont correctes, mais certains ont confondu $\overline{\text{grad } \phi}$ et ϕ . Notons toutefois de regrettables confusions entre « borné » et « continu », et entre la vitesse d'une onde acoustique et celle d'une onde lumineuse.

Q32. La séparation des variables, la justification d'une valeur constante, puis du signe de cette constante, doivent être présentées avec rigueur. On ne peut se contenter de partir de la forme donnée. Évidemment, la forme adoptée permet de s'affranchir rapidement du temps dans cette question, même si le jury a relevé quelques cas prenant le laplacien pour un opérateur spatio-temporel ! Notons que le jury s'est adapté au

choix de la constante et que si elle était prise égale à k , il attendait une racine dans les expressions des fonctions.

Q33 et Q34. La notation complexe permet d'identifier plus aisément la présence de deux ondes progressives, en tout cas pas celle d'une onde stationnaire pour les vagues qui se propagent. Il semblerait que bon nombre de candidats jugent que la somme de deux ondes progressives conduit inexorablement à une onde stationnaire ! De très rares candidats pensent à souligner que ces ondes sinusoïdales ne sont pas planes et le jury a apprécié les trop rares candidats qui, pour illustrer leurs propos, prenaient le temps de faire un schéma représentant l'allure des vagues à différentes profondeurs.

II.B – Relation de dispersion

Q35. Si le premier point est souvent bien traité, la suite des raisonnements est beaucoup plus aléatoire, et l'on a vu trop souvent dériver la variable z par rapport au temps au lieu de poser les conditions aux limites avec méthode.

Q36. Trop souvent, la relation de dispersion proposée dépend encore de z , alors que l'énoncé spécifie bien que l'on travaille à la surface.

Q37. Si les relations définissant les vitesses de phase et groupe sont majoritairement connues, leur signification est très souvent méconnue, en particulier en ce qui concerne la vitesse de phase.

Q38 à Q40. Ces questions, peu abordées, révélaient toutefois l'étendue de l'hypothèse « profondeur infinie » : quelques centimètres font l'affaire, ce qui ne devrait pas noyer un candidat !

III. Sillages en V

III.A – Cas des ondes acoustiques

Q41. La majorité des candidats ayant abordé cette question a su évoquer la compressibilité, mais d'autres hypothèses ont été émises, évoquant le poids, le caractère parfait, irrationnel...

Q42. Question généralement bien traitée. Notons cependant la tendance, pour certains candidats, à utiliser une hypothèse mise explicitement en défaut à la ligne au-dessus ! Les correcteurs sont naturellement attentifs aux dérivées droites ou partielles, aux grandeurs scalaires et vectorielles, et aimeraient distinguer P de ρ .

Q43 et Q44. Un soin particulier est attendu dans la présentation des perturbations du milieu, et la linéarisation des trois équations utiles. Cette approche est souvent bien maîtrisée par les candidats. Les hypothèses de l'énoncé permettent de travailler avantageusement avec des scalaires. Ceux qui conservent les opérateurs vectoriels associent régulièrement $\overrightarrow{\text{grad}}(\text{div } \vec{A})$ à $\Delta \vec{A}$ en oubliant le $\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A})$.

Évidemment, la réponse à la question Q44 pouvait logiquement se trouver en Q43.

Q45. De nombreux candidats traitent de façon erronée la notion de dispersion, et la relation de dispersion apparaît souvent dans le désordre.

Q46 à Q49. Ces questions forment un ensemble qui se doit d'être cohérent, or les schémas sont souvent incohérents et ne mettent même pas en évidence le sens de l'avion. Quelques copies sont au contraire très claires, y compris sur l'interprétation graphique de l'effet Doppler et du cône de Mach (qu'il ne faut pas traiter dans l'approximation des petits angles). Le jury ne saurait trop insister sur le terme « en déduire » par lequel commence la question Q47 : elle appelle à un lien avec la question précédente, lien trop souvent éludé.

III.B – Les ondes de surface

Q50. Confusion fréquente et surprenante entre la valeur de la fonction d'onde et sa phase.

Q51. Il est possible que la simplicité de la question en ait dérouté certains. Une simple relation de Chasles permettait d'établir la relation demandée, et la dépendance en t suffisait à conclure sur le caractère stationnaire.

Q52. Lorsque cette question était abordée, elle était majoritairement réussie.

Q53. Lorsqu'il est demandé de retrouver des relations, il est fort tentant de se débrouiller pour les obtenir, envers et contre tout. D'abord assez arides, ces relations étaient en fait assez aisées à obtenir, dès lors que l'on percevait clairement que l'identification des longueurs d'onde devait s'effectuer dans l'axe du sillage (angle nul), puis pour un angle θ .

Q54 et Q55. Préciser les longueurs des côtés du triangle sur un schéma clair permet d'identifier le caractère droit de l'un des angles, cela évite des calculs superflus. Évidemment, il est plus que maladroit de choisir $OM = ON$.

Q56. Peu de candidats ont clairement établi la relation $v_g = \frac{1}{2}v_\varphi$, alors qu'il suffisait pour cela de différentier la relation de dispersion. Le jury s'inquiète que certains trouvent des relations grossièrement inhomogènes sans s'alerter.

Q57 à Q59. La relation précédente, reportée en termes de longueurs parcourues sur le dessin, assure les relations attendues, avec l'aide des relations trigonométriques données dans le formulaire.

Q60 et Q61. La relation $y = f(x)$ permet enfin de retrouver l'angle du sillage, proche de 20° . Mais annoncer que l'on retrouve une valeur, alors qu'on ne fait que la recopier à la suite de raisonnements notoirement faux est du plus mauvais effet.

Conclusion

Ne nous y trompons pas !

Si ce rapport développe les divers travers rencontrés, il est du devoir du jury de souligner la performance réalisée par beaucoup de candidats. La plupart des copies sont correctes, certaines sont de très belle facture, d'autres d'une qualité déplorable ! Le jury conseille donc aux futurs candidats de s'habituer à rédiger proprement et clairement tout au long de leur préparation. Si la copie n'a pas lieu d'être un chef d'œuvre artistique, il va de soi qu'elle doit être lisible sans utiliser une loupe, et que s'il est humain de se tromper, un trait pour barrer suffit là où certains, de rage (?), en mettent 50. *Encadrer ou souligner les résultats est fortement recommandé et apprécié des correcteurs.*

Fort du constat que les questions de première année sont régulièrement plus mal traitées que celles de seconde année, le jury veut rappeler avec force l'importance des deux années dans la formation. C'est sur ce socle commun que pourra s'appuyer le futur élève ingénieur.

Le jury tient à attirer l'attention des candidats sur les quatre points suivants.

- L'importance des mots de l'énoncé : par exemple, « en déduire » ne signifie pas qu'il est possible de fournir un résultat « hors sol » sans faire référence à ce qui précède.
- L'importance de ses propres mots : par exemple, il n'est pas équivalent de parler d'électromagnétisme ou d'électrostatique.
- Les schémas, constituent le meilleur moyen d'être efficace dans une explication, il est donc essentiel de s'entraîner à en utiliser dès que possible.
- Qu'il s'agisse de mots ou de schémas, la communication est essentielle, et si elle est plus volontiers associée à l'oral, elle est tout aussi fondamentale à l'écrit. Si un ingénieur doit comprendre ce qu'il

fait, il doit trouver tous les moyens pour se faire comprendre : cette démarche est indispensable lors des épreuves de concours. Expliquer sa démarche est absolument fondamental.

Enfin, que l'on soit ingénieur, chercheur ou enseignant, on sait fort bien que le champ des savoirs est infini, et que nul ne peut se targuer d'avancer sans erreur. Aussi, le jury invite les candidats à prendre les moyens de limiter ces dernières par un regard critique sur ce qu'ils écrivent (le sujet de cette année s'y prêtait particulièrement) : ordre de grandeur, homogénéité, culture scientifique basique, et si d'aventure ils ont le moyen, par exemple par un résultat intermédiaire, de découvrir qu'ils ont fait une erreur, qu'ils n'hésitent pas, bien humblement, à reconnaître qu'ils s'ont fourvoyés : le jury, loin de leur en tenir rigueur, appréciera particulièrement leur démarche.

Notons qu'après les bulles de savon de l'an passé, les sillages cette année nous invitent à voir la puissance de la science et le fruit des réflexions de scientifiques dans notre quotidien. Nous reconnaissons à travers la production de chacun des candidats le travail de nos collègues et le jury se permet, pour les remercier de tout ce qu'il ont pu donner, particulièrement cette année, d'emprunter une phrase à Einstein : « l'étudiant n'est pas un conteneur que vous devez remplir, mais une torche que vous devez allumer ».