

Composition de Physique B, Filière PC (XEULS)

Propagation d'une onde acoustique dans un milieu non homogène

1 Remarques générales

Le sujet de physique B 2024 de la filière PC portait sur l'étude de la propagation d'une onde sonore dans un fluide stratifié en densité. La composition était organisée en deux grandes parties : la première posait les bases de l'acoustique linéaire, la seconde partie abordant plus spécifiquement la propagation de rayons acoustiques dans un milieu stratifié, avec comme application l'utilisation d'un sonar dans l'océan, notamment pour la détection d'un sous-marin.

Le sujet, composé d'une trentaine de questions, a été amplement abordé par la majorité des candidats. Il s'est néanmoins révélé sélectif, discriminant les préparateurs coupables de trop nombreuses imprécisions et qui s'accumulaient petit à petit. La moyenne finale des copies sur les 1464 candidats présents (en nombre stable d'une année sur l'autre) est de 10.02, avec un écart-type de 3.48, la répartition des notes N des candidats par quintile étant indiquée dans le tableau qui suit, la dernière ligne étant le pourcentage correspondant :

$0 \leq N < 4$	$4 \leq N < 8$	$8 \leq N < 12$	$12 \leq N < 16$	$16 \leq N \leq 20$
55	331	687	307	84
3.8%	22.6%	47%	21%	5.6%

Avant de rentrer dans le détail des questions, nous souhaitons rappeler quelques éléments simples, malheureusement valables d'une année sur l'autre, et ce quelle que soit la nature ou la difficulté de l'épreuve :

- Une copie propre aide à maintenir l'attention du correcteur, notamment pour que celui-ci soit sûr que le candidat a vraiment établi le résultat attendu à la question. C'est un point qui échappe – encore ! – à beaucoup de préparateurs.
- Les résultats de chaque question, une fois réellement démontrés, gagnent toujours à être mis en valeur en les encadrant, au moins partiellement, en particulier en ce qui concerne les applications numériques.
- L'utilisation de symboles mathématiques dans une composition de physique requiert du soin, et du sens : que de confusion sur $\ll$ vs $\gg$ – beaucoup plus

petit vs beaucoup plus grand – avons-nous observée cette année en particulier. Une interversion dans l'ordre traduit souvent une incompréhension du phénomène étudié. Quant à l'emploi du symbole de l'équivalence, $\Leftrightarrow$, dont usent et abusent les candidats, il est généralement non seulement inutile en physique – on cherche la plupart du temps à seulement démontrer une implication/une formule – mais en plus très fréquemment faux en toute rigueur logique.

2 Remarques particulières

Q1: Cette question était une question de cours, pour laquelle les réponses ont été très variées, et rarement complètement satisfaisantes. Il était crucial de mentionner le libre parcours moyen comme borne inférieure de l'échelle de longueur d'une particule fluide.

Q2: Cette question a été plutôt bien traitée dans l'ensemble : un système sous-déterminé et la présence de non-linéarités rendent difficile la résolution.

Q3 – Q6: La sélection entre les candidats s'est faite sur la clarté de la présentation des arguments de la linéarisation. On note que la re-dérivation de l'approximation acoustique ne peut pas être recevable, puisque c'est précisément l'objet de la question. L'énoncé suggérait l'utilisation de grandeurs A_s , mais au final peu de candidats ont suivi ce conseil. Rappelons aussi aux trop nombreux candidats qui ont commis cette confusion que la notation c employée pour la célérité de l'onde n'implique pas que le fluide soit relativiste !

Q7: Toute la subtilité de la question résidait dans l'identification de l'équilibre hydrostatique à l'ordre zéro. Une fois identifié cet ordre zéro, il n'y avait pas de problème particulier. Très peu de candidats ont traité correctement cette question.

Q8: Dès que les fréquences acoustiques sont supérieures au mHz, on trouve qu'on peut négliger la gravité. Dans le commentaire qualitatif attendu, il ne suffisait pas de dire que ces fréquences sont faibles : elles le sont par rapport au spectre audible pour un humain, c.-à-d. entre 20 Hz et 20 kHz. Quantitativement, pour cette question, il était important de retrouver le facteur 5 entre l'eau et l'air. Pour le calcul des fréquences, nous notons des confusions avec le facteur 2π qui n'ont pas été sanctionnées tant que l'ordre de grandeur de la réponse était correct.

Q9-Q12: Ces questions ont été globalement bien traitées. On note cependant une grande variabilité dans les applications numériques. Nous avons toléré un (bon) ordre de grandeur par rapport aux valeurs attendues à condition que le sens du signe $\ll$ ou $\gg$ soit correct. Pour la partie sur la diffusion,

nous attendions une comparaison du temps caractéristique correspondant à l'homogénéisation du champ de température (qui présente une variabilité spatiale à l'échelle de λ) sous l'effet de la diffusion thermique et de la période temporelle du forçage dû à l'onde. Il aurait été bienvenu que la similarité des résultats $D, \eta \ll c^2/\omega$ s'accompagne d'un commentaire.

Q13: La discussion devait porter sur les équations qui conduisent à l'équation de d'Alembert, et non pas sur l'équation de d'Alembert elle-même. Cette question a été mal comprise par les candidats.

Q14: La discussion sur la valeur de γ a été souvent mal traitée. Un certain nombre de candidats ont voulu retrouver sa valeur en connaissant la vitesse du son, ce qui n'était pas demandé. Le point important ici est l'application du théorème d'équipartition, et l'identification correcte des degrés de liberté concernés. On rappelle que le caractère mono ou di-atomique ("atomicité") d'un gaz ne dépend pas de la température (tout du moins dans une gamme raisonnable...), ce qui devrait interpeller les candidats qui se servent de cet argument pour répondre à la question.

Q15: Beaucoup trop de candidats ont invoqué la loi de Snell-Descartes pour justifier leur résultat, alors que justement il s'agissait ici de la retrouver dans le contexte acoustique. Les discussions en terme de "temps de parcours" ou à partir d'expression de la forme $A \propto \exp(i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM}))$ étaient en revanche toutes deux recevables.

Q16: Cette question aurait dû éveiller la méfiance des candidats qui avaient invoqué la loi de Snell-Descartes à la réponse précédente.

Q17: La réponse à cette question est *explicitement* donnée dans l'énoncé, comme introduction de la partie II définissant le cadre de l'acoustique géométrique.

Q18: Si beaucoup de candidats parviennent à représenter des trajectoires envisageables, rarissimes ont été les discussions complètes et correctes. Il est toujours aussi surprenant de constater année après année les difficultés qu'éprouvent les candidats à faire le lien entre certaines propriétés mathématiques d'une fonction (qui très certainement ne poseraient pas de problème si énoncées dans un autre contexte), et la représentation graphique associée. Ici, que ce soit dans le cas discrétisé ou continu, seule la concavité de la courbe (et seulement elle) est imposée, mais cela ne préjuge en rien ni n'impose l'existence éventuelle d'une asymptote ou d'une réflexion totale.

Q19: Tous les candidats qui ont abordé cette question ont donné, sauf étourderie manifeste, la bonne réponse.

Q20: Les arguments dimensionnels ne “suffisent” pas, et peu de candidats définissent une longueur caractéristique ℓ en considérant le gradient de $c(z)$, et plus précisément $\ell^{-1} = |\partial_z \ln c|$. La réponse à cette question venait ensuite de la comparaison entre ℓ et la longueur d’onde λ , avec le même argument qu’à la question Q17.

Q21: Cette question n’a pas posé de difficulté particulière, le point clé étant l’exploitation de la relation établie en Q19 et un peu de trigonométrie élémentaire. Bien évidemment, comme le résultat est donné dans l’énoncé, un argument du type “il est évident que l’on obtient ...” ne saurait être recevable, et les erreurs “miraculeuses” (un cosinus devenant une tangente par exemple) sont également sanctionnées.

Q22: À l’inverse de la question précédente, les correcteurs ont été très surpris de constater que l’intégration de cette équation différentielle certes non linéaire mais seulement du premier ordre pose des problèmes insurmontables à tant de candidats. Il serait souhaitable de rappeler à cette occasion que malgré un biais éducatif évident, toutes les équations différentielles de physique ne débouchent pas sur des solutions sinusoïdales ou exponentielles.

Q23-25: Les difficultés rencontrées à la question Q22 ont très souvent rendu caduques ces questions. Malgré tout, plusieurs candidats ont reconnu dans l’expression de $W(X)$ donnée à la Q23 l’équation d’une parabole, ce qui a conduit certains d’entre eux à évoquer (avec raison) le concept de “parabole de sécurité” qui apparaît dans le contexte de tirs balistiques. En revanche, le tracé des trajectoires, même pour ces derniers candidats, est très généralement faux, avec une confusion regrettable entre l’ensemble des trajectoires paraboliques, et son enveloppe (qui correspond à la parabole de sécurité).

Q26: Les candidats qui ont reconnu la similitude avec des problématiques de type “mirage optique” ont donné en général des réponses pertinentes. À noter qu’il n’est pas aussi immédiat de conclure quoi que ce soit concernant les temps d’arrivée des signaux en fonction des *deux* trajectoires suivies.

Q27: L’aspect parabolique des trajectoires a permis à de nombreux candidats d’évoquer le mouvement balistique dans un champ de gravité uniforme, mais cette analogie aurait dû également leur permettre de corriger le tracé des trajectoires effectué à la question Q24.

Q28: Le jury a constaté que pour beaucoup de candidats, le fait d’avoir des trajectoires non-rectilignes remettait en question, à tort, le “principe du retour inverse” du son (dans cette approche géométrique), et les réelles difficultés (la direction “réelle” et pas seulement acoustique de l’obstacle, et l’existence d’une région “aveugle”) ont rarement été données.

Q29: On attend bien entendu, dans cette question, une exploitation quantitative du profil présenté à la figure 4, avec notamment une estimation du gradient de célérité dans le chenal de surface, et une application numérique pour étayer la réponse.

Q30-31: Même si, quantitativement, il est discutable de pousser l'analogie aussi loin que celle correspondant à un guide d'onde comme avec une fibre optique à gradient d'indice, ces deux questions qualitatives ont permis d'identifier parmi les candidats ceux qui, malgré les éventuelles erreurs liées aux précédentes questions ou à la fatigue de l'épreuve, conservaient une compréhension de la physique abordée dans ce sujet. Une illustration quantitative, obtenue par intégration numérique de l'équation des rayons acoustiques avec le profil de célérité correspondant à la figure 4 est proposée ci-après.

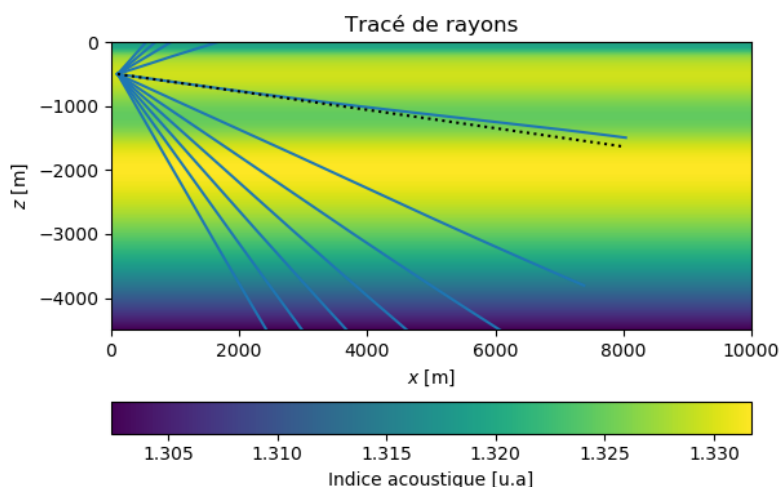


Figure 1: Tracé de rayons par intégration numérique. Pour l'un des rayons, on a également représenté (en pointillé) la droite correspondant aux mêmes conditions initiales, afin d'illustrer l'effet de courbure relativement modéré correspondant au profil considéré.

Q32: Nous avons été très agréablement surpris par toutes les connaissances des étudiants sur les sous-marins, et l'inventivité déployée pour assurer leur furtivité. Cela aurait été encore mieux si toutes ces propositions avaient été étayées sur les résultats des questions qui précédaient.

3 Conclusion

En conclusion, la composition de Physique B de cette année traitait de la propagation d'une onde acoustique dans un fluide non homogène stratifié en densité. Le sujet était somme toute assez classique, sans être exagérément long ou difficile, et il n'aurait pas dû présenter de difficultés particulières pour les préparateurs maîtrisant suffisamment les différents aspects du programme mis en jeu. Néanmoins, il a permis une bonne sélectivité des candidats.