Physique 1

Présentation du sujet

Cette épreuve, intitulée « *À propos de l'environnement marin* », traite de l'énergie thermique des mers (ETM) récupérable en exploitant, d'une part, le différentiel de température des océans entre les eaux de surface et les eaux profondes afin de produire de l'électricité, et, d'autre part, des vagues de surface.

Le but du sujet est double : déterminer le rendement thermodynamique d'une centrale ETM fonctionnant sur un cycle virtuel, puis étudier les vagues (naissance, propagation et réfraction) en termes d'ondes progressives transverses de la surface libre de l'eau de mer.

En s'appuyant sur un prototype de centrale ETM installé à La Réunion – nécessitant de lourds investissements, pâtissant d'un faible rendement et se trouvant encore en phase de recherche et développement – ainsi que sur l'étude des vagues à la surface des océans, le sujet est très concret.

Ce sujet se décompose en deux grandes parties indépendantes.

- La première partie, intitulée « *L'énergie thermique des mers* », consiste en l'étude thermodynamique générale d'une machine motrice ditherme (schéma synoptique, rendement de Carnot) puis en l'étude appliquée du prototype installé à La Réunion. Le but de cette partie est de déterminer la valeur numérique d'un rendement, surestimé, grâce aux principes de la thermodynamique industrielle. Cette partie appelle un questionnement relativement classique.
- La deuxième partie, intitulée « *Naissance et propagation de la houle* », consiste en l'étude de la naissance des vagues à la surface de l'océan sous l'effet du vent puis de leur propagation en eau profonde – ou pas – lorsque le vent est tombé et enfin de leur réfraction au voisinage des rivages par la bathymétrie. Cette partie est plus calculatoire, plus théorique et difficile que la première mais beaucoup de résultats intermédiaires sont fournis dans l'énoncé.

Le sujet comportait également une question d'informatique – très abordable – qui consistait à compléter un programme Python permettant de résoudre une équation différentielle du type $\frac{dy}{dx} = f(x)$ par la méthode d'Euler.

Il comporte de nombreuses questions de cours ou des applications directes. Aucune connaissance hors-programme n'est requise pour traiter la totalité du sujet. La thermodynamique générale de PCSI et industrielle de PC, la mécanique des fluides de PC, la physique des ondes de PC ainsi qu'un peu d'optique géométrique de PCSI doivent être maîtrisées pour réussir cette épreuve.

Remarquons également que cette épreuve introduit de nombreuses grandeurs avec leur symbole associé. Encore plus que d'habitude, il est évident que les candidats devaient absolument respecter les notations de l'énoncé.

Analyse globale des résultats

Le sujet, plutôt long, a été abordé en totalité par peu de candidats. Les résultats auraient dû être meilleurs dans la mesure où les nombreuses questions de cours et applications directes auraient dû être bien plus profitables.

Concernant la partie A, le modèle de la machine thermique envisagé semble complexe sur la figure 2, mais l'étude se révèle plutôt accessible et basée sur des diagrammes thermodynamiques à exploiter de façon tout à fait usuelle. Les questions sont explicites et reposent principalement sur la bonne maîtrise de la

lecture des diagrammes et du premier principe pour un écoulement. Cette partie est largement abordée dans une grande majorité des copies. Les candidats ont dans l'ensemble les compétences requises. La démonstration du premier principe pour un écoulement dans son intégralité reste délicate pour la quasi-totalité des candidats. Les commentaires sur les signes des puissances manquent trop souvent de précision.

Dans la partie B, les capacités de calcul sont davantage testées. Dans les copies, le jury note une plus grande difficulté à avancer par rapport à la précédente partie par manque d'aisance sur des outils de calcul (opérateurs, accélération convective) et sur l'expression et l'exploitation des équations différentielles et des conditions limites pour l'écoulement d'un fluide parfait (très souvent confondu avec un fluide visqueux). Les développements théoriques semblent faire perdre la compréhension physique des phénomènes à beaucoup de candidats. Les phénomènes dispersifs ou non sont encore difficiles à commenter.

Un trop petit nombre de candidats est capable de mener rigoureusement une démonstration de A à Z sans oublier une hypothèse, une flèche sur un vecteur, etc...

Trop nombreux sont encore les candidats qui ne répondent que partiellement aux questions, notamment lorsque celles-ci contiennent plusieurs sous-questions.

Concernant l'utilisation des outils mathématiques, le jury a constaté :

- beaucoup de confusions entre vecteur, norme et projection ;
- des erreurs d'applications numériques qui auraient dû être décelées avec un minimum de bon sens.

Le jury a noté un relâchement dans la présentation des copies : 228 copies sur 3585 (6,4% des copies corrigées contre 5,9% l'année passée) ont été « malussées » à cause d'une écriture approximative (avec par exemple une difficulté pour le correcteur à différencier un « y » d'un « z », ou encore un « d » d'un « δ »), des résultats non encadrés, des ratures rendant le suivi des démarches compliquées. Dans l'écriture des expressions littérales, il y a un manque évident de respect des notations de l'énoncé : par exemple, lorsque plusieurs débits sont présents dans le contexte, l'expression littérale ne peut pas se contenter de faire apparaître « D_m » mais doit mentionner plus précisément « $\dot{m}_1$ » ou « $\dot{m}_3$ ».

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Les candidats armés d'une bonne connaissance du cours, d'un bon sens physique et d'une bonne maîtrise des techniques habituelles de calcul ont obtenu une bonne voire une excellente note à cette épreuve.

Vu la structure du sujet, un candidat, moyen ou faible, pouvait se relancer régulièrement et se remettre en confiance :

- par exemple dans la première partie, il était aisé de repérer quelques étapes du cycle sur les diagrammes, d'obtenir quelques températures, entropies et enthalpies massiques pour remplir le tableau du document réponse. Il était aussi assez évident d'exprimer pour quelques étapes des puissances thermiques ou utiles en fonction des enthalpies massiques et des débits massiques adéquats ;
- dans la deuxième partie, il était facile de trouver les vitesses de phase et de groupe dans la sous-partie VI et de justifier quelques-unes des égalités proposées par l'énoncé dans la sous-partie IV.

Partie A – L'énergie thermique des mers

I - Généralités

Q1. Beaucoup de candidats donnent des signes de Q_c , Q_F et W en désaccord avec le sens des flèches dessinées sur leur schéma synoptique. Il y a bien trop de confusions entre sens conventionnel et sens réel des échanges d'énergie. Notons également que la machine ne fournit pas « de travail au travail » !

Q2. Aucune démonstration n'était demandée ici. Quelle perte de temps pour les candidats qui s'y lancent !

Même si la formule du rendement d'une machine motrice de Carnot $r = 1 - \frac{T_f}{T_c}$ est bien connue, il semble loin d'être évident que les températures doivent être exprimées en kelvins pour réaliser l'application numérique. À ce propos, certains candidats ne semblent pas choqués d'avoir un rendement avoisinant les 80% pour une différence de température $T_c - T_f$ de 20 °C. Les commentaires explicitement demandés par l'énoncé doivent être un peu étoffés, les commentaires apportés sont souvent très vagues. Par exemple, le commentaire d'un rendement de machine thermique ne peut se réduire à un « rendement très grand (ou très faible) » sans mention à un ordre de grandeur connu.

Q4. Le cadre d'étude n'est pas toujours bien explicité. Souvent, au moins un de ces items n'est pas abordé : hypothèses, définitions des notations, sens des axes (profondeur ou altitude). Un certain nombre de candidats a bien retenu l'ordre de grandeur d'augmentation de la pression sous l'eau : +1 bar tous les 10 m.

Q5. Beaucoup de candidats confondent rendement et rentabilité, confondent énergie non polluante et énergie renouvelable.

II - Centrale ETM en cycle fermé

La lecture des diagrammes thermodynamiques est plutôt satisfaisante mais attention à respecter les notations de l'énoncé dans les résultats.

Q6. Une confusion fréquente entre le point triple et le point critique – qui est d'ailleurs trop souvent mal défini – est relevée. L'état supercritique d'un fluide n'est pas « la coexistence des phases liquide et vapeur ».

Q8. L'enthalpie massique de vaporisation n'est pas l'enthalpie massique de la vapeur saturante : beaucoup trop de candidats n'identifient pas $\Delta_{h_{vap}}(T)$ à la longueur du palier isotherme du domaine diphasé liquide-vapeur.

Q9. Cette question n'est quasiment jamais correctement traitée.

Q16. Il s'agit de redémontrer le premier principe industriel... et non de l'utiliser de manière tautologique. Une démonstration complète est attendue. Ce sont les variations d'énergie mécanique qui sont négligées, pas l'énergie mécanique elle-même. Trop peu de candidats définissent correctement le système fermé à partir du système ouvert, des masses élémentaires de fluide δm_e et δm_s respectivement entrante et sortante dans la zone active de la machine entre t et $t + dt$. Une confusion fréquente entre système fermé et système ouvert est d'ailleurs constatée. Attention à ne pas mélanger les symboles Δ , δ et d dans la formulation infinitésimale du premier principe ! Beaucoup d'expressions nonhomogènes sont observées en raison de quantités massiques mal utilisées.

Q18. L'argument « évaporateur globalement calorifugé », pourtant essentiel, est souvent omis.

Q20. Le jury constate le manque de l'argument « pas de pièce mécanique mobile ».

Partie B – Naissance et propagation de la houle

III - Mise en équation et linéarisation

Q28. et **Q29.** Ces questions sont plutôt bien traitées.

Q30. Le développement à l'ordre 1 est ici souvent mal mené. La simplification de l'accélération convective est souvent peu ou mal justifiée.

IV - Conditions limites

Le jury rappelle que la nullité de la dérivée d'une fonction en un point n'implique pas la constance de la fonction en ce point.

Q31. L'eau étant un fluide parfait (donc en écoulement parfait), seule la composante normale de sa vitesse doit s'annuler au voisinage immédiat du fond de l'océan. Il faut absolument préciser l'altitude de validité dans l'écriture de la condition limite demandée : le jury, s'attendant à une réponse du genre $\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0$, n'a pas toléré la réponse $\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} = 0$.

Q32. Un nombre non négligeable de candidats confond $\bar{v}_2$ et $\bar{V}_2$.

V - Condition de démarrage des oscillations

Q35. Cette question a posé plus de difficultés que prévu : beaucoup de candidat oublient la condition sur $\Delta\varphi_2$.

Q36. Certains candidats, malins, cherchent directement une solution de l'équation différentielle sous la forme $\Phi_1(z) = A \cosh(kz + B)$. Cette méthode, parfaitement valide mathématiquement, leur fait gagner des minutes de calculs. Morale : toujours réfléchir avant de se lancer tête baissée dans un long calcul.

Q39. à **Q41.** Ces questions sont peu traitées et peu réussies quand elles sont abordées.

VI - Propagation de la houle sans vent

Q42. L'une des simplifications du calcul nécessite de justifier que $\tanh(kh) < 1$. Cette justification n'est que très rarement citée.

Q43. et **Q45.** Aucun long développement mathématique ne doit être rédigé pour justifier les développements limités de $\tanh(kh)$ ou sa limite en l'infini. D'ailleurs, le jury voit de nombreuses fois l'affirmation suivante : « $\tanh(kh) \rightarrow -1 \Leftrightarrow kh \ll 1$ ».

Beaucoup de candidats ne connaissent pas la définition de la vitesse de groupe et/ou de la vitesse de phase ou ne citent pas leur définition avant de les calculer. La réponse, fautive, « La propagation est dispersive car k dépend de ω » est souvent lue.

Q44. La notion d'étalement du paquet d'onde en milieu dispersif est bien connue, mais le choix de la bonne figure est très peu réussi, la plupart des candidats affirmant « voir » que la vitesse de phase est plus grande que la vitesse de groupe. Il faut une justification bien plus rigoureuse.

VII - Réfraction de la houle par la bathymétrie

Peu de candidats abordent avec succès cette partie malgré le fait qu'elle soit assez indépendante du reste du sujet.

Q49. La loi de Snell-Descartes sur la réfraction est trop souvent appliquée directement entre $x = 0$ et un x quelconque. Cette démonstration, bien qu'elle donne directement la bonne réponse, est fautive.

Q50. L'approximation des petits angles n'a rien à faire ici.

Q51. La sous-question sur le script Python est peu abordée, ce qui est compréhensible au vu de sa position dans le problème et de son isolement par rapport au reste du sujet.

Q52. Cette question n'est quasiment jamais traitée.

Conclusion

Le jury propose quelques conseils à tous les futurs candidats.

Un sujet tel que celui-ci illustre l'importance fondamentale de l'apprentissage du cours : beaucoup de points peuvent être glanés facilement en citant ou en appliquant simplement le cours.

Parcourir l'intégralité du sujet lors d'une première lecture rapide : cela permet de s'imprégner du sujet et de repérer les questions faciles, à la portée de beaucoup de candidats. Ensuite, il faut toujours s'assurer de bien avoir compris un énoncé quitte à le relire plusieurs fois.

Des efforts simples de rigueur et de précision permettraient d'améliorer nettement les résultats :

- référencer correctement les questions traitées ;
- utiliser les notations de l'énoncé et/ou définir des grandeurs non déjà définies dans l'énoncé ;
- préciser davantage les hypothèses lorsqu'elles sont nécessaires pour développer les calculs (masse volumique constante, etc.) ;
- faire précisément le lien entre les résultats et les phénomènes physiques étudiés lorsqu'un commentaire est demandé ;
- justifier avec précision les simplifications de certains termes dans les équations étudiées ;
- ne pas négliger les applications numériques.

Il ne faut vraiment pas hésiter à lire les rapports du jury et les critères de malus de présentation des copies.

Bien que ce rapport mentionne principalement les écueils à éviter, le jury souligne combien il a été satisfait devant certaines copies, excellentes aussi bien sur le fond que sur la forme. Que tous leurs auteurs soient remerciés pour avoir donné le meilleur d'eux-mêmes durant cette épreuve et pour avoir donné à lire de très belles compositions. Nul doute qu'ils sauront relever les défis technologiques du XXI^e siècle après leurs études au sein des grandes écoles et qu'ils auront à cœur de transmettre le fruit de leurs travaux.