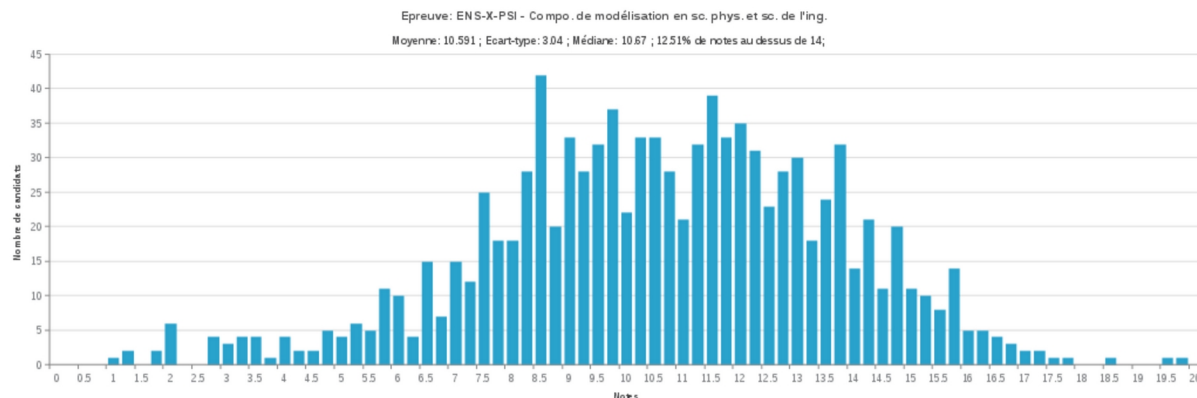


Épreuve de modélisation en Sciences Physiques et Sciences de l'ingénieur

Rapport de Jury

Présentation générale

L'épreuve de modélisation, d'une durée de 5 heures, a porté cette année sur l'étude d'un système de valorisation de l'énergie thermique : le stockage thermique par thermocline et la cogénération thermo-électrique. Le sujet s'appuyait sur des connaissances transverses aux sciences de l'ingénieur, sciences physiques, informatique et mathématique. Mettre en œuvre et synthétiser des connaissances dans ces différentes disciplines constitue l'originalité de cette épreuve et permet d'apprécier la qualité des candidats en vue d'une poursuite d'étude au sein de l'École Polytechnique ou des Écoles Normales Supérieures.



Le sujet comportait trois grandes parties :

- la partie 1, qui ne comportait pas de question, introduisait la problématique du stockage thermique de type thermocline ;
- la partie 2 traitait de la modélisation d'un stockage thermique de type thermocline. Le premier point portait sur l'étude de faisabilité d'un tel stockage en évaluant l'autodécharge. Le sujet abordait ensuite la modélisation du transfert thermique au sein de l'enceinte constituée d'un matériau poreux. Enfin, il conduisait à l'évaluation de la puissance effectivement stockée, pour terminer avec une notion de rendement sur cycle.
- la partie 3 concernait un système de conversion thermique-électrique. Ce dispositif peut être associé au stockage afin de convertir la chaleur stockée en électricité. L'étude de ce convertisseur, de type Stirling à double effet, nécessitait une première partie focalisée sur sa modélisation thermodynamique. Une seconde phase traitait de la modélisation électromagnétique de la génératrice synchrone, convertissant le mouvement en électricité.

Ces deux phases de l'étude étaient reliées par des questions visant à établir les conditions d'oscillations auto entretenues de l'ensemble.

La sujet comportait 53 questions sur 17 pages.

Retours généraux et statistiques

Le jury tient tout d'abord à souligner que, pour la deuxième année consécutive, la propreté des copies s'est très fortement dégradée. Beaucoup trop de candidats n'accordent pas suffisamment de soin à la rédaction, certaines copies étant même illisibles. Les résultats ne sont que trop rarement encadrés. Pour les questions portant sur les parties informatiques du programme, il est demandé de respecter la structuration du langage Python, et de respecter les indentations nécessaires à une bonne compréhension syntaxique.

Afin de diminuer l'interdépendance des questions, beaucoup étaient rédigées sous la forme «Montrer que... ». Le jury a été surpris par le nombre de copies qui, malgré de nombreuses erreurs de calculs, arrivaient miraculeusement au bon résultat. Il est rappelé que ce comportement est largement sanctionné par les correcteurs, et ne correspond pas à l'exigence imposée par ce concours.

Retour sur les questions :

Q1

- Question assez bien réussie ;
- on déplore que la surface d'échange ne soit pas toujours explicitement définie par les candidats ;
- on tient aussi à mentionner les difficultés pour réaliser l'application numérique.
- L'analogie avec la loi d'Ohm ne doit pas conduire à une résistance thermique en Ohm.

Q2

- L'identification de la puissance des pertes au flux sortant a été relativement bien comprise.

Q3

- Question d'application du cours pour établir une équation différentielle de conduction, assez bien réussie ;
- les applications numériques ont déjà montré quelques faiblesses de certains candidats, avec des ordres de grandeurs de résultats rarement discutés, bien que parfois absurdes.

Q4

- Cette question d'interprétation du résultat de la question précédente a été trop souvent traitée de façon imprécise. On rappelle qu'il est impératif de préciser sur quel paramètre agir et comment pour que cela ait un sens. Les affirmations de la forme « il faut modifier X » ne sauraient être acceptables.

Q5

- Beaucoup de candidats ont eu des difficultés pour établir l'équation de conduction en tenant compte de la porosité du matériau, en introduisant notamment une longueur caractéristique de la porosité pour adapter la loi de Newton ;
- nous avons vu beaucoup de propositions avec des coefficients inhomogènes, impliquant trop souvent des éléments différentiels.

Q6

- On rappelle que l'homogénéité de deux expressions est simplement une pré-condition à leur égalité et qu'une analyse dimensionnelle seule ne permettait pas ici de conclure ;
- il fallait s'appuyer sur la masse d'air et le débit d'air.

Q7

- Les notions de « conditions initiales » et « conditions aux limites » sont manifestement confuses pour beaucoup de candidats ;
- beaucoup d'erreurs en imposant la température du fluide en L ;
- beaucoup de syntaxe python absurdes, comme :

```
for k in X:  
    U[k][0] = ...
```

alors que X est un tableau de flottants ;
- peu de syntaxes correctes tiennent compte des spécificités des tableaux numpy, en particulier des coupes de lignes $U[0, :]$ ou de colonnes $U[:, 0]$ en utilisant le *slicing*.

Q8

- Rares sont les copies sur lesquelles apparaissent une relation de récurrence ;
- beaucoup de schéma de dérivée seconde erronés.

Q9

- La notion d'effet de bord d'un schéma numérique n'est pas connue de tous.

Q10

- Question peu abordée ;
- la complexité spatiale des calculs n'est pas une notion claire pour tous les candidats ;
- les candidats comparent souvent la place mémoire estimée pour le stockage des tableaux U et V avec la taille des disques durs, alors qu'ils doivent être en RAM.

Q11

- Il n'a pas été évident pour tous les candidats que l'énergie était stockée par les roches (solides) ;
- on regrette beaucoup d'oublis de la température ambiante comme référence.

Q12

- Question assez bien réussie ;
- on regrette là encore beaucoup d'oublis de la température ambiante comme référence.

Q13

- Question d'analyse
- Assez peu de candidats ont parlé clairement de déplacement d'un gradient thermique, d'une thermocline ou d'un front thermique.

Q14

- Question d'analyse.
- Assez peu de candidats ont fait le lien avec la Q12.

Q15

- Question bien réussie.

Q16

- Comme pour la Q11, il n'a pas été évident pour tous les candidats que l'énergie était stockée par les roches (solides) et des oublis de la température ambiante comme référence.

Q17

- Question bien réussie ;

- cette énergie minimale stockée n'a pas souvent été comprise comme un « talon d'énergie ».

Q18

- Question de cours, bien réussie. Quelques applications numériques ont été données sans unité physique.

Q19

- Question bien réussie ;
- on note tout de même quelques tracés en dehors du domaine de définition $[0,L]$.

Q20

- Question assez bien réussie ;
- mais peu de candidats mentionnent que cette température moyenne est proportionnelle à l'énergie stockée.

Q21

- Question bien réussie.

Q22

- Question bien réussie ;
- mais des tracés souvent non gradués avec des valeurs numériques, tant en abscisses qu'en ordonnées.

Q23

- La plupart des candidats a bien identifié une série de Fourier, mais sans explicitement mentionner que les $A_n(t)$ capturaient les évolutions temporelles ;
- aucune difficulté n'a été relevée sur l'établissement de l'équation différentielle.

Q24

- Question assez bien réussie ;
- on note quelques maladroites de calcul de certains candidats pour vérifier l'orthogonalité au sens du produit scalaire donné.
- Quelques uns oublient de vérifier le cas $n=m$.
- Une étude complète est nécessaire pour bien réussir la question: une réponse du type « l'intégrale est nulle car la fonction cosinus est périodique » est insuffisante.

Q25

- Le fait que la température finale corresponde à la moyenne A_0 n'a pas été identifié par tous ;
- la parité du signal suffisait à justifier l'absence des termes en sinus, de coefficients B_n ;
- on note quelques maladresses de calcul de certains candidats pour déterminer les expressions des A_n .
- Le sujet comportait une coquille dans les expressions fournies pour les coefficients de la série de Fourier. Le jury en a tenu compte lors de la correction.

Q26

- Les allures des $A_n(t)$ des candidats ayant trouvé les bonnes expressions étaient souvent correctes ;
- mais les tracés étaient quasi systématiquement non gradués avec des valeurs numériques, notamment en abscisses.

Q27

- Question assez bien réussie pour celles et ceux qui avait identifié une série alternée et en se focalisant sur le premier harmonique.

Q28

- Question d'interprétation physique, qui s'appuie aussi sur les Q11 et Q14 ;
- il s'agissait d'identifier l'augmentation des pertes en fin de charge du fait du déplacement de la thermocline vers la sortie, induisant un ralentissement de la charge du fait de l'augmentation de la température de sortie.

Q29

- Question assez bien réussie.
- Le sujet indiquait d'utiliser le résultat de la question 2 au lieu de celui de la question 12, qui eut donné des expressions plus aisées à simplifier et à interpréter. Le jury en a tenu compte lors de la correction.

Q30

- Question assez bien réussie.

Q31

- Question de synthèse de la partie, pour laquelle les candidats se sont souvent contentés d'une expression du rendement, sans analyser tous les facteurs qui permettraient de l'augmenter.

Q32 et Q33

- Peu de candidats font un bilan des actions mécaniques, ce qui conduit inévitablement à des erreurs grossières, voire des expressions inhomogènes.
- Il est étrange que certains candidats trouvent correctement la réponse à la Q33 mais se trompent sur la Q32 alors que le raisonnement est quasiment identique.

Q34

- L'utilisation de la constante massique des gaz parfaits r a manifestement perturbé quelques candidats ;
- on déplore que la masse ne soit pas universellement identifiée comme une grandeur extensive.

Q35

- Il était attendu une simple mention des pertes de charges ;
- mais ont souvent été citées des conditions d'équilibre thermodynamique ou mécanique.

Q36

- Question assez bien réussie, pour ceux qui ne se sont pas arrêtés aux expressions des volumes V_c et V_f .

Q37

- Question de linéarisation d'une expression donnée, bien réussie.

Q38

- Question assez bien réussie.
- Il fallait considérer la loi de Laplace avec l'indice adiabatique des gaz donné puis linéariser l'expression trouvée ;
- on note quelques mauvais départs avec la loi des gaz parfaits et quelques erreurs de linéarisation.

Q39

- Question assez mal traitée, les candidats se contentant souvent d'arguments imprécis et

sans écrire la moindre équation d'équilibre associée au déplaceur 2, ni discuter les potentielles similitudes avec le déplaceur 1. C'est loin des niveaux de rigueur et de maîtrise scientifique attendus.

Q40

- Question bien réussie ;
- il était nécessaire de donner les expressions des coefficients recherchés ;
- un carré a été oublié au numérateur, pour le p associé au coefficient a_2 . Cet oubli n'a pas eu de conséquence pour les candidats qui ont tous fait comme s'il était présent.

Q41

- Si l'instabilité a correctement été relevée avec les deux pôles à partie réelle positive, moins nombreux ont été les candidats à lier la maximisation de la conversion d'énergie à la fabrication d'un système oscillant (en limite de stabilité).

Q42

- Question assez bien traitée.
- On a noté que beaucoup de candidats se sont appuyés sur le critère de Barkhausen pour établir une condition permettant une limite de stabilité en boucle fermée, au risque de commettre une erreur de signe.

Q43

- On déplore que tous les candidats n'aient pas su nommer ce correcteur dérivateur ;
- si nous avons vu quelques allures de diagrammes de Bode correctes, peu de candidats ont proposé un réglage conforme du correcteur.

Q44

- Question d'analyse, trop souvent limitée à des locutions de la forme « le système est bien oscillant », oubliant de préciser si la pulsation était en adéquation avec l'objectif de maximisation d'énergie à la pulsation de résonance et sans discuter les causes potentielles de l'amortissement observé.

Q45

- Quelques mauvais calculs de la surface, dans le calcul du flux. Quelques inversions sur le signe du flux entre les abscisses en $-a/2$ et $+a/2$.
- Plusieurs tracés de forme sinusoïdale plutôt que triangulaire.

Q46

- Question de dérivation, fort heureusement bien réussie et souvent abordée par des candidats ne traitant pourtant que très peu de questions de la sous-partie.

Q47

- Question assez peu traitée.

Q48

- Question assez bien traitée, même si les expressions de e_2 et e_3 par analogie amène souvent à des expressions non homogènes.

Q49

- Question assez bien traitée.

Q50

- Question peu traitée dans l'ensemble. Très peu de candidats ont trouvé que la force exercée par les 3 phases était constante. L'expression proposée par le sujet pour les trois courants i_1 , i_2 et i_3 comportait une coquille dont le jury a tenu compte lors de la correction.

Q51

- Question souvent abordée en fin de sujet, par quelques candidats

Q52

- Question rarement abordée. Quelques réponses calquées sur la notion de l'adaptateur d'impédance sans voir la véritable spécificité du problème de l'étude.

Q53

- Question de synthèse, très peu abordée.

Conclusion

Le sujet et le thème retenu ont permis de sélectionner les candidats sur une problématique d'un système innovant et pluritechnique faisant appel à des connaissances larges dans diverses disciplines. Ces compétences seront importantes dans leur formation d'ingénieur, d'enseignant

ou de chercheur dans les Écoles Normales Supérieures et à l'École Polytechnique. Cette épreuve permet de classer pertinemment les candidats et d'évaluer leurs capacités d'analyse et d'utilisation des compétences transverses acquises en classe préparatoire aux grandes écoles.

Le jury recommande aux futurs candidats de bien lire les remarques des rapports, chaque année, afin d'aborder dans les meilleures conditions les prochaines épreuves, et de correctement présenter leur copie.

* *

*