

Rapport de Physique et Sciences de l'Ingénieur, Benoît MOSSER, correcteur.

Ce problème aborde le principe et quelques caractéristiques instrumentales de Virgo, expérience très ambitieuse conçue pour déceler les ondes gravitationnelles générées par certaines sources astrophysiques. Le signal physique lié à l'onde gravitationnelle se traduit par une perturbation de la longueur des bras de l'interféromètre Virgo. Le niveau de perturbation, extrêmement faible, nécessite de spécifier un seuil de sensibilité très performant pour cet instrument.

La première partie décrit le principe instrumental et définit la sensibilité de l'interféromètre pour la détection des ondes gravitationnelles. On mesure alors le caractère extrêmement ambitieux de cette expérience. Les compétences nécessaires pour aborder cette partie relèvent de l'optique physique essentiellement. La deuxième partie, mêlant des questions de physique et de sciences de l'ingénieur, s'intéresse à l'atténuation du bruit de fond sismique : la sensibilité requise nécessite une réduction du bruit sismique d'un facteur 10^{10} . Diverses configurations sont proposées et analysées pour filtrer les effets indésirables dans la gamme de fréquence du signal physique attendu, et le sujet aborde l'introduction graduelle des différents éléments nécessaires aux conditions de fonctionnement optimales. La troisième partie présente un contenu également mêlé de physique et de sciences de l'ingénieur. Elle concerne le contrôle global de l'instrument, mettant en œuvre divers signaux d'erreur et asservissements, reliant des paramètres cruciaux de ce système complexe : fréquence du laser, position des pièces optiques... L'énoncé montre comment élaborer un tel signal d'erreur, et analyse un asservissement en position des miroirs.

Le problème est apparu long, sans question vraiment difficile dans les 2 premières parties, mais de difficulté soutenue. La succession de questions de physique et de sciences de l'ingénieur a pratiquement assuré un équilibre entre les deux domaines. Les meilleures notes ont été obtenues par des candidats très performants dans les deux matières, sans défavoriser certains candidats visiblement plus talentueux dans l'un ou l'autre domaine.

Les notes des candidats français se répartissent selon le tableau suivant :

$0 \leq N < 4$	48	7,1%
$4 \leq N < 8$	210	31,3%
$8 \leq N < 12$	248	36,9%
$12 \leq N < 16$	111	16,5%
$16 \leq N \leq 20$	55	8,2%
Total	672	100 %
Nombre de copies : 672		
Note moyenne 9,44		
Écart-type : 4,13		

La très grande majorité des candidats ont traité le problème linéairement, et cela leur a été profitable. Trop de points ont été perdus à cause d'une rédaction trop lacunaire, oubliant le plus couramment de simplement annoncer le but d'un calcul, ou d'exploiter et commenter un résultat. Insistons une fois encore sur l'importance d'une syntaxe et d'une expression aisée : la bonne compréhension d'un problème scientifique en physique ou en sciences de l'ingénieur nécessite bien sur une pratique opérationnelle des outils mathématiques, physiques, mécaniques... mais avant tout une réflexion logique et une expression fluide.

Partie I

1) La notion de phénomène quasi-statique n'est globalement pas acquise. Par ailleurs, nulle copie n'a remarqué que, les ondes gravitationnelles et le faisceau laser se propageant l'un comme l'autre à la vitesse de la lumière, les deux conditions énoncées par cette question se traduisent en une seule contrainte.

2) Cette question très proche du cours a été plus ou moins bien traitée selon la compréhension des données de l'énoncé introduisant les coefficients de réflexion et transmission de la lame séparatrice.

3) Le résultat donné à cette question aurait dû permettre, le cas échéant, de corriger des erreurs à la question précédente.

4) Trop de copies ont présenté de trop longs calculs pour la plupart inutiles. Avec un terme infiniment petit de l'ordre de 10^{-21} , il est licite et judicieux de choisir une approche de type différentiel.

5) Les candidats se trompant à cette question n'avaient clairement pas leur place dans ce concours (environ 1 candidat sur 5).

6) Alors que l'application numérique met en évidence une très faible perturbation, cette question demande de commenter la valeur trouvée. Les commentaires ont très souvent été incongrus, même dans les bonnes copies, évoquant l'intérêt d'une petite valeur *négligeable*, alors qu'il est question d'un phénomène que l'on cherche à mesurer, et donc que l'on souhaite *décelable*.

7,8) Ces deux questions ont dérouté les candidats. Notons que, dans un tel cas, l'analyse dimensionnelle permet de vérifier qu'une expression n'est pas fautive.

9) La partie calculatoire de cette question a été relativement bien menée, même s'il est apparu qu'un nombre élevé de candidats reste incapable de bien gérer un rapport de type $\sin 2x / \sin x$. Comme précédemment, l'analyse des résultats reste globalement insatisfai-

sante, soit par incompréhension du résultat soit par incapacité à exprimer le résultat : les conditions de l'expérience conduisent à choisir comme point de fonctionnement une frange noire, toute perturbation, conduisant à un signal non nul, étant dans ce cas plus facile à détecter.

10, 11) Sans surprise à ce stade du problème, l'application numérique montre que les performances obtenues ne permettent pas encore d'atteindre la mesure envisagée.

12) Le résultat demandé pouvait être obtenu de diverses manières. Rappelons qu'il est toujours malvenu d'essayer de cacher une erreur de calcul dans une suite d'équations mal présentées.

13) L'énoncé comportait malheureusement une erreur, que la grande majorité des candidats a remarquée et corrigée. Le barème a tenu compte du malaise qu'auront pu ressentir certains candidats dans un tel cas. L'erreur n'avait aucune conséquence sur la suite du problème.

14) Cette question repose sur l'interprétation du terme $d\varphi/d\beta$ précédemment calculé et estimé pour 2 valeurs, dont le point de fonctionnement. Peu de candidats ont bien compris le principe mis en œuvre, conduisant à un très sensible allongement du chemin optique équivalent.

15) Les plus belles perles du problème ont été écrites ici, avec des interprétations très libres de la conservation de l'énergie, parfois touchantes mais bien moins efficaces que la solution physique. La configuration de l'interféromètre conduit à envoyer l'énergie incidente dans 2 directions : vers le capteur et vers la source. Lorsque l'énergie n'arrive pas au capteur, c'est qu'elle ne peut qu'être renvoyée vers la source.

Partie II

1) Cette question très proche du cours n'a pas posé de difficulté, sauf pour des copies vraiment très faibles.

2) Le formalisme de la fonction de transfert, bien acquis, a permis des calculs en accord avec la question précédente. On aurait apprécié que les candidats obtenant un résultat surprenant (le plus souvent $P(p) = 1$) puissent l'analyser comme tel et remonter à la cause d'erreur.

3) Près de la moitié des copies a gardé au poids une fonction de rappel, alors que clairement il tend à écarter le pendule inversé de sa position d'équilibre. Le couple Γ , explicitement présenté comme couple de rappel, n'a de loin pas toujours joué ce rôle.

4) L'application numérique n'a pas été bien exploitée : trouver une valeur de C négative, résultat en contradiction avec la signification de ce terme, ne doit pas laisser un candidat sans réaction.

5) Cette question rappelle les questions 1 et 3, mais cette fois avec une description du système tenant meilleur compte de sa complexité. Le taux de réussite reste assez faible (de l'ordre de $1/8$).

6) Si la partie calculatoire de cette question a été bien maîtrisée, les conséquences du résultat, lorsque ce dernier était juste, n'ont pas été bien analysées, alors même que l'énoncé annonce un comportement indésirable.

7) Cette question dépend intimement des résultats obtenus précédemment : le signal d'erreur délivré par un résultat certainement incorrect (typiquement : α dépendant de p) aurait du activer une recherche de la cause d'erreur.

8) Cette question a souvent été traitée beaucoup trop superficiellement, malgré 4 sous-questions explicitement posées. Ceci se solde par une perte de points pour les candidats se contentant d'une approche purement calculatoire oubliant toute analyse physique et mécanique. Le barème a pris grand soin à rééquilibrer cette tendance, avec de nombreux points accordés aux étudiants prenant la peine de réfléchir à la situation proposée.

9, 10) La question 9 introduit un terme intégrateur dont les avantages apparaissent à la question 10.

11) Cette question n'a été traitée que par une très petite fraction des étudiants (de l'ordre de $1/30$). Une raison à cela est clairement une difficulté à traduire dans la fonction de transfert le terme proportionnel proposé.

Partie III

1) Cette question a posé de nombreuses difficultés. Beaucoup d'étudiants ont tenté de plaquer un raisonnement visiblement dérivé d'une situation qui leur a semblé analogue, mais en fait inappropriée. Les meilleurs résultats sont dus aux étudiants capables de construire une phrase simple et juste montrant que le système proposé n'apporte aucune information utile : qu'elle que soit la différence de fréquence ($\omega_L - \omega_0$), le signal d'erreur présente le même signe, et il n'est donc pas possible de situer ω_L par rapport à ω_0 .

2) Cette question suppose le développement complet d'une différence au 2ème ordre. Ce n'est visiblement pas le formalisme du développement limité qui a posé problème, mais l'incompréhension du sens du calcul à mener.

- 3) Question bien traitée dans l'ensemble.
- 4) Ce n'est pas parce qu'un résultat est donné que l'on peut se permettre de ne pas développer les calculs en explicitant la démarche suivie : trop de copies, trop rapidement convaincues du résultat à trouver, n'ont pas présenté les bons arguments.
- 5) Là également, les points gagnés l'ont été lorsque le problème était bien analysé.
- 6) Cette question n'a été abordée que par 5 copies.
- 7) Beaucoup d'étudiants ont, à juste titre, repris le fil du problème à cette question. Un résultat juste nécessite, ici et comme d'habitude, de poser clairement les équations du mouvement ; dès lors, le résultat est simple à obtenir. Trop d'étudiants ont élaboré de longs calculs fastidieux et faux sur une analyse insuffisante.
- 8, 9) Ces questions relativement faciles ont très rarement été menées jusqu'à leur terme.
- 10) La marge de phase a été énoncée par 1 copie seulement. On comprend qu'à ce stade du problème, les candidats aient préféré traiter les questions suivantes, plus faciles. Néanmoins, de nombreuses copies ont présenté de façon trop confuse les marges de stabilité ; les meilleures réponses sont clairement celles s'appuyant sur un tracé clair des diagrammes de gain et de phase. Trop peu de copies ont rappelé que la marge de gain d'une fonction de transfert du 2ème ordre est infinie.
- 11, 12) Les diagrammes asymptotiques de Bode du gain et de la phase ont parfois été tracés (1 copie sur 20), mais avec des erreurs importantes obérant la suite dans plus de la moitié des copies.
- 13, 14) Ces questions plus faciles que les précédentes ont été abordées par environ 1/15 des étudiants, et la plupart du temps bien traitées.