

4. Physique 1

4.1. Introduction

Ce sujet, intitulé « Vitesses mécaniques et célérités des ondes », présente une approche originale et pédagogique de la distinction fondamentale entre vitesses mécaniques et célérités d'ondes en traitant aussi de leur lien. Structuré en deux grandes parties A et B indépendantes, contenant elles-mêmes plusieurs sous-parties indépendantes, il explore cette dualité conceptuelle à travers des expériences historiques (comme l'approche de Rømer pour mesurer la célérité de la lumière à partir des occultations d'Io illustrant parfaitement l'effet Doppler) et contemporaines remarquables (comme le *chant des dunes*, phénomène naturel fascinant étudié avec une approche moderne basée sur des travaux de recherche récents).

Le sujet, en apparence court (35 questions « seulement »), comporte les particularités suivantes :

- peu de questions de cours ou d'applications directes ;
- des questions explicitement ouvertes au nombre de 6 (**Q6**, **Q7**, **Q12**, **Q14**, **Q26** et **Q32**) et d'autres qu'on peut qualifier « d'ouvertes » également (comme **Q5**). C'est plus que lors des sessions précédentes ;
- des questions très calculatoires (**Q13**, **Q24**) ;
- aucune question relative ni aux évaluations d'incertitudes ni aux compétences numériques du programme de PCSI-PC (ou si ce n'est pour faire une régression linéaire à la calculatrice pour valider un modèle comme en **Q26**).

Bien que présentant un niveau de difficulté soutenu et nécessitant une autonomie importante de la part des candidats, l'équilibre entre questions guidées et questions ouvertes permet une évaluation différenciée, valorisant à autant la maîtrise technique que la capacité d'initiative. Les applications choisies (mesure historique de c_0 , relativité générale, acoustique naturelle) témoignent d'une volonté d'ancrer la physique dans ses enjeux historiques et contemporains.

Aucune connaissance hors programme n'est nécessaire pour traiter la totalité du sujet. La propagation d'ondes vue en PCSI de façon générale, puis le cas particulier des ondes acoustiques traité en PC, la mécanique classique de PCSI, quelques rudiments d'optique ondulatoire sur les interférences à deux ondes et de mécanique des fluides de PC doivent être maîtrisés pour réussir cette épreuve.

4.2. Analyse globale des résultats

Le sujet a été abordé en totalité par peu de candidats. La seule partie plutôt bien traitée par les candidats est la sous-partie III de la partie A sur la propagation de la lumière dans un fluide en mouvement (optique interférentielle et mécanique du point).

L'expérience de correction met en évidence de nombreuses difficultés concernant davantage la méthodologie, la rédaction et les calculs que la compréhension des concepts physiques, ce qui souligne l'importance de ces compétences transversales dans la formation.

La forme est trop souvent peu soignée (nombreuses ratures ou fautes de français, écriture difficile à lire, résultats mal mis en valeur), ce qui entraîne des malus qui pourraient facilement être évités : cette année, 17,4 % des copies ont été « malussées », un résultat en nette hausse par rapport aux sessions précédentes.

Un trop petit nombre de candidats est capable de mener rigoureusement une démonstration de A à Z sans oublier une hypothèse, une flèche sur un vecteur, etc.

Trop nombreux sont encore les candidats qui ne répondent que partiellement aux questions, notamment lorsque celles-ci contiennent plusieurs sous-questions.

Concernant l'utilisation des outils mathématiques, le jury a constaté :

- beaucoup de confusions entre vecteur, norme et projection ;
- des erreurs d'applications numériques qui auraient dû être décelées avec un minimum de bon sens.

Les questions ouvertes n'ont pas connu un grand succès comme le montre le tableau ci-dessous :

Question ouverte	Q6	Q7	Q12	Q14	Q26	Q32
Pourcentage de candidats ayant obtenu au moins un point	15,9 %	4,4 %	12,5 %	6,8 %	5,7 %	4,3 %

4.3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

4.3.1. Mécanique et célérité de la lumière

La mesure de la célérité de la lumière par Rømer

Q1 Beaucoup de candidats établissent directement la formule de l'effet Doppler sans établir la relation entre d_{k+1} , d_k , c , t'_{k+1} , t'_k et T , qui était pourtant demandée. Montrer que la réception est périodique demande de montrer que $t'_{k+1} - t'_k$ est indépendant de k , ce qui n'a presque jamais été montré.

Q2 Dans le cas général, la relation de Chasles n'est pas valable avec les normes des vecteurs. Il est surprenant de voir des copies réussir à démontrer l'expression de d_{k+1} dans le cas d'un mouvement à deux dimensions (**Q2**), mais qui ont échoué à la démontrer à une dimension (**Q1**), alors qu'il suffirait de reprendre la démonstration de la question **Q2** en posant $v_y = 0$ (donc $v = v_x$)

Q3 Les développements limités méritent d'être conduits proprement, même en physique.

Q4 La distance Soleil-Jupiter est définie entre leurs centres respectifs. Par ailleurs, la troisième loi de Kepler doit être exprimée en fonction des notations du problème, ou alors le candidat doit préciser les notations introduites. Cette question a été globalement bien traitée.

Q5 Cette question, difficile mais pouvant rapporter beaucoup de points, a permis à certains candidats de se démarquer.

Q6 La démarche demandée nécessite une approche géométrique à laquelle trop peu de candidats ont pensé. La valeur numérique attendue $c_0 \approx 2,1 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a rarement été obtenue.

Q7 Un manque de vigilance sur le sens physique des ordres de grandeur a grandement pénalisé les candidats : il n'est pas normal de trouver une masse de Jupiter plus grande que celle du Soleil.

Les perturbations séculaires de l'orbite de Mercure

La trajectoire de Mercure selon les lois de Kepler

Q8 L'énoncé demandait e et p en fonction des rayons extrémaux. Il est à noter que p est homogène à une longueur.

Q9 La démonstration de la conservation de la constante des aires manque souvent de rigueur. Trop d'égalités entre scalaires et vecteurs ont été relevées. La positivité de cette constante était ici uniquement due aux conventions d'orientation choisies sur le schéma de l'énoncé : trop de candidats confondent L , composante selon (Oz) du moment cinétique (dont le signe dépend de l'orientation de l'axe) avec la norme du vecteur moment cinétique (bien entendu toujours positive).

Q11 L'intégration de la relation à une constante près était simple, mais montrer que cette constante était nécessairement selon l'axe (Oy) demandait quelques justifications qui n'ont été que trop rarement observées.

Correction relativiste pour la trajectoire de Mercure

Cette partie, difficile et calculatoire, n'a pas été réussie.

Q14 Question ouverte valorisant l'initiative aboutissant à $\gamma = 3$ (valeur exacte de la relativité générale).

Propagation de la lumière dans un fluide en mouvement

L'entraînement des ondes lumineuses dans l'eau

Cette sous-partie a été bien traitée.

Q15 De nouveau, le sujet était précis dans les variables en fonction desquelles le résultat à démontrer était attendu : il convenait de respecter la question posée. Par ailleurs, le lien entre différence de temps de propagation et déphasage entre ondes lumineuses ne devrait pas poser de problèmes en fin de CPGE.

Q16 $\Delta N = 0$ ne signifie pas qu'il n'y a pas d'interférence.

Q17 Le lien entre ΔN et $\Delta\varphi$ devait être établi pour pouvoir démontrer le résultat sur L_{min} , qui par ailleurs était fourni par l'énoncé : on attendait donc des calculs rigoureux.

Le modèle classique des vitesses d'entraînement

Q18 La loi de composition des vitesses doit être énoncée avec des notations claires, ou alors celles-ci doivent être explicitées par le candidat.

Le modèle relativiste pour les ondes lumineuses dans l'eau

Q19 De nombreuses erreurs d'homogénéité ont été commises au moment d'inverser la formule fournie par l'énoncé : la vérification était pourtant aisée, toutes les variables étant homogènes à des vitesses.

Q20 La mention « avec $v \ll c_0$ » devait inciter le candidat à effectuer un développement limité en $\frac{v}{c_0}$ des formules obtenues pour c_1 et c_2 . Malheureusement, le jury a constaté dans cette question un manque de rigueur flagrant dans les calculs de type développement limité.

4.3.2. Mécanique et célérité des ondes acoustiques

Le chant des dunes

Q22 Le sujet demandant simplement de rappeler l'expression de la fréquence fondamentale, les candidats qui ont présenté une (parfois longue) démonstration de ce résultat ont perdu du temps.

Q23 L'établissement d'une formule d'énergie potentielle correcte n'est le fruit que d'un schéma clair : de nombreux candidats auraient mieux fait de s'appuyer dessus.

Q24 L'utilisation d'un théorème énergétique était attendue, mais la conservation de l'énergie mécanique devait être motivée par l'absence de frottements pour que les points soient attribués.

Propagation des ondes acoustiques et entraînement par l'eau

Q27 L'écriture de la relation de la statique des fluides avec des signes corrects a trop souvent mis les candidats en difficulté.

Propagation et atténuation des ondes acoustiques

Q28 L'expression de la compressibilité d'un fluide implique une dérivée partielle et non pas droite. La linéarisation de cette relation suscite des démonstrations parfois trop peu rigoureuses.

Q29 La manipulation de la notation complexe pour passer des équations différentielles aux relations entre amplitudes complexes demande un peu de rigueur, notamment en terme de discernement entre les scalaires et les vecteurs. On rappelle notamment que \vec{k}_0 ne demande pas de points entre les lettres, mais $\vec{k} \cdot \vec{v}$ si (cette expression étant liée au passage en notation complexe de $\text{div } \vec{v}$).

Q30 Une question relativement classique demandant de lier une intensité sonore aux amplitudes des différentes grandeurs perturbées. Les candidats doivent rester lucides sur les ordres de grandeur attendus : une amplitude de pression de 10^{84} Pa ne devrait pas être écrite sans recul.

Q31 Trop peu de candidats reconnaissent dans cette écriture un passe-bas. De même, la valeur de ω_c (voisine de $10^{12} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$) devait inciter les candidats maîtrisant leurs ordres de grandeur à affirmer que la viscosité est systématiquement négligeable pour les ondes acoustiques.

Entraînement de l'onde acoustique par un courant d'ensemble

Q33 Dans un sujet dont l'introduction incite à différencier célérité d'une onde et vitesse(s), il est dommage que les candidats utilisent la célérité des ondes sonores pour donner un ordre de grandeur de la vitesse de la houle. La simplification des opérateurs vectoriels agissant sur \vec{v} a donné naissance à un florilège de réponses, dont beaucoup semblent oublier les relations d'action des différents opérateurs vectoriels : $\vec{\text{grad}}$ agit sur un scalaire et donne un vecteur, div agit sur un vecteur et donne un scalaire, $\vec{v} \cdot \vec{\text{grad}}$ agit sur un vecteur et donne un vecteur.

Q34 et Q35 Ces questions ont été peu traitées. Peu de candidats ont abouti à une loi de composition des célérités : $c'_a = c_a + v_0 \cos(\theta)$.

Ainsi, pour tous les candidats, nous nous permettons quelques conseils.

Il est utile de parcourir l'intégralité du sujet lors d'une première lecture rapide : cela permet de s'imprégner du sujet et de repérer les questions faciles. Ensuite, il faut toujours s'assurer de bien avoir compris l'énoncé d'une question, quitte à le relire plusieurs fois. Des efforts simples de rigueur et de précision amélioreraient nettement les résultats :

- référencer correctement les questions traitées ;
- utiliser les notations de l'énoncé et/ou définir des grandeurs non déjà définies dans l'énoncé ;
- préciser davantage les hypothèses lorsqu'elles sont nécessaires pour développer les calculs ;
- faire précisément le lien entre les résultats et les phénomènes physiques étudiés lorsqu'un commentaire est demandé ;
- justifier avec précision les simplifications de certains termes dans les équations étudiées ;
- ne pas négliger les applications numériques.

Le jury rappelle qu'il n'est pas nécessaire de traiter l'intégralité du sujet pour avoir une bonne note. Il vaut mieux bien répondre aux questions que l'on sait visiblement faire – qui comportent souvent des sous-questions trop souvent oubliées – en justifiant bien, en étant honnête dans les calculs, en vérifiant l'homogénéité de résultats littéraux simples et enfin en concluant très explicitement sans ambiguïté pour être sûr de glaner tous les points prévus.

Il ne faut vraiment pas hésiter à lire l'ensemble des rapports du jury et les critères de malus de présentation des copies.

4.4. Conclusion

Bien que ce rapport mentionne principalement les écueils à éviter, nous voulons souligner combien nous avons été satisfaits devant certaines copies, excellentes, aussi bien sur le fond que sur la forme. Que tous leurs auteurs soient remerciés pour avoir donné le meilleur d'eux-mêmes durant cette épreuve et pour nous avoir fait lire de très belles compositions. Nul doute qu'ils sauront relever les défis technologiques du XXI^e siècle après leurs études au sein des grandes écoles et qu'ils auront à cœur de transmettre le fruit de leurs travaux.