

## Composition de Physique A, Filière PC (XE)

Le sujet, sans titre, comportait deux parties distinctes pouvant être traitées séparément, à savoir, un exercice portant sur le calcul du coefficient de réflexion complexe d'une onde lumineuse se réfléchissant sur un bloc de cuivre et un problème, traitant de la théorie et de la détection expérimentale des ondes gravitationnelles.

Il se composait d'un texte de 4 pages, incluant pour le problème, deux figures, tirées de deux articles scientifiques, parus en 2017. Les données numériques utiles pour mener à bien les applications numériques du problème sans calculatrice étaient fournies aux candidat(e)s en préambule de celui-ci. Les candidat(e)s devaient s'appuyer sur ces documents pour répondre à une série de 19 questions d'analyse et de compréhension. Aucune donnée n'était fournie aux candidat(e)s pour la résolution de l'exercice, qui se voulait volontairement très ouvert. A titre indicatif, en accord avec la consigne de l'énoncé conseillant aux candidat(e)s de ne pas passer plus de 30 % du temps à la résolution de l'exercice, les correcteurs ont décidé d'attribuer 25 % des points de l'épreuve à celui-ci.

Ce sujet permettait de tester les connaissances des candidat(e)s sur une partie importante du programme de physique des classes préparatoires. Il nécessitait une mise en pratique des notions acquises en première et deuxième années des classes préparatoires relatives à la mécanique du point, l'optique ondulatoire et l'électromagnétisme.

Le tableau ci-dessous résume la répartition des notes obtenues par les 1327 candidat(e)s ayant passé l'épreuve :

Tranche	Nombre de copies	pourcentage
$0 \leq N < 4$	58	4.37 %
$4 \leq N < 8$	454	34.21 %
$8 \leq N < 12$	555	41.82 %
$12 \leq N < 16$	223	16.80 %
$16 \leq N \leq 20$	37	2.79 %

Nombre total de copies	1327
Moyenne	9.12
Écart-type	3.22

Les notes des 1257 candidats français se répartissent selon le tableau suivant :

$0 \leq N < 4$	49	3,90 %
$4 \leq N < 8$	422	33,57 %
$8 \leq N < 12$	529	42,08 %
$12 \leq N < 16$	220	17,50 %
$16 \leq N \leq 20$	37	2,94 %
Total	1257	100 %
Nombre de candidats : 1257		
Note moyenne : 9,23		
Écart-type : 3,22		

## Remarques générales :

Comme chaque année, il nous semble important de rappeler quelques règles générales, qui bien qu'évidentes restent toujours méconnues de nombreux(ses) candidat(e)s :

- De trop nombreuses copies sont rédigées dans un langage très approximatif, indignes de futur(e)s ingénieur(e)s. De multiples erreurs grammaticales et orthographiques nuisent véritablement à la lecture et à la compréhension des explications données pour justifier un raisonnement ou un résultat. Elles affectent nécessairement l'évaluation globale de la copie.
- Nous encourageons les candidat(e)s à bien s'appliquer, c'est-à-dire ne pas négliger la forme et la tenue générale de leur copie et à produire une écriture déchiffrable.
- Nous incitons vivement les candidat(e)s à vérifier systématiquement l'homogénéité de leurs résultats. Une telle démarche permet souvent de s'affranchir d'erreurs stupides, comme par exemple des erreurs typographiques.
- Un résultat numérique est toujours considéré faux s'il est présenté sans unités ou avec des unités physiques inadéquates. Les candidat(e)s doivent également veiller à ce que le nombre de décimales significatives données soit en adéquation avec la précision des données numériques fournies par l'énoncé. Les résultats numériques présentés avec une puissance non entière ne sont pas considérés corrects.
- Des résultats obtenus sans aucune justification ne sont pas considérés valides. Il est essentiel de justifier les hypothèses faites et d'invoquer les principes appliqués lors d'un raisonnement. Il convient également de penser à définir de manière très explicite les variables introduites pour mener à bien un calcul. Nous encourageons les candidat(e)s à ne pas hésiter à s'aider de schémas explicatifs, à la condition que ceux-ci soient clairs et explicites.

- Nous conseillons aux candidat(e)s de ne pas négliger les applications numériques demandées car celles-ci constituent une part importante du nombre total de points attribués et donc de l'évaluation finale.

Nous rappelons enfin que les questions demandées ne sont pas un commentaire de texte et que les réponses ne doivent pas être une paraphrase de celui-ci. Pour chaque question, une réponse argumentée, souvent quantitative et s'appuyant toujours sur un raisonnement physique rigoureux est attendue.

## Commentaire détaillé de l'épreuve.

### Exercice

Cet exercice demandait d'établir l'expression du coefficient de réflexion complexe d'une onde lumineuse plane progressive se propageant dans le vide et se réfléchissant sur un bloc de cuivre, sous incidence normale et d'interpréter physiquement le résultat obtenu. L'absence de questions intermédiaires, guidant les candidat(e)s étape par étape vers le calcul final a fortement dérouté nombre d'entre eux. La grande diversité des réponses données témoigne du désarroi et du manque de recul de beaucoup de candidat(e)s. Ainsi, parmi les divers types de réponses données dans les copies, nous pouvons en distinguer quatre majeures, que nous citons dans l'ordre croissant de satisfaction :

- Le cuivre est considéré comme un conducteur parfait et le coefficient de réflexion donné vaut alors  $r = -1$ .
- le cuivre est considéré comme un matériau isotrope d'indice optique,  $n_{Cu}$ , dont l'expression n'est pas explicitée. En suivant cette approche, les candidat(e)s peuvent alors établir l'expression du coefficient de réflexion  $r = \frac{1-n_{Cu}}{1+n_{Cu}}$ . Dans leurs discussions, l'immense majorité de ces candidat(e)s considère uniquement le cas où  $n_{Cu}$  est un nombre réel positif ce qui n'a pas vraiment de sens lorsque la pulsation de l'onde est inférieure à la pulsation plasma du métal et se bornent alors à commenter le signe de  $r$  en fonction de celui de  $n_{Cu} - 1$ .
- Les équations de Maxwell dans le cuivre sont données et la relation de dispersion de l'onde dans ce matériau est établie, faisant apparaître explicitement la conductivité  $\gamma$  du cuivre. Beaucoup de ces candidat(e)s ne pensent pas à simplifier cette relation en négligeant le terme relatif aux courants de déplacement devant les autres termes, une approximation qui n'est valable que parce que l'onde est une onde lumineuse. Lorsque cette approximation est effectuée, les candidat(e)s sont alors en mesure de calculer le vecteur d'onde dans le cuivre et de montrer que l'onde dans celui-ci est évanescence.
- Un nombre restreint de candidat(e)s a pensé à établir l'expression de la conductivité complexe du cuivre par le modèle microscopique de *Drude* et à l'utiliser dans la relation

de dispersion. Cette expression permettait d'obtenir la valeur de la pulsation plasma et l'expression de l'indice complexe du matériau en fonction de la pulsation  $\omega$  de l'onde et donc d'obtenir *in fine* la valeur du coefficient de réflexion de l'onde en fonction de sa pulsation.

Certain(e)s candidat(e)s énoncent directement les expressions du coefficient de réflexion et de transmission en incidence normale en fonction des indices du vide et du cuivre, ou écrivent la relation de dispersion dans le cuivre en fonction de sa pulsation plasma, sans aucune justification. Pour ce type de réponse, donnée sans aucune justification ou démonstration, aucun point n'est bien sûr attribué. Un nombre très restreint de candidat(e)s démontre les relations de passage des champs électrique et magnétique à l'interface vide/cuivre. Nous avons été surpris de constater d'ailleurs que beaucoup de candidat(e)s utilisent la continuité de la composante normale du champ magnétique à la traversée de l'interface pour établir l'expression du coefficient,  $r$ , alors que l'onde incidente est sous incidence normale par rapport au bloc de cuivre. Nous encourageons vivement les candidat(e)s à toujours penser à vérifier la validité physique des équations établies. Ainsi, dans quelques-unes de copies, la relation de dispersion dans le cuivre à laquelle parviennent les candidat(e)s présente une erreur de signe et s'écrit:  $k^2 = -\frac{\omega^2}{c^2}(1 + i\frac{\gamma}{\epsilon_0\omega})$ . Un rapide coup d'oeil à cette relation aurait pourtant permis à ces candidat(e)s de constater que lorsque  $\gamma=0$ , la relation obtenue ne permet pas de retrouver la formule bien connue de la dispersion de l'onde dans le vide.

La plupart des candidat(e)s a considéré à juste titre le cas d'une onde plane progressive polarisée linéairement en s'aidant d'un schéma représentatif. Il convenait, en premier lieu, de donner les expressions des champ électriques, incident, réfléchis et transmis, d'introduire les coefficients  $r$  et  $t$  de réflexion et de transmission de l'onde incidente et d'établir à l'aide des relations de structure directement ou des équations de Maxwell, les expressions des champs magnétiques correspondants. Ces premières étapes, nécessaires à la résolution de l'exercice, ont été relativement bien comprises et traitées par l'immense majorité des candidat(e)s. Notons, cependant l'absence de rigueur de nombreux candidat(e)s qui ne précisent pas la signification physique des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  qu'ils introduisent et oublient pour certain(e)s d'entre eux de définir explicitement les coefficients  $r$  et  $t$ . L'expression des champs magnétiques est souvent donnée sans aucune justification physique. Dans quelques copies, nous avons été surpris de constater que le champ électrique, le champ magnétique et le vecteur d'onde de l'onde incidente ne forment pas un trièdre direct, en violation directe des relations de Maxwell dans un milieu isotrope homogène.

## Problème

1 Un nombre très important de candidat(e)s travaille dans le référentiel d'un des deux astres qu'il(elle)s considèrent à tort comme Galiléen. Le résultat qu'ils obtiennent en appliquant le principe de la dynamique pour la fréquence de rotation est alors dimensionnellement correct mais présente un préfacteur faux. Très peu de candidat(e)s, travaillant dans le référentiel du centre d'inertie, pensent à justifier que celui-ci est Galiléen. Quelques candidat(e)s utilisent

directement la troisième loi de Kepler, la plupart du temps de manière erronée.

**2** Question bien traitée par l'immense majorité des candidat(e)s. Certain(e)s, cependant, en faisant une analogie avec les ondes sonores écrivent à tort que celles-ci se propagent dans le vide.

**3** Un schéma explicatif permettait de répondre correctement et efficacement à cette question. Beaucoup de candidat(e)s, semblant avoir bien appréhendé le phénomène, ne répondent cependant pas rigoureusement à la question. Une réponse du type: '*Un point de la trajectoire circulaire voit passer les deux astres pendant une période  $T$  donc la fréquence de l'onde émise par les deux astres vaut  $\frac{2}{T}$* ' n'est pas suffisamment rigoureuse. Il convient en effet de préciser que tel est le cas parce que les deux astres sont identiques et diamétralement opposés. Beaucoup de réponses à la question sont laconiques et totalement farfelues. De telles réponses desservent toujours les candidat(e)s qui les produisent.

**4** L'immense majorité des candidat(e)s décrit correctement le fonctionnement d'un interféromètre de Michelson. Notons cependant que dans beaucoup de copies, par manque de rigueur, les schémas représentatifs présentent des faisceaux lumineux qui ne satisfont pas aux lois de Snell-Descartes. Très peu de candidat(e)s ont compris que dans le cas des ondes gravitationnelles, la modification du chemin optique est proportionnelle à la longueur des bras, ce qui rend nécessaire pour leur détection l'emploi de bras très longs.

**5** Cette question a été assez discriminante. Il fallait, pour y répondre, calculer l'énergie mécanique du système constitué des deux astres et non pas d'un seul, dans le référentiel d'inertie en supposant la trajectoire quasi-circulaire. Un nombre très restreint de candidat(e)s a su évaluer correctement l'énergie potentielle de ce système. Beaucoup d'autres ne prennent en compte qu'un seul des deux astres dans le calcul de l'énergie cinétique alors qu'il(elle)s évaluent correctement l'énergie potentielle des deux astres. Notons que dans beaucoup de copies, il est simplement indiqué que l'énergie mécanique,  $E_m$  varie comme  $\frac{1}{d}$  sans aucune précision sur son signe. Dans ce cas là, il est mathématiquement faux de dire que  $d$  diminue si  $E_m$  diminue.

**6** Le signe de  $K$  est dans l'immense majorité des copies bien justifié. La plupart des candidat(e)s a su intégrer correctement l'équation différentielle à variables séparées. Les erreurs les plus classiques observées ont été l'absence de constante d'intégration et un préfacteur faux devant le terme  $f^{\frac{8}{3}}$ . Dans beaucoup de copies, la représentation graphique de la fonction  $f$  est peu soignée, il n'est pas fait mention explicite de la divergence de cette fonction au temps fini,  $t_0$  où la collision entre les deux astres a lieu. Dans quelques copies, la fonction  $f$  est représentée pour les temps supérieurs à  $t_0$  alors que la fonction n'est pas définie dans cette région. Beaucoup de candidat(e)s font preuve de peu de rigueur, en confondant variation en loi de puissance et variation exponentielle.

**7** Question en général bien traitée par l'immense majorité des candidat(e)s l'ayant abordée dans la mesure où la plupart des candidat(e)s a obtenu à la question 1, une expression dimensionnellement correcte pour la fréquence de rotation des astres autour de leur centre d'inertie.

**8** Cette question a été assez discriminante. En effet, dans beaucoup de copies, la réponse se limite à remarquer qualitativement que la fréquence suit le même type de comportement temporel que l'expression théorique obtenue à la question 6: *'c'est une fonction croissante qui présente une asymptote verticale pour un temps donné'*. Quelques candidat(e)s ont compris qu'il fallait aller plus loin et vérifier expérimentalement que la valeur de l'exposant de la loi de puissance de  $f$  en fonction de  $t$ , était en adéquation avec la valeur  $\frac{8}{3}$  établie théoriquement à la question 6. Il était également possible, comme l'a remarqué un nombre important de candidat(e)s de vérifier expérimentalement que la dérivée  $\frac{df}{dt}$  variait comme  $f^{\frac{11}{3}}$ , en accord avec l'équation 1 de l'énoncé.

**9** Cette question nécessitant une analyse dimensionnelle a été relativement bien traitée.

**10** Pour répondre correctement à cette question, il convenait de déterminer expérimentalement une valeur du coefficient  $K$  et d'utiliser la relation obtenue à la question précédente, liant celui-ci à la masse,  $M$ , de l'astre, en supposant un facteur numérique de l'ordre de l'unité. Une valeur expérimentale de  $K$  pouvait être obtenue en procédant de deux manières distinctes. La première consistait à déterminer une valeur expérimentale de la dérivée  $\frac{df}{dt}$  en un point particulier de la courbe, puis à utiliser la relation (1) de l'énoncé. La seconde méthode possible consistait à utiliser directement la relation  $f \simeq (\frac{1}{-Kt})^{\frac{3}{8}}$ , obtenue à la question 6. Une discussion physique satisfaisante nécessitait de comparer la valeur obtenue pour  $M$  à l'ordre de grandeur de la masse de la Terre et/ou celle du Soleil.

**11** Cette question pourtant très simple a posé des difficultés à de nombreux(ses) candidat(e)s. Dans de nombreuses copies, la définition d'une valeur relative n'est pas connue. Certain(e)s candidat(e)s considèrent ainsi que le rapport  $\frac{v_g - c}{v_g + c}$  correspond à la différence relative des vitesses  $v_g$  et  $c$ . Beaucoup de candidat(e)s ayant mal lu l'énoncé de la question, ont calculé la vitesse  $v_g$  de l'onde et non pas sa différence relative avec  $c$ . D'autres ont calculé correctement la différence relative de vitesse mais lui ont attribué les dimensions d'une vitesse. Nous avons été désagréablement surpris de constater que certain(e)s candidat(e)s ne connaissent pas la définition exacte d'une année lumière.

**12** Il fallait pour répondre à cette question relativement simple, estimer dans un premier temps, la période,  $T$ , de l'amplitude sur une courte fenêtre temporelle, par exemple, sur l'intervalle  $[0.46 \text{ s}, 0.48 \text{ s}]$ , calculer la fréquence correspondante,  $f = \frac{1}{T}$ , et s'assurer que cette valeur était en accord avec celle de l'encadré donnant la fréquence en fonction du temps. Il convenait de réitérer dans un second temps, cette opération sur une autre fenêtre temporelle et de remarquer que la fréquence ainsi estimée augmentait avec le temps (les oscillations de l'amplitude devenant en fonction du temps de plus en plus resserrées). Les réponses à cette question ont été globalement satisfaisantes.

**13** Bien que cette question ne présentait pas de difficultés majeures, peu de réponses ont été satisfaisantes, notamment par manque de rigueur. Beaucoup de candidat(e)s se sont contenté(e)s de dire que la source était plus proche du détecteur  $L_1$  que du détecteur  $H_1$  sans donner aucune justification. Un grand nombre de copies considèrent par ailleurs à tort que les deux détecteurs et la source sont alignés.

**14** Peu de réponses satisfaisantes à cette question. La plupart des réponses argumentées se sont limitées au cas planaire sans fournir de schéma explicatif. La réponse attendue était qu'une mesure impliquant deux détecteurs permet simplement de conclure que la position de la source se trouve à l'intersection de deux sphères centrées respectivement sur chacun des deux détecteurs, soit un cercle. Une mesure avec un troisième détecteur permet de réduire le nombre de positions possibles de la source à deux points diamétralement opposés de ce cercle. Une levée de l'indétermination impose alors d'effectuer une mesure avec un quatrième détecteur. Beaucoup de réponses laconiques à la question se contentent simplement de mentionner le terme *triangulation* sans aucune explication du principe sous-jacent.

**15** La plupart des candidat(e)s ayant répondu à cette question s'est contenté(e) de remarquer que la fréquence de l'onde émise augmentait considérablement avec le temps ; puis qu'après un instant donné, correspondant à la fusion des deux astres, l'onde disparaissait (il est intéressant d'ailleurs de noter que pour beaucoup de candidat(e)s, la fréquence de l'onde devient nulle après la fusion des deux astres alors qu'il n'y a plus d'onde). Dans seulement quelques copies, l'analyse a été poussée plus en avant pour démontrer expérimentalement que la variation de fréquence de l'onde avec le temps suivait une loi de puissance, en accord avec les prédictions théoriques (equation 1 de l'énoncé ou relation établie à la question 6).

**16** Très peu de candidat(e)s ayant abordé cette question l'ont traitée correctement.

**17** Question abordée par beaucoup de candidat(e)s en survol. La plupart des réponses sont laconiques sans aucune justification ou alors peu rigoureuses dans la rédaction. Une réponse exacte nécessitait de déterminer d'abord expérimentalement  $\frac{df}{dt}$  pour chacune des deux courbes (en faisant attention de bien donner la valeur numérique avec les bonnes unités!) puis de comparer les deux valeurs obtenues ou alors de comparer sur un même intervalle de temps la variation de  $f$  pour chacune des deux courbes.

**18** Très peu de bonnes réponses à cette question. La majorité des candidat(e)s ayant abordé la question, a donné des réponses sous forme d'une formule présentant des incohérences d'unités, sans aucune explication, comme par exemple  $\frac{df}{dt} \ll 1$ .

**19** Question abordée par de très rares candidat(e)s dans la mesure où répondre correctement à cette question nécessitait d'avoir résolu préalablement les questions 6, 9 et 18 de l'énoncé.