**Rapport de MM. Marc HIMBERT et Philippe LAFARGE, correcteurs.**

La deuxième composition de physique proposait une étude détaillée des couverts de glace à la surface de la Terre. La lecture de ce seul intitulé aurait permis à de nombreux candidats de mieux appréhender l'ordre de grandeur des résultats numériques attendus tout au long du problème...

Dans la **partie I**, le « problème de Stefan » proposait l'étude thermodynamique de la croissance d'une couche de glace lorsque la condition aux limites du problème de diffusion thermique est une température fixée. Puis, on analysait (**partie II**) l'effet d'une couche de neige, susceptible d'affecter les transferts thermiques entre l'atmosphère (imposant la température de surface) et la glace en cours de formation. Enfin, la prise en compte de l'évolution des conditions aux limites permettait de mettre en évidence, en vraie grandeur et de façon fort convaincante malgré la simplicité du modèle, l'existence d'une solution périodique pour l'évolution des couverts de glace dans les régions arctiques (**partie III**).

Le barème de correction retenu a accordé un poids égal aux deux premières parties d'une part, à la troisième d'autre part ; achever complètement la seule première partie permettait d'obtenir environ 6,5/20. La répartition des notes des candidats français est la suivante :

| | |
|---|---|
| $0 < \mathrm{N} < 4$ | 3% |
| $4 \leqslant \mathrm{N} < 8$ | 20% |
| $8 \leqslant \mathrm{N} < 12$ | 40% |
| $12 \leqslant \mathrm{N} < 16$ | 28% |
| $16 \leqslant \mathrm{N} \leqslant 20$ | 9% |

La moyenne s'établit (candidats français) à près de 10,71 avec un écart quadratique moyen de 3,69. L'épreuve s'est donc révélée sélective, tout en étant globalement bien réussie par les candidats, alors qu'elle abordait une partie du programme assez rarement évoquée à l'écrit dans les annales. Le nombre de très faibles notes est limité, les premières questions étant de simples applications des lois fondamentales vues en cours et, semble-t-il, retenues convenablement. Les correcteurs ont rencontré également un nombre très significatif de « bonnes » ou « très bonnes » copies.

## Première partie

*Rares sont les copies qui obtiennent le maximum de points.*

En fait, dès la première question explicitant le phénomène de diffusion thermique, les réponses traduisent à la fois la maîtrise globale des équations (même si le bilan élémentaire demandé est quelquefois bien rapidement établi, ou établi dans un contexte non unidimensionnel, ou avec une erreur de signe...) et un manque de recul dès qu'il s'agit d'interpréter physiquement, par exemple, l'origine des conditions aux limites. Postuler l'uniformité de température dans l'eau semble généralement illégitime (on se demande d'où viendraient les gradients oscillants souvent invoqués) ; de même les causes du mouvement de l'eau (avant tout, un simple effet de pression à l'interface) sont rarement explicitées correctement.

L'équation reliant l'évolution de la position de l'interface au gradient de température, donnée au **I.2.c**, est évidemment une équation-clef pour la suite. Rares sont les candidats qui y parviennent par la démarche pédestre et sûre proposée dans le texte. En fait, beaucoup confondent bilan enthalpique et bilan énergétique, sans justification (on est à pression contrôlée), ou se perdent dans des éléments différentiels dont ils ne perçoivent pas l'importance. Cette question, difficile, a été notée avec mansuétude.

On proposait ensuite d'effectuer l'approximation quasi stationnaire, évidemment justifiable aisément par l'expérience si l'on veut appliquer le modèle aux couverts de glace terrestres... La différence avec un régime permanent est rarement perçue. En revanche l'équation de diffusion est écrite et résolue dans la plupart des copies. L'application numérique demandée, qui permet d'illustrer le phénomène et de préparer les interprétations ultérieures, est effectuée le plus souvent avec justesse : l'épaisseur croît lentement de 0,19 m le premier jour pour atteindre 2,60 m après un semestre, ce qui valide a posteriori l'approximation effectuée.

Il convient de rappeler à ce stade que l'intitulé des questions **I.3.b**. et **c**. est non ambigu : « déduire » (au **b**. et **c**.) signifie qu'une démonstration algébrique est requise ; « montrer que » exige également d'autres considérations que le simple remplacement par la solution proposée, à moins que les candidats n'invoquent à bon escient des théorèmes mathématiques sur les équations différentielles (était-ce bien indispensable ?) dont ils doivent alors préciser l'énoncé et vérifier les conditions d'applicabilité. Cette remarque importante vaut également pour les questions plus difficiles **II.3.** et **III.2.b**...

### Deuxième partie

*Assez bien réussie également par l'ensemble des candidats, la deuxième partie exigeait cependant des réponses simples mais précises aux questions posées.*

Au **II.1**, les profils de température attendus sont linéaires dans les deux milieux. À l'interface, évidemment la température est constante (nous sommes au même point) mais aussi le flux thermique, a priori non égal au gradient de température... On obtient ainsi une double expression du courant d'énergie, qui permet d'éliminer la température inconnue à l'interface (**II.2**) et d'écrire l'équation d'évolution de $\xi(t)$. Il s'agit d'une équation à variables séparées, du second degré en $\xi(t)$, simple à résoudre. La longueur $\xi_n$ (positive) intervenant dans l'expression fournie résulte des conditions aux limites. Elle vient retarder la croissance des couverts de glace, pour laquelle, donc, la neige joue un rôle relatif d'autant plus important que les durées considérées sont brèves.

On peut, bien sûr, féliciter quelques candidats perdus dans les alternances de signes aux questions 1 et 2 d'avoir vu et annoncé leur erreur, puis su, sans doute par des considérations physiques, retrouver les signes convenables lorsqu'il s'est agi d'obtenir la solution donnée au 3. Mais pourquoi tant d'autres, qui pratiquent de même en catimini, croient-ils que leur démarche illicite passera inaperçue ?

**Troisième partie**

Résoudre jusqu'au bout la troisième partie exigeait des qualités d'ordre et de méthode dans la succession des réponses, et de soin dans les applications numériques : celles-ci, en s'enchaînant, pouvaient rendre peu exploitables les résultats obtenus dans les dernières questions si l'on ne prenait pas garde à de grossières erreurs de troncature.

Une approche trop hâtive de la première question (*première phase* de la **saison froide**) conduisait à l'échec, pour deux raisons principales :

- Au **III.1.a**, l'augmentation $dT$ de température de surface de la banquise ne se traduit pas par une augmentation globale de sa température de $dT$, puisqu'à son autre extrémité la température est invariable... un modèle linéaire simple et une intégration (ou un raisonnement de moyenne) introduit un facteur correctif $1/2$. Moins d'une copie sur deux le remarque.
- Au **III.1.b**, et dans la suite, il faut tenir compte de la modélisation des échanges avec l'atmosphère, qui vient se substituer, et non s'ajouter, au terme établi dans les parties précédentes. Là encore, moins d'une copie sur deux le comprend.

On obtient alors pour l'évolution de $T(t)$ une équation différentielle homogène du premier ordre à coefficients constants, qui permet le refroidissement attendu de la banquise jusqu'au changement de régime... et un tableau de résultats numériques dans lequel la conversion des durées en jours (plutôt qu'en millions de secondes) apportait une lisibilité bien supérieure (le jour, symbole $d$, est une unité non SI en usage avec le Système international d'unités valant 86400 s ; voir www.bipm.org).

Les correcteurs ne peuvent s'empêcher de souligner à nouveau le caractère vain des corrections de dernière minute : les candidats n'ayant pas perçu l'importance de la condition fixée à l'autre limite de la banquise, et donc manqué le facteur $1/2$, pouvaient s'en apercevoir à la **question III.3**, puisque l'expression qu'ils obtenaient alors différait de celle du texte. En rajoutant à la hâte, sans justification réelle, un facteur 2 (parfois en position aléatoire) dans les expressions, en se trompant alors dans les applications numériques, pensent-ils vraiment convaincre les correcteurs de leurs facultés de compréhension, de leur aptitude à progresser, pas à pas, vers la solution maîtrisée d'un problème physique ? En résumé, croient-ils vraiment obtenir des points de la sorte ?

Dans la *deuxième phase*, la croissance du couvert de glace reprend, et une succession d'expressions algébriques un peu lourdes (souvent mal maîtrisées) conduit au résultat proposé dans l'énoncé : il faut exprimer en fonction de $h$, qui intervient dans la température, le gradient thermique, écrire puis intégrer compte tenu des conditions initiales l'équation différentielle en h obtenue ; il faut enfin résoudre l'équation du second degré en $h$. En fin de période, l'épaisseur de la banquise a augmenté de façon monotone, d'autant plus fortement et rapidement que l'épaisseur initiale était faible (lois non linéaires). Les remarques exprimées plus haut pour la résolution de l'équation différentielle au **I.3** s'appliquent pleinement à la question **III.2.b**.

Lorsqu'arrive la **saison chaude**, que très peu de candidats ont abordée, la banquise commence par se réchauffer, avant de fondre ; reprendre l'équation du **III.1.b** conduit immédiatement à la solution (équation du premier ordre en $T$, à coefficients constants). Bien évidemment la durée du réchauffement est d'autant plus grande que l'épaisseur en début de période est plus importante, donc que l'épaisseur est plus importante.

Dans la *dernière phase*, la banquise fond : l'équation d'évolution de son épaisseur est établie en écrivant à nouveau un bilan thermique, compte tenu de l'expression postulée constante du flux d'énergie incident. La décroissance linéaire trouvée, combinée avec les résultats obtenus au **III.2** pour connaître l'épaisseur en fin de saison froide, et avec les résultats obtenus aux **III.3** et **III.2** pour apprécier la durée pendant laquelle s'opère la fusion, permettent d'obtenir l'épaisseur attendue en fin de cycle annuel. Les trois épaisseurs initiales testées de 1 m, 3 m, 5 m, conduisent en fin de cycle pour la plus faible à une augmentation, pour la plus forte à une diminution... ce qui suggère l'existence d'une solution intermédiaire périodique stable (proche de 3 m d'ailleurs) à l'échelle de l'année.

Ces valeurs, issues d'un modèle très approché, n'ont rien de déraisonnable... De très rares candidats l'ont remarqué, et ont achevé convenablement cette troisième partie.

Les **conclusions** évoquées l'an passé restent pertinentes :

– les candidats sont assez bien préparés, bien qu'ils soient fort peu à l'aise pour bâtir des bilans sur des volumes ou à travers une surface élémentaires : maîtrisent-ils vraiment la notion de flux ?

– ils manquent cependant du bon sens et du recul nécessaires pour appréhender l'applicabilité au monde réel de leurs déductions ; il nous semble cependant que des croissances de banquise de l'ordre du micromètre par mois, ou inversement de l'ordre d'une dimension interstellaire, ne devraient pas être données sans commentaire critique !

– par ailleurs la rédaction d'une épreuve de physique suppose une maîtrise élémentaire de la syntaxe (une phrase comporte a priori un sujet, un verbe conjugué, quelquefois un complément) et de l'orthographe (l'expression NRJ – il faut épeler à voix haute – rencontrée à plusieurs reprises, n'évoque pas pour les correcteurs une grandeur physique, mais constitue l'intitulé d'une station radiophonique...).