Banque MP inter-Ens – Session 2018

Rapport relatif à l'épreuve orale de physique

- **Écoles partageant cette épreuve :**
  Ens Paris-Saclay, Ens Rennes, Ens de Lyon

- **Coefficients** (en pourcentage du total des points de chaque concours) **:**
  - Ens Paris-Saclay
    - Concours MP Option MP : 11,54 %
    - Concours MP Option MPI : 11,54 %
  - Ens Rennes
    - Concours MP Option MP : 11,54 %
    - Concours MP Option MPI : 11,54 %
  - Ens de Lyon :
    - Concours MP Option MP : 10,81 %
    - Concours Info Option P : 12,70 %

- **Membres du jury :**
  G. Dumas, J. Errami, G. Laibe, C. Winisdoerffer

Note : Par souci de lisibilité, « candidat » désignera aussi bien une candidate qu'un candidat.

1 Esprit de l'épreuve.

But de l'épreuve : l'oral de physique a pour but de sélectionner des candidats susceptibles de pouvoir suivre le parcours de sciences fondamentales de haut niveau des Écoles Normales Supérieures. L'expérience montre qu'en physique, ces candidats sont ceux qui savent faire preuve d'une excellente maîtrise des concepts étudiés pendant le cursus de CPGE et arrivent à modéliser un problème pour répondre à une question physique de manière autonome. Cela signifie :

- Avoir une maîtrise profonde du cours : connaître les principes fondamentaux de la physique, les résultats et formules dérivées tout en connaissant précisément leur domaine d'application.

  Exemples : Appliquer le premier principe de la thermodynamique requiert de définir au préalable un système et de discuter èventuellement son caractère ouvert ou fermé. Appliquer le théorème d'Ampère requiert de s'assurer que l'approximation des régimes quasi-stationnaires est effectivement valide.

- Faire preuve de sens physique : modéliser le problème proposé par un système connu plus simple, faire apparaître les grandeurs caractéristiques (temps, longueur...) et les paramètres de contrôle sans dimension, comparer les nombres d'équations et d'inconnues, vérifier les dimensions, connaître et utiliser des ordres de grandeur et discuter les limitations du modèle.

  Exemples : Un modèle grossier pour un animal est une sphère de rayon R et de densité celle de l'eau. L'énergie d'une liaison chimique est de l'ordre de l'eV.

- Maîtriser les stratégies de résolution des problèmes en physique : analyse des symétries et des invariances, quantités conservées, choix adéquat d'un référentiel ou d'un repère particulier, approximations judicieuses et développements limités, principe de superposition lorsque les équations sont linéaires, approche probabiliste et utilisation d'un facteur de Boltzmann...

  Exemple : Pour un système constitué de quatre masses ponctuelles reliées deux à deux par des ressorts, il est naturel de rechercher une configuration d'équilibre sous la forme d'un tétraèdre régulier.

- Calculer judicieusement et faire ressortir l'information physique. Lorsque visiblement les calculs sont lourds et compliqués, savoir basculer vers une résolution par ordre de grandeur.

  Exemple : La trajectoire d'un volant de badminton peut être étudiée simplement en regardant les contributions respectives du poids et de la force de frottement dans le régime de friction pertinent.

Format : Le format de l'épreuve est 45 minutes d'oral sans préparation. Le candidat déroule la progression de son raisonnement en direct devant le jury. Les problèmes posés n'abordent que des concepts au programme, mais sont autant que possible complexes et originaux. Il n'est souvent pas attendu qu'un candidat résolve le problème posé en 45 minutes sans préparation. L'énoncé sert de support pour *amorcer des discussions* sur des points de cours et permet à l'examinateur d'accompagner le candidat dans son raisonnement et d'évaluer son degré de compréhension de la physique du problème.

2 Exemple.

Pour guider les candidats dans leur préparation, nous présentons l'exemple d'un exercice posé à la session 2018.

Énoncé : *On considère une planète de masse M constituée d'hydrogène. Estimer la valeur caractéristique de M à partir de laquelle l'hydrogène s'ionise par pression.*

Commentaires : Cet énoncé a permis d'amorcer des discussions sur le modèle semi-classique de l'atome d'hydrogène et le principe d'incertitude d'Heisenberg, les équations de Maxwell, les notions de pression, de gaz parfait et de degrés de liberté. Dans le cas de l'exercice ci-dessus, les candidats n'ayant pas su énoncer et appliquer correctement le théorème de Gauss ont été fortement pénalisés. Les candidats ayant pu arriver à comprendre et expliquer pourquoi un atome d'hydrogène pouvait s'ioniser par pression (et faire la différence avec une ionisation par température), voire éventuellement déterminer l'ordre de grandeur d'une pression d'ionisation ont eu d'excellentes notes.

Solution 1 : Un ordre de grandeur de cette masse peut être obtenu en remarquant d'une part qu'au seuil d'ionisation par pression, la distance interatomique doit être de l'ordre de l'extension spatiale du niveau fondamental de l'atome considéré, ici l'hydrogène ($\simeq a_0$), ce qui donne la densité du plasma. D'autre part, pour un tel fluide, la densité volumique d'énergie interne (de l'ordre de E_{fond}/a_0^3, avec $E_{\mathrm{fond}} \simeq 13.6$ eV) doit être comparable à l'énergie volumique gravitationnelle ($\simeq \mathcal{G}M^2/R^4$) [tout comme elle doit être comparable à la contribution configurationnelle interatomique]. Ainsi :

$$\frac{m_{\mathrm{p}}}{a_0^3} \sim \frac{M}{R^3} \quad \text{et} \quad \frac{E_{\mathrm{fond}}}{a_0^3} \sim \frac{\mathcal{G}M^2/R}{R^3}, \tag{1}$$

ce qui donne $M_{\mathrm{caract}} \simeq 10^{27}$ kg, comparable à la masse de Jupiter, pour laquelle les modèles incluant une structure interne plus réaliste prédisent effectivement une ionisation par pression de l'hydrogène.

Solution 2 : En pratique, les candidats ont construit un raisonnement pas à pas que nous reproduisons et complétons ci-dessous. Avec des notations classiques :

- La planète ne s'effondre pas car la pression de l'hydrogène supporte sa gravité. L'équation donnant l'équilibre hydrostatique de la planète s'écrit

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}r} = -\frac{\mathcal{G}M(r)\rho(r)}{r^2}, \tag{2}$$

le champ de gravité étant celui donné par le théorème de Gauss. L'examinateur attendait une discussion précise sur la nature sphérique de la répartition de masse. Un raisonnement en ordre de grandeur d'après Eq. 2 donne

$$P_{\text{ion}} \sim \frac{\mathcal{G}M\rho}{R}. \tag{3}$$

- Le candidat mentionne alors que « l'ionisation par pression se produit si l'énergie apportée par le travail des forces de pression est suffisante pour faire sortir l'électron de son potentiel effectif ». Un modèle semi-classique du type atome de Bohr donne

$$E_{\text{eff}} = \frac{\hbar^2}{2m_e r^2} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}, \tag{4}$$

pour modéliser le fondamental, avec $E_{\min} = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}$ pour $r_{\min} = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{m_e e^2}$ (valeurs que l'on estime connues dans la Solution 1). Le concept de pression invoqué ainsi que les limites de cette approche sont discutées avec l'examinateur. D'après Eq. 4, l'électron est libre à $E = 0$ pour $r_{\text{ion}} = r_{\min}/2$.

Il est ensuite nécessaire de moyenner le comportement du plasma dense et de passer à une approche continue pour poursuivre le raisonnement (ce qui doit être discuté avec l'examinateur). La pression requise pour comprimer le plasma d'hydrogène à son rayon d'ionisation vaut

$$P_{\text{ion}} = -\left.\frac{\partial E_{\text{eff}}}{\partial V}\right|_S (r = r_{\min}) = -\frac{1}{4\pi r_{\min}^2}\left.\frac{\partial E_{\text{eff}}}{\partial r}\right|_S (r = r_{\min}). \tag{5}$$

Un argument sur la densité similaire à la Solution 1 donne $\rho \sim \frac{m_p}{\frac{4}{3}\pi r_{\min}^3}$. On arrive finalement à

$$M_{\text{caract}} \sim \left(\frac{3^{1/3}e^2}{4\pi\varepsilon_0 m_p^{4/3}\mathcal{G}}\right)^{3/2} \simeq 4 \times 10^{27}\ \text{kg}. \tag{6}$$

soit $M_{\text{caract}} \sim M_{\text{Jupiter}}$. Par analyse dimensionelle, $[M_{\text{caract}}] = [m_p]\left[\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a_0^2}\right)\left(\frac{a_0^2}{\mathcal{G}m_p^2}\right)\right] = \text{M}$.

N.B. : Il s'agit d'un exemple particulier, le format de l'énoncé pouvant varier selon la nature du sujet.

3 Points particuliers.

- Les problèmes mettant en jeu la présence d'un conducteur dans un champ magnétique sont complexes et sources de nombreuses confusions. Ainsi :
  - Une bonne compréhension des hypothèses, de la mise en équation et de l'interprétation physique du modèle de Drude permet d'éviter des erreurs d'analyse quant au rôle du champ **B** dans la loi d'Ohm. Dans un conducteur linéique, sa contribution est généralement négligeable *dans la direction de la densité de courant* **j**.
  - La force de Laplace n'est pas l'intégrale sur le volume de la force de Lorentz s'exerçant sur les électrons. Sinon, le travail de la force de Laplace serait nul, ce qui n'est pas le cas.
  - Un fil conducteur en forme d'une ou plusieurs boucles (au sens géométrique du terme) a un effet inductif . Celui-ci est modélisé par une inductance dans le schéma électrique qui peut être négligée ou non selon les problèmes.
- Dans le problème d'une particule dans un potentiel en $1/r$, la présence du terme en L^2/r^2 dans le potentiel *effectif* assure que le mouvement d'une particule sans interaction est rectiligne. La nature des trajectoires s'interprète alors simplement comme une compétition entre moment angulaire et gravité, compétition que l'on retrouve à toute échelle dans l'Univers.

- Si l'on considère une répartition de charges finie à symétrie *sphérique*, alors le potentiel gravitationnel à l'extérieur de la distribution de masse vaut $-\frac{\mathcal{G}M_{\mathrm{tot}}}{r}$. Dans le cas général, ce n'est pas le cas. Par exemple, le potentiel gravitationnel d'une galaxie peut se paramétrer dans des coordonnées cylindriques naturelles par

$$\phi\left(r,z\right) = \phi_0 \ln\left[1 + \left(\frac{r}{r_\mathrm{c}}\right)^2 + \left(\frac{z}{q\,r_\mathrm{c}}\right)^2\right], \tag{7}$$

  où r_c est une distance caractéristique de la galaxie et $0 < q < 1$.

- Une force de frottements fluides se modélise sous la forme $\mathbf{f}_{\mathrm{frott}} = -C\left(\mathbf{v} - \mathbf{v}_\mathrm{f}\right)$, où $\mathbf{v}$ est la vitesse du solide et $\mathbf{v}_\mathrm{f}$ est la vitesse du fluide environnant. Si le terme en $\mathbf{v}_\mathrm{f}$ est omis, $\mathbf{f}_{\mathrm{frott}}$ n'est plus un invariant galiléen. Une force de frottement peut être motrice lorsque $\mathbf{v}_\mathrm{f} \neq 0$, on pensera par exemple à une feuille entraînée par le vent. *A priori*, C est une fonction de $|\mathbf{v} - \mathbf{v}_\mathrm{f}|$.

- En l'absence de dissipation, le mouvement d'un oscillateur n'est jamais amorti.

- Le terme de Coriolis met en jeu la vitesse du corps *dans le référentiel non-galiléen.*

- L'expression du champ magnétique créé par un courant permanent dans une spire est hors programme. Toutefois, il faut savoir que suffisamment loin de cette spire, le champ est celui d'un dipôle magnétique et savoir retrouver qu'il varie en $1/r^3$.

- En magnétostatique, il est nécessaire de connaître précisément les définitions des différentes densités de courant afin de pouvoir appliquer le théorème de superposition correctement.

- Peu de candidats connaissent l'utilité des fonctions thermodynamiques H et G.

- Il est attendu des candidats de savoir expliquer pourquoi un ballon gonflé à l'hélium s'envole ou comment la station spatiale internationale parvient à maintenir son orbite.

⋆ ⋆
⋆