Épreuves orales de Physique, Filière PC

Ce rapport a pour vocation de donner quelques conseils aux futurs candidats, d'une part sur le déroulement de l'épreuve et sur la connaissance et la maîtrise du cours qui sont attendues par l'examinateur. Cette année, nous organisons le rapport en commentant quelques exercices proposés en commun par les trois examinateurs. Nous discutons ainsi des résultats proposés en général par les candidats et le cas échéant ce qui était attendu pour répondre plus complètement aux questions.

L'épreuve orale de physique dure 50 minutes. Les examinateurs cherchent à évaluer les connaissances et les capacités de raisonnement en physique des candidats. Les exercices proposés ont en général un énoncé très court, ce qui engage rapidement les élèves dans la réflexion. Il peut être utile dans un premier temps de se rappeler de son cours en écrivant les principales notions au tableau. C'est une bonne manière de rentrer dans les questions posées. Notons que les notes supérieures à 18/20 sont attribuées exceptionnellement et cela nécessite d'aborder en général deux exercices, en ayant des idées pour le 2ème exercice, sachant que celui-ci sera difficile et donc qu'une résolution complète n'est pas attendue. Cette année, nous avons observé un niveau moyen tout à fait satisfaisant. En général, le cours est bien connu, tant en EM, mécanique, ondes etc. Plus de précisions seront apportées avec la description des exercices qui suivent.

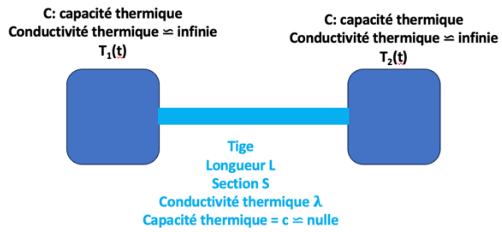
Énoncé : Une particule de masse m, de charge e interagit avec un champ électrique tournant en coordonnées polaires $E = E_0 e^{-i\omega t} e^{-ikz} e_\phi$ avec $e_\phi$le vecteur unitaire tangent au cercle. Étudier la dynamique de la particule au voisinage du plan z=0 et décrire le champ magnétique induit.

Cette question est en lien avec une publication récente (https://arxiv.org/abs/2209.15381). La résolution est standard : il faut écrire la 2eme équation de Newton le long de la direction tangentielle et justifier pourquoi la composante radiale de l'accélération est petite si E_0 est petit. Les élèves ont bien réussi cet exercice. La deuxième partie consiste à utiliser l'équation de Maxwell-Ampère pour déterminer si un courant peut être produit par le mouvement circulaire de la charge.

Énoncé : Un satellite est en orbite (basse) autour de la Terre. On suppose que son orbite est telle qu'il peut être freiné par les particules de matière de l'atmosphère, supposée isotherme. Décrire le mouvement du satellite et éventuellement son temps de chute sur la Terre.

Cet exercice met en œuvre plusieurs partie du programme : l'atmosphère isotherme, la détermination de la force de frottement en proposant un modèle de choc avec les particules d'atmosphère et le cours sur les forces centrales. Les candidats ont en général pu progresser dans ces différentes directions pour arriver à une bonne compréhension du problème. Chaque partie ne pose pas difficulté particulière. Nous donnons juste quelques éléments de résolution, mais d'autres idées proposées par les candidats ont été acceptées et largement valorisées : une modélisation naturelle de choc du satellite avec les particules d'atmosphère est celle d'un choc mou, la particule d'atmosphère se colle au satellite. Cela conduit à une force de frottement en ρv^2 dans le sens opposé au mouvement avec $\rho(.)$ la masse volumique de l'atmosphère. Ensuite la résolution du problème de type force centrale modifiée ne pose pas de difficulté.

Énoncé : On considère 2 corps solides : capacité thermique C, conductivité thermique grandes. Ils sont reliés par une tige de longueur L, de sections S, de conductivité thermique λ et de capacité thermique c nulle. On suppose que l'ensemble est isolé thermiquement.
Les températures initiales des 2 corps sont $T_{1,0}$ et $T_{2,0}$.
Déterminer l'entropie créée dans le système lorsqu'un régime permanent est établi.



C'est un exercice proche du cours mais les exercices de thermodynamique sur l'entropie doivent être traités avec précision, ce qui n'est pas toujours le cas. Nous donnons quelques éléments de résolution. On va déjà déterminer quel est le régime permanent, en particulier les températures T_1 et T_2 des 2 corps une fois ce régime établi, puis on passera au calcul d'entropie. Les conductivités des 2 corps étant grandes, leurs températures respectives sont uniformes. Seulement dans la tige, il y a une température qui dépend de la position de celle-ci et du temps T(x,t). L'équation pour T(x,t) est l'équation de la diffusion thermique avec c=0 :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

avec les conditions aux limites sur les 2 corps. De plus la puissance thermique qui traverse la tige est :

$$P = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} S = C \frac{dT_1}{dt} = -C \frac{dT_2}{dt}$$

On trouve alors les températures dans les 2 corps en fonction du temps puis la température commune de chacun des corps en régime permanent : $T_f = (T_{1,0} + T_{2,0})/2$ qui est aussi la température dans la tige car le système n'évolue plus dans le temps.
On arrive à la question de l'exercice, l'entropie créée lors de cette évolution.
Clairement, l'évolution est irréversible donc il y a de l'entropie créée quelque part. Cela ne peut pas être dans les 2 corps car ce sont des sources de chaleur… donc l'entropie est créée dans la tige.
On se rappelle de la formule du cours (à bien expliquer) :
$dU = TdS - PdV = TdS$, puisqu'il n'y a pas de variation de volume, avec $dU = C_{th}dT$.
On peut donc calculer la variation d'entropie S (fonction d'état) lors de la transformation de l'état initial au régime permanent :

$$\Delta S = C \int_{T1,0}^{Tf} \frac{dT_1}{T_1} + C \int_{T2,0}^{Tf} \frac{dT_2}{T_2} + 0 = Clog\left(\frac{T_f^2}{T_{1,0}T_{1,0}}\right)$$

Attention : Cela ne répond pas exactement à la question.
On ne sait toujours pas quelle est la part d'entropie échangée et créée. Pour conclure, il faut préciser que dans les 2 corps il y a uniquement de l'entropie échangée (les 2 1ers termes de l'équation plus haut) et que dans la tige, la variation d'entropie est nulle avec :

$$\Delta S_{tige} = 0 = \Delta S_{tige,échangée} + \Delta S_{tige,créée}$$

Avec :

$$\Delta S_{tige,échangée} = -\Delta S_{corps1,échangée} - \Delta S_{corps2,échangée}$$

Donc :

$$\Delta S_{tige,créée} = Clog\left(\frac{T_f^2}{T_{1,0}T_{1,0}}\right).$$

C'est bien la même expression que plus haut mais maintenant elle a pris son sens exact.

Énoncé : on considère un nuage sphérique d'un gaz parfait autogravitant (les seules interactions sont les interactions gravitationnelles entre les molécules du gaz et rien d'autre). On suppose que ce gaz est à température constante T_0.

1) Déterminer la pression et masse volumique en un point M dans ce nuage en fonction de la position de M. Montrer que cette solution n'est pas réaliste. On supposera alors que ce nuage de gaz a un rayon r_0 et une masse M. En déduire une relation entre r_0 et M.
2) On suppose que l'on a une perturbation de densité dans une petite région de taille << r_0 et autour d'un point M loin du centre. Discuter la stabilité de cette perturbation.

Les candidats ont en général bien traité cet exercice. La question 1 est une question de cours. On va juste proposer quelques éléments de résolution pour la question 2 qui a posé le plus de difficultés.
Si on suppose qu'autour du point M (rr_M (loin du centre, énoncé) on a :

(1) $\rho(rr_M) = \rho_0(.) + \delta\rho(.)$

avec $\rho_0(r)$ la masse volumique de la question 1), cela veut dire que l'on a aussi une petite perturbation sur P(r) et **g**(r).
Soit :

(2) $P(rr_M) = P_0(.) + \delta P(.)$

(3) $g(rr_M) = g_0(.) + \delta g(.)$

En sachant que $\delta g(.)$ n'a aucune raison d'être suivant e_r.
De plus, comme on veut étudier la stabilité de la perturbation, il faut conserver les dérivées temporelles dans les équations.
On ne peut donc plus utiliser (ii) l'équation de la statique des fluides mais on doit partir de l'équation d'Euler et de l'équation de continuité. Il faudra ensuite introduire (1), (2) et (3) dans ces équations et essayer d'extraire une équation uniquement pour $\delta\rho(rr_M)$. (i) et (iii) sont bien évidemment toujours valides.

$$\frac{-\partial^2}{\partial t^2}\delta\rho = \frac{-RT_0}{M}\Delta\delta\rho + g_0.grad(\delta\rho) - 4\pi\rho_0\delta\rho$$

On voit donc qu'on obtient une équation de type propagation avec 2 termes en plus dans le membre de droite. Ce sont ces termes qui vont faire que la perturbation peut être instable.
On cherche alors une solution de la forme :

$$\delta\rho(.) = \delta\rho(rr_M) = Bexp(ik.r - i\omega t)$$

Avec $g_0 = g_0(rr_M)$ trouvé à la question 1), on a :

$$\omega^2 = \frac{RT_0}{M}\left(k^2 - 2i\frac{1}{r_M}e_r.k\right) - 4\pi\rho_0$$

Notons qu'il y un terme imaginaire dans l'expression ci-dessus, cela signifie une diminution de l'amplitude $\delta\rho = \delta\rho(rr_M)$. C'est maintenant que l'on peut comprendre l'histoire de la perturbation sur un petit domaine loin du centre. En effet, avec cette hypothèse, on peut voir (après calculs simples) que cette diminution d'amplitude sera négligeable car : $exp(-\lambda/r_M)1$.

→ On peut donc négliger ce terme avec notre hypothèse de travail. L'équation de dispersion devient :

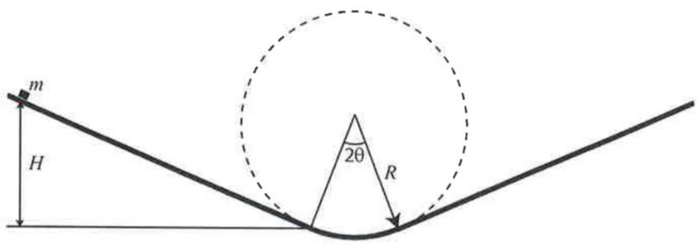
$$\omega^2 = \frac{RT_0}{M}k^2 - 4\pi\rho_0$$

Dès lors, si $\frac{RT_0}{M}k^2 - 4\pi\rho_0 < 0$, alors ω^2 est négatif et donc la perturbation est instable, stable dans le cas opposé. Donc, si $k = 2\,\pi/\lambda$ est suffisamment petit, tel que :

$$k = 2\,\pi/\lambda < \sqrt{4\pi\frac{M}{RT_0}\rho_0(rr_M)}$$

la perturbation est instable. Ce qui conclut.

Énoncé : on considère une masse m qui peut glisser sans frottement sur un le tobogan ci-dessous : 2 lignes droites inclinées à +/-θ et un arc de cercle de rayon R, disposés comme sur la figure.

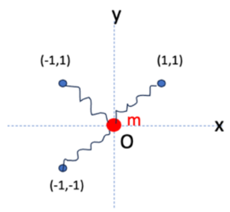


La masse m est lâchée sans vitesse à la hauteur H repérée comme sur la figure. On supposera θ<<1. Déterminer la période d'oscillation de m. En déduire qu'il existe une valeur de θ pour laquelle cette période est minimale.

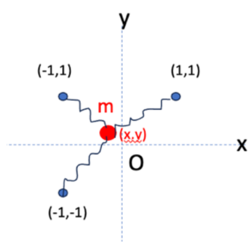
Un exercice facile qui ne pose pas de problème aux candidats. On trouve :

$$T = 4\sqrt{\frac{2H}{g}\frac{1}{\theta}} + 4\frac{R}{\sqrt{2gH}}\theta.$$

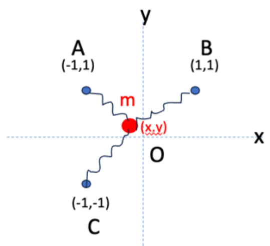
Énoncé : on considère le montage ci-contre : 3 ressorts sont attachés à des points pivots et reliés à une masse m. Initialement la masse m est au centre du repère (x,y), voir figure. Les 3 ressorts sont identiques : longueur à vide $l_0 = \sqrt{2}$ et raideur k.



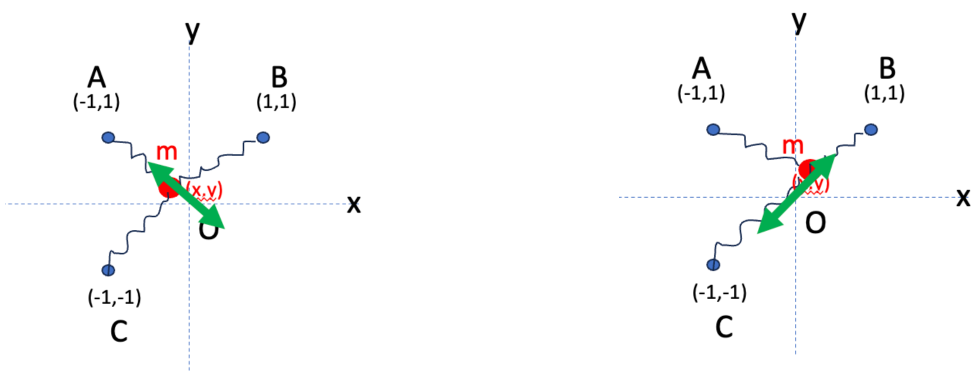
On déplace la masse m par rapport à O, puis on lâche. La masse m va donc se mettre à « osciller » On supposera toujours que les déplacements de m sont très petits par rapport à l_0. Quels sont les mouvements de m qui ont la même pulsation dans les directions x et y ?



C’est un exercice simple mais qui demande de la précision. Nous donnons donc ci-dessous un exemple de résolution. Il y a beaucoup d’approches possibles pour un tel exercice. L’essentiel est de ne pas se perdre dans les calculs.



On repère le système comme suit, en notant A, B, C les points pivots. L’idée est de calculer l’énergie potentielle du système, puis d’en déduire les équations du mouvement pour m. On pourrait également passer par une détermination directe des équations du mouvement à partir des forces sur m, mais c’est plus immédiat avec l’énergie potentielle. Par symétrie, on voit qu’il ne peut y avoir que 2 possibilités pour des mouvements synchrones x et y. Figure ci-dessous. Cela veut dire que l’on peut déjà connaitre les vecteurs propres des solutions que l’on recherche. Il est plus délicat de trouver la pulsation avec un raisonnement qualitatif mais on sait que nécessairement, elles seront de la forme $\alpha\sqrt{k/m}$.



Notons que par le raisonnement, certains candidats ont pu identifier ces mouvements (aussi appelés modes propres) directement, sans calcul (comme indiqué ici). Cela a été très largement valorisé car cela témoigne d’un bel esprit physique, qui finalement est l’objectif de cette épreuve.

On calcule Am, Bm, Cm avec les coordonnées puis :

$$E_p = \frac{1}{2}k\left(Am - \sqrt{2}\right)^2 + \frac{1}{2}k\left(Bm - \sqrt{2}\right)^2 + \frac{1}{2}k\left(Cm - \sqrt{2}\right)^2$$

Et on détermine les équations du mouvement en x et y (en négligeant les ordres 2) :

$$m\acute{x} = \frac{-\partial Ep}{\partial x} m\acute{y} = \frac{-\partial Ep}{\partial y}$$

$$m\acute{x} = \frac{-3}{2}kx - \frac{1}{2}kym\acute{y} = \frac{-3}{2}ky - \frac{1}{2}kx$$

On a donc 2 équations couplées qu’il faut résoudre avec la condition que les mouvement suivant x et y se font à la même pulsation ω, soit :

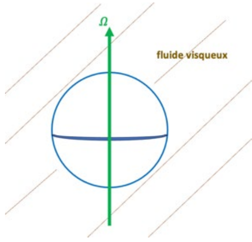
$$x = Ae^{i\omega t}y = Be^{i\omega t}$$

Ce qui donne un système de 2 équations avec 2 inconnues A et B qui doivent être non nuls.

On trouve 2 possibilités : (i) A=B, ce qui implique : $\omega = \sqrt{2\,k/m}$: la solution dessinée à droite plus haut (ii) A=-B, ce qui implique $\omega = \sqrt{k/m}$: la solution dessinée à gauche.

Énoncé : une sphère tourne à la vitesse angulaire Ω dans un fluide visqueux qui remplit tout l'espace (sauf la sphère).

Déterminer le champ des vitesses dans le fluide une fois le régime permanent établi.



C'est un exercice proche du cours mais avec une difficulté : il faut bien avoir compris ce qu'est le terme de viscosité volumique dans les équations de Navier-Stokes (NS). C'est pourquoi nous proposons un corrigé assez complet afin que tout soit clair lors des prochaines épreuves.
Déjà, on doit faire des hypothèses qui donnent en pratique les conditions de validité du calcul.

- On supposera l'écoulement laminaire, soit : $\rho\, U^2/L << \eta\, U/L^2$ avec $U = \Omega\, R$.
- On supposera que la force de gravité est négligeable : $\rho\, g << \eta\, \Omega/R$.

Dans ces conditions, NS devient (en régime permanent) :

$$-grad(P) + \eta \Delta(v) = 0$$

A un moment, il faudra aussi utiliser la condition à la surface de la sphère ainsi le fluide à la surface de la sphère est entrainé par la sphère. Vu la symétrie du problème, il faut se placer en coordonnées sphériques, avec de plus une invariance par rapport à ϕ. On voit facilement que :

$$v(M) = v(r,\theta) e_\phi$$

Donc, l'équation de NS devient avec les opérateurs à exprimer en coordonnées sphériques :

$$-grad(P) + \eta \Delta\big(v(r,\theta) e_\phi\big) = 0$$

Le plus dur est fait. <u>La subtilité c'est que le vecteur unitaire e_ϕ est dans le Laplacien, donc il ne faut pas oublier de le dériver quand c'est nécessaire.</u> Il faut évidemment fournir les opérateurs en coordonnées sphériques. On peut alors développer l'équation ci-dessus et la projeter sur les vecteurs unitaires e_r, e_θ, e_ϕ. On trouve que P=constante et l'équation suivant e_ϕ devient :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial^2}{\partial r^2}(rv) + \frac{1}{r^2 sin\theta}\left(cos\theta \frac{\partial v}{\partial \theta} + sin\theta \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2}\right) - \frac{v}{r^2 sin^2\theta} = 0.$$

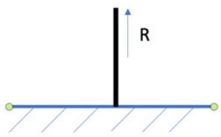
Là, il faut avoir une idée de solution. On pourra guider le candidat pour l'amener à essayer une solution de la forme :

$$v = v(r,\theta) = A r^\alpha sin\theta$$

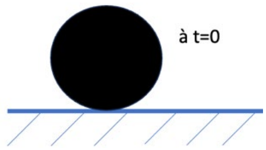
On sait de plus que quand r tend vers l'infini v(.) tend vers 0.
On trouve alors que nécessairement α=-2.
Finalement, on impose la condition à la limite à la surface de la sphère et on trouve le résultat :

$$v = \frac{\Omega R^3}{r^2} sin\theta e_\phi.$$

Énoncé : Un disque (une pièce) de Cuivre de masse volumique ρ, de conductivité σ, de rayon R et d'épaisseur a est placé sur sa tranche sur le sol.



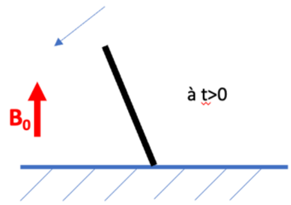
Vue de coté



Vue de face

Le disque tombe dans un champ magnétique $\mathbf{B_0}$ perpendiculaire au sol.

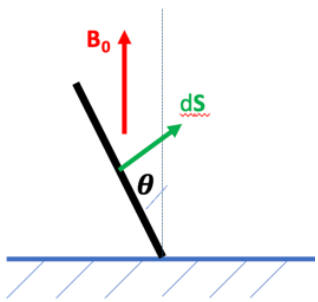
Quel est le temps de chute ?



Pour le calcul on supposera que la pièce est un peu penchée à t=0s, sinon elle ne tombe pas, par exemple avec un angle initial de 0.1 rad par rapport à la verticale.

Données : $\sigma = 10^8$ S/m, $\rho = 10^4$ kg/m3, R = 1 cm, a =1 mm, B_0 = 2 T.

Ce n'est pas un exercice facile sur l'induction. Les candidats ont en général bien compris les principes et avancé très correctement dans la résolution. Nous proposons quelques éléments de résolution qui peuvent servir pour tous les exercices du même type. Dans le principe, ce qui va se passer est proche de l'exercice de cours avec le rail coulissant. A chaque instant, la force de l'opérateur pour maintenir le rail à la vitesse **v** constante est compensée par la force de Laplace, puis est convertie en énergie Joule. On repère le système d'étude comme suit.



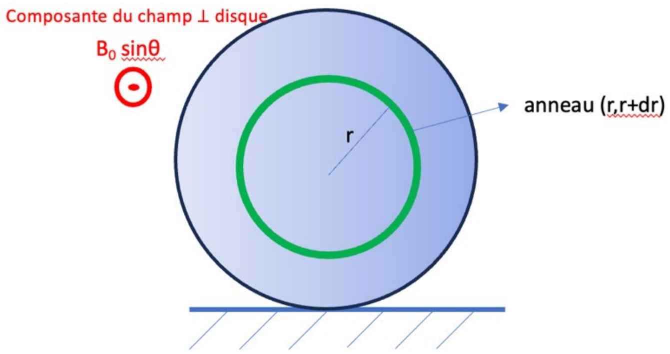
Il y a un point très important à ne pas rater ici. Quand le disque tombe, on comprend bien qu'il y a une variation du flux du champ magnétique à travers le disque. Mais il faut faire très attention. Ce qui nous intéresse, lorsque l'on calcule le flux d'un champ magnétique pour trouver un phénomène d'induction, c'est le flux à travers le contour fermé d'un circuit.

Ici, chaque anneau de rayon r (à dr près) est un tel circuit fermé pour r = 0 à R.

En effet, un tel anneau (circuit fermé) tombe dans $\mathbf{B_0}$ et, en tombant, le flux du champ à travers l'anneau varie, donc il y a une fem etc.

Le flux du champ magnétique à travers l'anneau de rayon r est donc :

$$\phi(B_0) = B_0 sin\theta \pi r^2$$



Et comme $\theta = \theta(t)$ le flux varie dans le temps.
Soit :

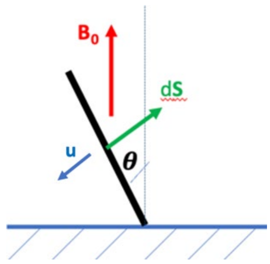
$$e = \frac{-d\phi}{dt} = -B_0\acute{\theta}cos\theta\pi r^2$$

Avec nos notations $\acute{\theta} > 0$ donc e < 0. *Nous rappelons que la loi de Faraday* $e = \frac{-d\phi}{dt}$ *dans toute sa généralité est au programme.* Donc, si on regarde la figure ci-dessus, le sens + est le sens trigonométrique et le courant dans l'anneau (r,r+dr) est positif dans le sens inverse du sens trigo. Cela nous permet de voir dans quel sens pointe le vecteur moment magnétique (d**M**) associé à cet anneau :

$$dM = |di|\pi r^2 u = dG|e|\pi r^2 u$$

avec dG la conductance de l'anneau… et **u** un vecteur unitaire orienté dans le sens inverse de $\mathbf{B_{0,\perp}}$.
On a aussi : $dG = \sigma\frac{adr}{2\pi r}$.
Puis on peut calculer le moment $d\Gamma$ des forces de Laplace :

$$d\Gamma = dM \wedge B_0$$



puis Γ lorsque l'on intègre de dr de 0 à R.
C'est maintenant qu'il faut bien comprendre ce qui se passe. Ce passage est délicat et a toujours été très largement guidé lors des oraux. Si on dessine Γ, c'est un moment qui s'oppose à la chute de la pièce. Il s'oppose donc au moment du poids qui provoque la chute de la pièce.
En fait, à chaque instant, comme pour le cas du rail, on a un équilibre entre le moment du poids et le moment des forces de Laplace, ce qui fait en particulier que toute l'énergie potentielle gravitationnelle -de la chute- est dissipée par effet Joule. On pourra vérifier ceci à la fin.
En écrivant, $\Gamma = \Gamma_g$ on obtient une équation qui va permettre de déduire le temps de chute. Je ne détaille pas tous les calculs. Je trouve (en espérant ne pas avoir fait d'erreur) :

$$\frac{\pi R^4 a}{8}\sigma B_0^2\acute{\theta}cos^2\theta = \rho\pi R^3 agsin\theta$$

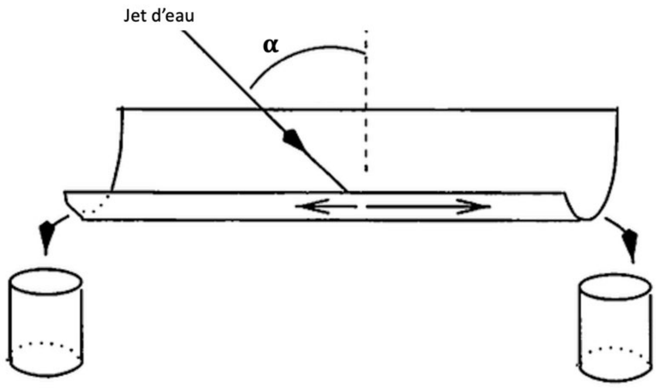
Ce qui donne :

$$dt = K\frac{cos^2\theta}{sin\theta}d\theta$$

avec K une constante (dimensionnée) qui contient toutes les grandeurs physiques (équation au-dessus). Les facteurs numériques ne sont pas essentiels mais c'est bien si à ce niveau, on peut vérifier que K a la bonne dimension (temps). Il reste à intégrer sur θ. Là encore, il y a une petite subtilité.

En fait, on ne peut pas partir de $\theta = 0rad$ car l'intégrale diverge. On doit partir d'un $\theta_{init} > 0$, par exemple 0.1 rad comme suggéré dans l'énoncé. Le truc, c'est qu'il faut nécessairement partir d'un $\theta_{init} > 0$ pour que la pièce tombe. Et le calcul le confirme. On trouve alors un temps de chute de 8 secondes. On peut alors calculer la puissance Joule dissipée = $\Gamma\acute{\theta}$. Puis on vérifie que l'énergie Joule dissipée lors de la chute est bien égale à mg.R et donc toute l'énergie potentielle de pesanteur est convertie en énergie Joule.

Énoncé : On considère un jet d'eau de vitesse v et de section S en incidence (α) sur une gouttière (figure). Dans la gouttière, les jets d'eau sont horizontaux et de sections S_D et S_G pour le jet de droite et de gauche resp.



Quel est le rapport des quantités d'eau qui tombent dans le bidon de droite versus gauche ?

Nous concluons cette liste d'exercices avec un exercice qui n'a posé aucun problème aux candidats. On trouve :

$$r = \frac{1 + sin(\alpha)}{1 - sin(\alpha)}.$$

Énoncé : On suppose que la Terre peut être modélisée comme un corps fluide. Décrire sa forme.

C'est un exercice assez simple permettant de montrer les capacités de modélisation des candidats. Dans la plupart des cas, cet exercice a été bien réussi. Une liberté est laissée au candidat, mais il pourra par exemple poser que :
- La gravite crée une Terre de forme sphérique.
- La déformation par rapport à une sphère est créée par l'inertie.

Le candidat est alors encouragé à réaliser un bilan de statique des fluides. Le candidat pouvait refaire un théorème de Gauss afin de retrouver le champ de gravitation intérieur de la Terre. En supposant une symétrie de rotation autour de l'axe de rotation de la Terre (Ox), et en déroulant le calcul, on trouve :

$$P(x,y) = -\rho\frac{GM_T}{R_T^3}(1 - \frac{R_T^3\Omega^2}{GM_T})\frac{y^2}{2} - \rho\frac{GM_T}{R_T^3}\frac{z^2}{2} + P_0$$

On peut alors analyser les lignes isobares afin de conclure, et trouver l'équation d'une ellipse dont on pourra déterminer l'écart entre le petit et le grand axe pour conclure.

Énoncé : On modélise le vol d'une aile d'avion comme un cylindre se déplaçant dans un fluide parfait et immobile par rapport à la Terre.
1. Déterminer le vecteur vitesse de l'air par rapport à l'aile en tout point de l'espace.
2. Calculer la portance et la trainée de l'aile. Comment l'avion peut-il voler.
3. On met l'aile d'avion en rotation. Estimer la force exercée sur cette dernière.

C'est un exercice très classique, si ça n'est que d'habitude, le potentiel des vitesses est donne. Cette version demande au candidat de retrouver par des considérations de symétries et de physique le potentiel des vitesses, puis de retrouver par le calcul le paradoxe de d'Alembert.
Pour retrouver le potentiel des vitesses, les candidats ont bien sûr été guidés, mais le jury a été agréablement surpris de la capacité de certains candidats à utiliser tous les aspects des symétries pour arriver parfois d'eux même au bout de la première question. Les examinateurs commencent par proposer un schéma des lignes de champ aux candidats afin de les guider dans les formes de ces dernières. Puis, pour rappel, les informations pouvant être utilisées sont :
- la symétrie des lignes entre le dessus et dessous de l'aile.
- on peut supposer le fluide incompressible. Les examinateurs pourront guider le candidat ⇒ la vitesse dérive d'un potentiel.
- On peut examiner le champ en des points particuliers ($r \rightarrow$ infini, $\theta = 0$ ou π).

La dernière question est une extension de la première, ou l'on peut ajouter par exemple une rotation constante de l'aile. On retrouvera in fine l'effet Magnus.

Énoncé : Le climat se réchauffe au point que la température au sol augmentera d'environ 3 degrés à la fin du siècle. Une possibilité serait de déplacer l'orbite terrestre un peu plus loin du soleil pour retrouver la température pré-industrielle.
— De quelle distance faudrait-il modifier la distance Terre-Soleil ?
— Quelle énergie minimale faudrait-il fournir ?
— En poussant la Terre avec une fusée idéale, quelles ressources faudrait-il utiliser pour y parvenir ?

Un exercice qui a été bien réussi par la plupart des candidats. Il demande des notions assez simples, mais mélange la thermodynamique et la gravitation, et les dernières questions puisent dans la culture générale du candidat.
- La première question est une simple application du cours du corps noir. Cette question a été bien réussie dans l'ensemble, bien que quelques candidats aient buté par oubli du cours.
- Il faut évidemment combiner ceci a l'énergie totale d'une planète en fonction de sa distance au Soleil. Une erreur classique a été de ne considérer que l'énergie potentielle entre les deux orbites plutôt que l'énergie totale.
- La dernière question teste la capacité de modélisation et la culture du candidat. L'examinateur n'attend pas une réponse exacte, mais que le candidat se serve de ses connaissances pour trouver une forme d'énergie disponible sur Terre, en faire une évaluation quantitative globale, et vérifier si cette énergie pourrait suffire à la propulsion de la Terre. Une possibilité était par exemple de supposer la

fusion nucléaire. Dans ce cas, l'examinateur donnait au candidat la formule de conversion de masse d'hydrogène en Energie, et le candidat était amené à calculer la masse d'hydrogène contenue dans les océans.

Pour conclure, nous avons observé cette année un bon niveau en moyenne. Nous rappelons également que les oraux sont largement guidés. Dans la plupart des oraux, les examinateurs indiquent comment commencer l'exercice et/ou comment surmonter une difficulté. Dans la mesure où l'homogénéité dans la difficulté des exercices est impossible à atteindre, la différence est compensée par une aide plus grande apportée aux candidats lors d'exercices plus difficiles, avec aussi une notation plus indulgente pour les erreurs commises lors de la progression. De plus, si un candidat identifie un exercice simple, ou bien qu'il sache le faire car il a déjà vu quelque chose de ressemblant dans sa préparation, son intérêt n'est pas de faire durer l'exercice. Lorsque l'exercice est simple, les examinateurs attendent qu'il ne pose pas de difficulté, pour poser ensuite une question plus difficile. Les performances au-dessus de 16/20 nécessitent en général d'avoir montré des idées sur une question difficile, et il est impossible d'avoir au-dessus de 17/20 sans avoir abordé largement une question difficile, telle qu'identifiée dans la liste ci-dessus.

Statistiques :

. La note moyenne obtenue par les 500 candidats français et internationaux est 11,83/20 avec un écart-type égal à 3,15.