Sciences physiques

Physique

Premier exemple : sujet de Physique I

Un sujet de Thermodynamique

Voici un énoncé effectivement proposé cette année :

<u>**Les trois petits cochons en expédition**</u>

Au cours d'une expédition polaire, les trois petits cochons décident de construire un igloo de glace de forme hémisphérique. Ils s'accordent sur un rayon intérieur $R_1 = 1{,}0$ m et une épaisseur de glace de 30 cm. L'air extérieur est à une température $T_e = -5$°C supposée constante.

Au moment où l'igloo est achevé, le grand méchant loup surgit. Les trois petits cochons se précipitent à l'intérieur de l'igloo et obstruent l'entrée par un dernier morceau de glace.

Le loup se met à souffler, souffler mais l'igloo reste en place. Ayant bien remarqué l'absence de cheminée, sa seule chance est de continuer à souffler. Un régime stationnaire de transferts thermiques finit par s'établir entre l'intérieur et l'extérieur de l'igloo. Ajoutons que des transferts thermiques de nature conducto-convective ont lieu d'une part entre l'air intérieur et la paroi intérieure (coefficient de transfert thermique de surface $h_i = 5{,}0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), d'autre part entre l'air extérieur et la paroi extérieure (coefficient $h_e = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ quand le loup souffle et $h_e = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ quand il ne souffle plus).

Phase 1 : le loup souffle.

1. Exprimer puis calculer la résistance thermique de conduction de l'igloo.
2. Sachant qu'un petit cochon libère une puissance de 80 W, calculer la température intérieure qui règne à l'intérieur de l'igloo ainsi que la température de sa paroi intérieure.

Phase 2 : le loup, fatigué, arrête de souffler mais les trois petits cochons restent enfermés.

3. En se plaçant encore en régime stationnaire, montrer que l'igloo fond. De quel côté ? Sur quelle épaisseur ?

Données :

- Conductivité thermique de la glace : $\lambda = 2{,}0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Capacité thermique massique de la glace : $c = 2{,}1 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Masse volumique de la glace : $\varrho = 9{,}2 \cdot 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Ce qu'attend le jury, et ce qu'il a vu :

Il est certainement plus efficace d'utiliser le temps de préparation à réfléchir à la modélisation suggérée par l'énoncé (notion de résistance thermique : définition, conditions d'application, analogie avec l'électrocinétique), à l'enchaînement des questions, au dénombrement des inconnues et des équations physiques qui les lient plutôt que de commencer la recherche de la première question sans avoir réfléchi aux deux autres.

Le jury a apprécié - et valorisé - les candidats qui, tout en schématisant le problème, présentent les objectifs de l'exercice. Cette introduction doit être suivie d'une analyse physique des phénomènes. En montrant ici, qualitativement, que la diminution du coefficient h_e augmente la température de l'igloo (et le risque de fonte), le candidat exprime son sens physique et se démarque de ceux qui attachent plus d'importance à établir les équations qu'à en faire ressortir la signification.

La résolution de la première question se fait aisément si le candidat sait (ou sait démontrer), qu'en régime stationnaire, la puissance thermique traversant la demi-sphère de rayon r ($R_1 < r < R_1 + e$) est indépendante de r. L'erreur courante consiste à croire et à justifier faussement que, dans cette géométrie, la norme du vecteur densité de courant thermique est constante. L'utilisation de l'équation de la diffusion thermique (avec un formulaire fourni) n'est pas une démarche pertinente ou efficace : ces calculs superflus se substituent à une formulation claire du problème.

Quand bien même le candidat ne réussirait pas à établir l'expression de la résistance thermique requise, le jury apprécierait que ce dernier transpose - certes injustement - l'expression (exigible d'après le programme de la classe) de la résistance thermique d'un barreau rectiligne unidimensionnel au cas de l'exercice afin de le continuer et d'obtenir des ordres de grandeur qui pourront être critiqués dans la suite de l'exposé. La démarche pour résoudre la deuxième question est suggérée par la première : la modélisation des transferts thermiques conducto-convectifs par des résistances thermiques permet d'établir un schéma électrocinétique équivalent de la situation : le calcul de la température à l'intérieur de l'igloo se fait alors aisément. Certains candidats (généralement ceux-là même qui s'évertuaient à résoudre l'équation de la diffusion thermique dans la coquille sphérique sans jamais pouvoir aboutir au calcul de la résistance thermique) ne peuvent affirmer l'égalité des flux conductifs et conducto-convectifs ; en quête de l'équation manquante, ils cherchent dans le regard de l'examinateur une approbation (qui ne vient pas) lorsqu'ils proposent que la somme des flux conducto-convectifs est égale au flux conductif.

La dernière question est l'occasion, pour les meilleurs candidats, d'exploiter à nouveau la notion de résistance thermique et de vérifier que les petits cochons, s'ils sont bien protégés du loup, sans périr noyés, auront à affronter les conséquences d'un bain prolongé en eau glacée.

Deuxième et troisième exemples : sujets de Physique II

Les logiciels utilisés pour le support des sujets de Physique II sont essentiellement de deux types : des logiciels « fermés », présentant des simulations numériques et des feuilles de calcul `Maple` ou `Mathematica` (selon le choix signalé par le candidat lors de son inscription au concours) déjà partiellement rédigées offrant au candidat, selon le cas, la possibilité de traiter tout ou partie des aspects théoriques du sujet ou bien d'achever le traitement quantitatif des questions posées. Un exemple de chacune des catégories est détaillé ci-dessous.

a) un sujet d'Optique, avec simulation

Voici l'énoncé d'un sujet effectivement posé cette année en Optique, avec l'appui d'une simulation informatique.

<u>Cohérence temporelle</u>

Il s'agit d'étudier l'influence de la longueur de cohérence sur la visibilité des interférences.

1. Décrire un dispositif interférentiel à deux ondes, éclairé par une source ponctuelle, et qui permette d'observer des franges d'interférences rectilignes. Comment faire pour observer les interférences à l'infini ?
2. On adopte le modèle suivant : une source monochromatique émet des trains d'onde tous identiques, de durée τ, mais à des dates aléatoires. Indiquer dans quelle zone de l'espace on peut espérer observer des interférences. Comment est limitée la zone d'observation sur un écran placé dans le plan focal d'une lentille ?
   La simulation proposée permet d'observer l'influence de la durée τ des trains d'onde sur un dispositif interférentiel du type proposé. Un paramètre b réglable permet de modifier les propriétés de la source. Quel est, à votre avis, le lien entre τ et b ?
3. La durée d'observation est très grande devant celle des trains d'onde, elle-même très grande devant la période des ondes. Calculer l'éclairement moyen un point de l'écran. En déduire le contraste local. Conclure.

Le sujet est accompagné d'un logiciel montrant des franges rectilignes et permettant d'effectuer, sur l'écran des mesures de position (coordonnées x et y sur l'écran) et d'intensité lumineuse. En particulier, en choisissant les valeurs extrêmes du paramètre b, le candidat affiche respectivement des franges bien ou mal contrastées (cf. figures).

Franges d'interférences mal contrastées

Franges d'interférences bien contrastées

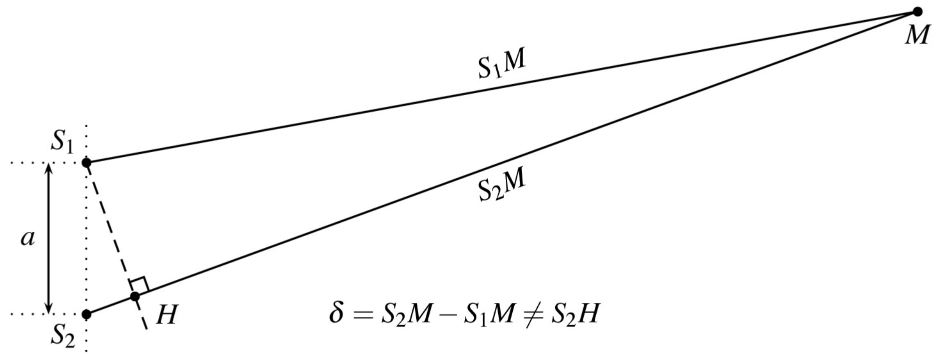
Ce qu'attend le jury, et ce qu'il a vu :

Le candidat, pendant sa préparation, devra se concentrer sur les questions 2 et 3 afin de confronter l'aspect théorique (calcul de contraste et/ou lien entre la durée des trains d'onde et la différence de marche maximale) et les résultats de la simulation (mesure du contraste en fonction du paramètre réglable dans le logiciel).

Le jury attend ici une mise en facteur classique de la fonction d'éclairement à deux ondes, par exemple sous la forme $E = 2E_0\ (1+C(\delta)\ \cos[k_0\delta])$ avec une fonction de contraste décroissant régulièrement depuis $C(0) = 1$ jusqu'à $C(\pm\delta_{max}) = 0$. L'interprétation physique attendue est bien sûr celle de la relation $\delta_{max} = c\tau$.

Le jury espère aussi (et il n'a pas toujours été déçu !) se voir proposer quelques ordres de grandeur, en liaison avec le nombre maximal de franges observables en fonction de la nature de la source utilisée.

Pendant la présentation, le candidat doit bien sûr commencer par la question 1 en décrivant un système interférentiel de son choix. Le jury aurait pensé que les bons candidats, ayant réalisé que le sujet traitait de la possibilité d'observer un nombre plus ou moins élevé de franges, étudieraient naturellement l'interféromètre de Michelson. En pratique, les étudiants, peut-être par manque de confiance, ont presque toujours préparé explicitement au brouillon puis présenté au tableau un dispositif « plus simple » de trous (ou fentes) de Young (cf. schéma).



On doit ici faire remarquer deux erreurs courantes, l'une d'ordre concret (une *source ponctuelle* n'est pas un objet en soi, on doit l'approcher par un montage optique) et l'autre de l'ordre du calcul de la différence de marche, qui *n'est pas* la distance S_2H ci-dessus (beaucoup de candidats l'affirment pourtant, sans pouvoir bien sûr le justifier).

b) un sujet de Thermodynamique, avec calcul formel

Voici maintenant l'énoncé d'un sujet effectivement posé cette année en Thermodynamique, avec la feuille de calcul formel associée :

Planète blanche, planète bleue

On étudie une planète *sans atmosphère* soumise au rayonnement thermique d'une étoile de température de surface T ; le flux radiatif reçu par la planète de la part de l'étoile a pour valeur (intégrée sur toutes les longueurs d'ondes) ϕ_0. On rappelle que ce flux est réparti sur l'ensemble des fréquences ν proportionnellement à la fonction (ou distribution) de Planck, $F(\nu) = \dfrac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$ où h est la constante de Planck et k la constante de Boltzmann. La surface de la planète est :

- réfléchissante, avec un coefficient de réflexion α, sur tout ou partie du spectre visible ;
- assimilée à un corps noir dans tout le reste du spectre électromagnétique.

Toutes les valeurs numériques, y compris la constante de Stefan σ, sont indiquées dans la feuille de calcul associée.

1. La planète est *blanche*. Au moyen de la feuille de calcul proposée, déterminer sa température moyenne de surface ; calculer et commenter aussi la longueur d'onde correspondant à son maximum d'émission.
2. La planète est *bleue*. Mêmes questions.
3. Comparer les résultats de ce modèle au cas de la Terre ; proposer une explication et une mise en équation complémentaire.

Éléments de calcul `Maple` *déjà rédigés, associés à l'exercice :*

```
phi0 := 1300. ; h := 6.63*10^(-34) ; k := 1.38*10^(-23) ;
T := 5800. ; c := 3*10^8 ; alpha := .3 ; sigma := 5.7*10^(-8) ;
F := u -> A*u^3/(exp(h*u/(k*T))-1) ;
A := solve(int(F(u), u = 0 .. infinity) = 1, A) ;
lambda1:=... ; lambda2:=... ;
```

Éléments de calcul `Mathematica` *déjà rédigés, associés à l'exercice :*

```
phi = 1300. ; h = 6.63*10^(-34) ; k = 1.30*10^(-23) ;
T = 5800. ; c = 3.0*10^8 ; alpha = 0.3 ; sigma = 5.7*10^(-8) ;
F[u_] = A*u^3/(Exp[h*u/(k*T)] - 1)
sol = NSolve[Integrate[F[u], {u, 0, Infinity}] == 1, A]
A = A /. sol[[1]]
lambda1 = ... ; lambda2 = ... ;
```

Ce qu'attend le jury, et ce qu'il a vu :

Le candidat doit d'abord réaliser, au cours de sa préparation, que l'énoncé n'est qu'une mise en forme de la loi de Planck du rayonnement thermique ; la constante A doit être identifiée comme un terme de normalisation. Les candidats peuvent s'en convaincre en traçant l'allure de la courbe (c'est une forme familière de la loi de Planck) ou en en cherchant le maximum (retrouvant par exemple ici la loi de Wien).

La plupart des étudiants proposent alors un bilan thermique de régime permanent pour un système *plus ou moins bien précisé* et établissent un expression du type $4\pi R^2\sigma T^4 = \phi_R$, la puissance émise par l'étoile et absorbée par la planète (de rayon R) étant écrite sous la forme $\phi_R = S_\perp \phi_0 (1 - \alpha\int_{\mathscr{D}} \mathrm{F}(\nu)\mathrm{d}\nu)$, le domaine spectral d'intégration étant défini par les ordres de grandeur en général bien connus. Par contre, la géométrie du flux radiatif solaire est souvent mal décrite, conduisant à une erreur d'un facteur 2 ou 4 dans l'expression de la section efficace $S_\perp$; l'application numérique permet souvent à ce stade d'amener le candidat à s'interroger sur son modèle pour, éventuellement, le rectifier.

La troisième question, conçue comme une porte ouverte à la discussion, à malheureusement été peu abordée par les candidats qui ont traité ce sujet.