

# Physique 2

## Présentation du sujet

Il s'agit d'une épreuve de 4h pour laquelle la calculatrice était autorisée.

Le sujet de cette épreuve portait sur l'évolution de la définition de deux unités : le kilogramme dans une première partie (**Q1 à Q20**) puis le kelvin dans une deuxième (**Q21 à Q43**).

Ces deux parties sont totalement indépendantes, et accompagnées d'un formulaire d'analyse vectorielle et des données numériques utiles.

## Partie I : redéfinition du kilogramme

Après deux questions plutôt qualitatives sur l'ancienne définition utilisant un étalon, le sujet décrit la balance de Kibble, puis celle de Watt ; avec des questions portant à la fois sur l'induction et sur la mécanique du point ; deux thèmes de première année.

L'utilisation de la balance en dynamique permet une question plus ouverte demandant aux candidats de décrire une méthode interférométrique pour mesurer une vitesse de déplacement.

Par la suite les questions **Q11 à Q17** s'intéressent à l'influence de la dilatation des spires sur les mesures et abordent plutôt la magnétostatique de première année.

Enfin les questions **Q18 à Q20** tournent autour de l'application des études précédentes à la redéfinition du kilogramme.

## Partie II : redéfinition du kelvin

Après deux questions de « culture générale », **Q23 à Q30** sont consacrées à l'établissement de l'équation de d'Alembert 1D et des expressions de la célérité et exploitent pleinement le cours de deuxième année sur les ondes et la mécanique des fluides.

**Q31 à Q39** permettent de passer aux ondes sphériques et aux modes propres associés en notation complexe.

Les quatre dernières questions enfin font le lien entre ces modes propres et la redéfinition du kelvin par le biais de la constante de Boltzmann.

## Analyse globale des résultats

Après une réunion de barème de l'ensemble du jury (14 correcteurs) où un premier jet de barème a été construit assez rapidement et de manière consensuelle ; la phase d'entente de 4h autour de 6 copies aléatoires a permis d'affiner le barème en précisant certains points.

Dans l'ensemble le jury a apprécié le sujet, dont le thème est intéressant et de longueur raisonnable. Il aborde des thèmes de 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> année par le biais de questions proches du cours et les développements permettent de départager efficacement les candidats.

La première partie, abordant des thèmes plus proches des programmes de première année a été globalement moins bien traitée que la deuxième, traitant de la propagation des ondes sonores.

Ce constat que les candidats semblent moins à l'aise et donnent des réponses souvent avec des manques de rigueur et de précision sur les thèmes de première année est récurrent ( $\vec{F} = I \vec{dl} \wedge \vec{B}$  en oubliant

la différentielle, confusions entre forces de Laplace et Lorentz, confusion f.é.m. et force...) et il convient d'encourager les étudiants à ne pas négliger les chapitres de 1<sup>re</sup> année.

Ceci dit, à la décharge des candidats, le jury a dans l'ensemble trouvé cette première partie (et notamment la définition des balances) un peu ambiguë sur certaines définitions, en particulier les notations ( $U$  et  $U'$  représentant des voltmètres et non des sources de tensions, résistance  $R'$  et rayon de la spire  $R$ , constante de Planck  $R$  à la **Q18**, définition algébrique de  $I...$ ) ; ce qui peut aussi expliquer les relatifs meilleurs résultats sur la 2<sup>e</sup> partie. Le jury a par conséquent fait preuve de plus de bienveillance eu égard à ces imprécisions, notamment sur certains signes. Une petite erreur d'énoncé (ou oubli) : « la balance est symétrique par rapport au plan ( $xCz$ ) » ; il fallait, pour appliquer le TMC à la **Q4**, savoir que la balance était symétrique par rapport à ( $yCz$ ).

Enfin, plusieurs questions s'enchaînent en utilisant les résultats précédents et pour éviter des doubles sanctions le jury s'est mis d'accord pour accorder des points si le résultat, faux, est néanmoins en accord avec le résultat de la question précédente. C'est le cas par exemple de l'expression de  $k_B$  de la **Q31** dépendant de la **Q29**, ou de la valeur de  $E$  à la **Q10** dépendant du résultat de **Q9**.

La question des chiffres significatifs a été discutée et tranchée depuis deux ans maintenant, ce que le jury apprécie dans l'ensemble, néanmoins il a regretté que sur une telle thématique la question de la précision des résultats numériques ne suscite pas plus de questions dans ce sujet.

La question **Q40**, demandant les principales sources d'incertitudes de l'expérience du LNE a été trouvée difficile à corriger, l'attente de l'auteur sur cette question nous semblant hors de portée des candidats. Le jury a finalement décidé d'un commun accord d'annuler cette question qui (peu traitée) n'a globalement donnée lieu qu'à des commentaires faux ou des généralités.

Le jury se permet par ailleurs de noter quelques questions pour lesquelles il s'est interrogé particulièrement :

- pour l'établissement de l'équation de d'Alembert, la définition du coefficient de compressibilité est très souvent donnée dans les problèmes, ce qui n'était pas le cas ici, ce qui a inquiété le jury ; mais finalement les candidats l'ont rappelée sans erreur dans la plupart des copies (soit avec la masse volumique, soit avec le volume  $V$ ) ;
- nous avons eu quelques doutes à la **Q21** quant à savoir si « les définitions du kelvin et du degré Celsius jusqu'en 2018 » étaient exigibles de la part des étudiants ;
- pour les applications numériques de la célérité, le coefficient  $\gamma$  n'était pas dans les données, or il fallait utiliser sa valeur pour les GP monoatomiques dans la **Q30** et diatomiques dans la **Q29**. Les capacités exigibles du programme de PCSI ne demandent a priori que la connaissance de  $U$  et  $H$  (donc  $C_p$  et  $C_V$  et donc  $\gamma$ ) pour les GP monoatomiques. Les candidats ont pour la majeure partie d'entre eux utilisé la valeur classique de 1,4 (GP diatomiques) dans les deux questions. Notons que quelques candidats ont tout de même différencié les deux valeurs de  $\gamma$  dans **Q29** et **Q30**.

Pour conclure sur ce volet, ce sujet nous a permis de trouver un barème rigoureux et sans ambiguïté nous permettant une correction rapide, efficace et juste. Par ailleurs comme pour chaque épreuve du concours Centrale-Supélec, la mise en place d'un malus a concerné moins de 5 % des copies, ce qui révèle une attention réelle à la forme de la copie rendue : le jury tient à remercier les étudiants pour cette marque de respect.

## Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

### Partie I : redéfinition du kilogramme

**Q1 / Q2** : trop de confusions entre erreur relative et absolue. Les candidats font souvent peu de différences entre les incertitudes sur l'outil de mesure et celles sur l'artéfact lui-même.

**Q3** : question souvent mal traitée à cause d'un manque de rigueur sur l'orientation de  $\vec{I}$  qui doit être sans ambiguïté. Le jury encourage les candidats à privilégier dans ce type de questions des schémas 2D avec notations claires des axes, plutôt que des schémas en 3D souvent ambigus. Trop de candidats confondent force de Laplace et force de Lorentz et oublient que la force de Laplace est une force élémentaire ( $d\vec{F}$ ).

**Q4** : trop de candidats ont le réflexe d'appliquer le PFD pour caractériser l'équilibre de la balance ; or ici c'est l'équilibre des moments qui caractérise cet équilibre (même si, la balance étant symétrique ici, le résultat final est le même). Rappelons aussi que l'analyse dimensionnelle, si elle peut avoir un intérêt, ne constitue pas une démonstration.

**Q5** : un nombre trop grand de candidats donne le résultat de la masse en grammes (avec une bonne application numérique mais pensant visiblement que l'unité légale de masse est le gramme !).

**Q6** : cette question a été souvent mal traitée. Elle demandait une lecture approfondie de la méthode expérimentale (le courant  $I$  est nul lorsque la masse  $M$  est présente).

**Q8** : la réponse étant donnée dans l'énoncé, trop peu de candidats appliquent rigoureusement la conservation de l'énergie. Par ailleurs, rappelons qu'une force électromotrice n'est pas une force. En revanche la question de l'homogénéité a souvent été très bien traitée.

**Q9** : question ouverte. Beaucoup de candidats pensent à l'interféromètre de Michelson mais oublient ensuite que dans ce type question, tout doit être décrit : lame d'air ou coin d'air, position des miroirs, position du capteur...

**Q10** : l'unité de  $E$  est bien le volt et non le newton (Cf **Q8**).

**Q11** : la majorité des candidats a pensé à la dilatation thermique.

**Q12** : beaucoup d'erreurs et d'imprécisions notamment sur les indices des composantes de  $\vec{B}$  et  $\vec{F}$ . Rappelons aux candidats que dans ces questions où la réponse est donnée dans l'énoncé, il faut encore redoubler de rigueur sur les démonstrations.

**Q13** : les candidats connaissent bien la notion de conservativité du flux magnétique et l'équation de Maxwell associée. Attention, certains se contentent de « conservativité du champ magnétique » ce qui est faux.

**Q14** : cette question, qui demande une vraie réflexion préalable a rarement été bien traitée : les symétries et d'antisymétries du champ devaient être étudiées soigneusement. Par ailleurs il était crucial dans cette question qui fait intervenir deux bobines de courants opposés, d'orienter les lignes de champ soigneusement.

**Q15** : comme pour la question précédente, c'est à nouveau les questions de symétries et d'invariance qui permettaient de conclure proprement.

**Q16** : les courbes obtenues, parfois avec des erreurs sur les sens de variation de la fonction font tout de même apparaître généralement une tangente horizontale.

**Q17** : conclusion simple au regard de la **Q16**, souvent traitée avec succès.

**Q18** : il fallait revenir aux descriptions initiales de la balance pour ne pas se tromper sur les tensions  $U$  ou  $U'$ .

**Q19** : la plupart des candidats ont compris qu'il ne sert à rien d'avoir une grande précision sur une des variables si les autres variables gardent une précision moindre.

**Q20** : de nombreux candidats pensent à exprimer les joules avec les unités de longueur / temps / masse ; ce qui permettait en rappelant que la définition de la seconde était connue (dans les données), de conclure.

## Partie II : redéfinition du kelvin

**Q21** : la majorité des candidats connaissent la valeur en kelvin de 0 °C.

**Q22** : beaucoup de candidats semblent avoir une idée imprécise de la notion de point triple. Et très peu pensent au problème de la pureté de l'eau dans les sources d'incertitudes.

**Q23** : la relation  $R = k_B \cdot N_a$  est dans l'ensemble connue.

**Q24** : si l'idée générale de l'approximation acoustique est connue, elle est souvent mal énoncée notamment au sujet de la vitesse  $v_1$  : la vitesse au repos est nulle c'est devant la célérité des ondes acoustique qu'elle est faible (et non la célérité de la lumière !).

**Q25 / Q26 / Q27** : ces questions proches du cours ont été dans l'ensemble bien traitées. Notons tout de même de trop nombreux oublis de « flèches sur les vecteurs ». Par ailleurs, la partie accélération convective de l'équation d'Euler demande de la rigueur : c'est l'opérateur  $(\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})$  qui est appliqué à la vitesse : la notation  $(\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}})\vec{v}$  est juste, mais pas  $\vec{v} \overrightarrow{\text{grad}} \vec{v}$  par exemple qui reste ambiguë.

**Q28** : de nombreux candidats se compliquent la vie en raisonnant en 3D avec les opérateurs vectoriels alors que l'énoncé dit bien que l'on est dans le cas unidimensionnel suivant l'axe  $(Ox)$ .

**Q29** : si l'expression de la célérité en fonction de  $T$  pour un gaz parfait est souvent bien traitée, il est important d'avoir un regard critique sur les applications numériques : les candidats doivent se douter qu'une célérité des ondes sonores dans l'air de 9 m/s est fautive.

**Q30** : le gaz étant de l'hélium, la majorité des candidats pense à prendre une nouvelle valeur de masse molaire mais oublie que, contrairement au cas de la **Q29**, l'hélium est monoatomique et que par conséquent  $\gamma$  prend aussi une nouvelle valeur ( $\gamma = 5/3$ ).

**Q31** : simple application de la formule de  $c_s$  obtenue en **Q29**.

**Q32** : conformément au programme, les candidats ont su remplacer la dérivée seconde de l'équation de d'Alembert 1D par le Laplacien.

**Q33** : dans la continuité de la **Q32**, et en utilisant le laplacien en coordonnées sphériques de l'annexe, on fait apparaître une équation de propagation 1D en  $r \cdot p_1(r)$ . De trop nombreux candidats se trompent sur les solutions générales de cette équation en donnant une solution en ondes harmoniques. Il faut se rappeler que la solution générale est une superposition d'ondes progressives de la forme  $f(r - ct) + g(r + ct)$ . Peu de candidats citent les ondes sphériques. Rappelons que cet adjectif vient de la forme des surfaces d'ondes ( $r = \text{Cste} \Rightarrow$  sphères ;  $x = \text{Cste} \Rightarrow$  plans).

**Q34** : et c'est la théorie de Fourier qui permet de s'en tenir aux ondes harmoniques.

**Q35** : attention aux calculs en complexes : la plupart des candidats pensent à partir de l'équation linéarisée d'Euler pour trouver la vitesse ; mais peu arrivent au bon résultat sans erreur. Notons par ailleurs parfois une utilisation erronée de la notion d'impédance acoustique, définie en cours uniquement pour des ondes planes progressives.

**Q36** : la définition générale du débit volumique est souvent juste. Encore trop d'erreurs sur la surface d'une sphère.

**Q37** : question peu traitée mais souvent juste quand elle l'a été : le lien entre mode propre et conditions aux limites est généralement bien connu.

**Q38** : la démonstration demandait la bonne équation de la **Q37** ( $\tan kr = kr$ ) : les candidats ayant la bonne équation ont la plupart du temps judicieusement pensé à une résolution graphique.

**Q39** : application numérique le plus souvent juste quand elle a été traitée.

**Q40 / Q41** : beaucoup de candidats s'étant penché sur cette question ont pensé avec succès au fait qu'il était nécessaire d'améliorer simultanément cinq sources d'incertitudes.

**Q42 / Q43** : questions peu souvent traitées, mais quelques candidats en ont fait de belles résolutions soignées.

## Conclusion

Commençons par préciser que le tour d'horizon précédent visait à mettre en avant les erreurs principales rencontrées afin d'aider les futurs préparateurs à mieux de se préparer au concours mais que le jury a par ailleurs vu de nombreuses très belles copies, tant sur la forme que sur le fond et tient à en féliciter les auteurs.

Résumons les voies d'améliorations et conseils que l'on peut tirer de cette épreuve en quelques points clés :

- nécessité de ne pas négliger les chapitres vus en première année ;
- ne pas hésiter à prendre un vrai temps de lecture des énoncés décrivant des protocoles expérimentaux parfois complexes. ;
- avoir un regard critique sur ses applications numériques ;
- être rigoureux dans tous ses calculs (flèches sur les vecteurs, différentielles...) et encore plus dans le cas où le résultat à démontrer est donné dans l'énoncé ;
- privilégier des schémas en 2D quand c'est possible, avec une indication rigoureuse des différentes orientations.

Rappelons aux candidats que le résultat d'une épreuve de concours représente un état des connaissances du candidat à un instant précis et ne représente pas en rien un jugement général de ce dernier.

Le jury tient à remercier les enseignants qui ont donné une grande énergie à la préparation des candidats.