

Composition de Physique et Sciences de l'Ingénieur, Filière MP**Rapport de M. Pierre KERVELLA et Elie FAVIER, correcteur.**

Cette épreuve porte sur les méthodes de l'optique adaptative dont l'objectif est de corriger, *en temps réel*, les déformations évolutives et non-prédictives d'un front d'onde grâce à un miroir déformable. Les déformations envisagées ici sont dues à la turbulence atmosphérique, dont l'influence dans la dégradation de l'image reçue par un télescope terrestre est majeure. Le problème est découpé en quatre parties, deux à consonance physique et deux plutôt typées « sciences de l'ingénieur ».

La première partie introduit le problème, et précise le cadre physique de l'optique adaptative. Elle se propose d'établir le lien entre turbulence atmosphérique et diffraction/interférence d'un front d'onde plane. Elle a trait donc à l'optique physique mais aussi à la thermodynamique.

Dans la deuxième partie on se propose de modéliser le comportement mécanique de l'organe central du dispositif : le miroir déformable. De la mécanique vibratoire du point et quelques connaissances sur la modélisation des « systèmes linéaires continus et invariants » sont requis.

La troisième partie expose quant à elle deux dispositifs d'évaluation des perturbations d'un front d'onde plan : le premier (un « Shack-Hartman ») permet une mesure de pentes du profil du front d'onde ; le second analyse pour sa part la courbure du même profil. Au programme donc, essentiellement de l'optique géométrique.

Enfin, la quatrième et dernière partie finalise l'étude du dispositif en se livrant à une exploration de l'asservissement mis en place. C'est le programme d'automatique qui est la cible dans cette approche.

On l'a vu, de nombreux points des programmes de sciences physiques et sciences de l'ingénieur sont abordés, permettant ainsi aux candidats de montrer leur polyvalence face à un problème complexe. Soulignons que les meilleurs copies ont généralement su aborder, avec la même réussite, les différentes parties, et que les candidats « monovalents » n'ont fait seulement qu'illusion. Répétons-le, la maîtrise *équilibrée* des aspects *complémentaires* développés par la physique et les sciences de l'ingénieur sont la clé du succès lors d'une telle épreuve. Le barème retenu offrait d'ailleurs sensiblement autant de points pour les parties 1 et 3 que 2 et 4.

De plus, nous signalons que les différentes parties, bien que liées par le système étudié, sont relativement indépendantes. Il est donc recommandé aux futurs candidats de lire préalablement et de manière approfondie l'énoncé avant de se lancer dans la rédaction de

leur copie.

Examinons maintenant les résultats obtenus : globalement, la moyenne de l'épreuve s'établit à 8,3/20 (7,9/20 pour les candidats français *et* étrangers), avec un écart-type de 3,5 et une répartition de notes selon le tableau suivant :

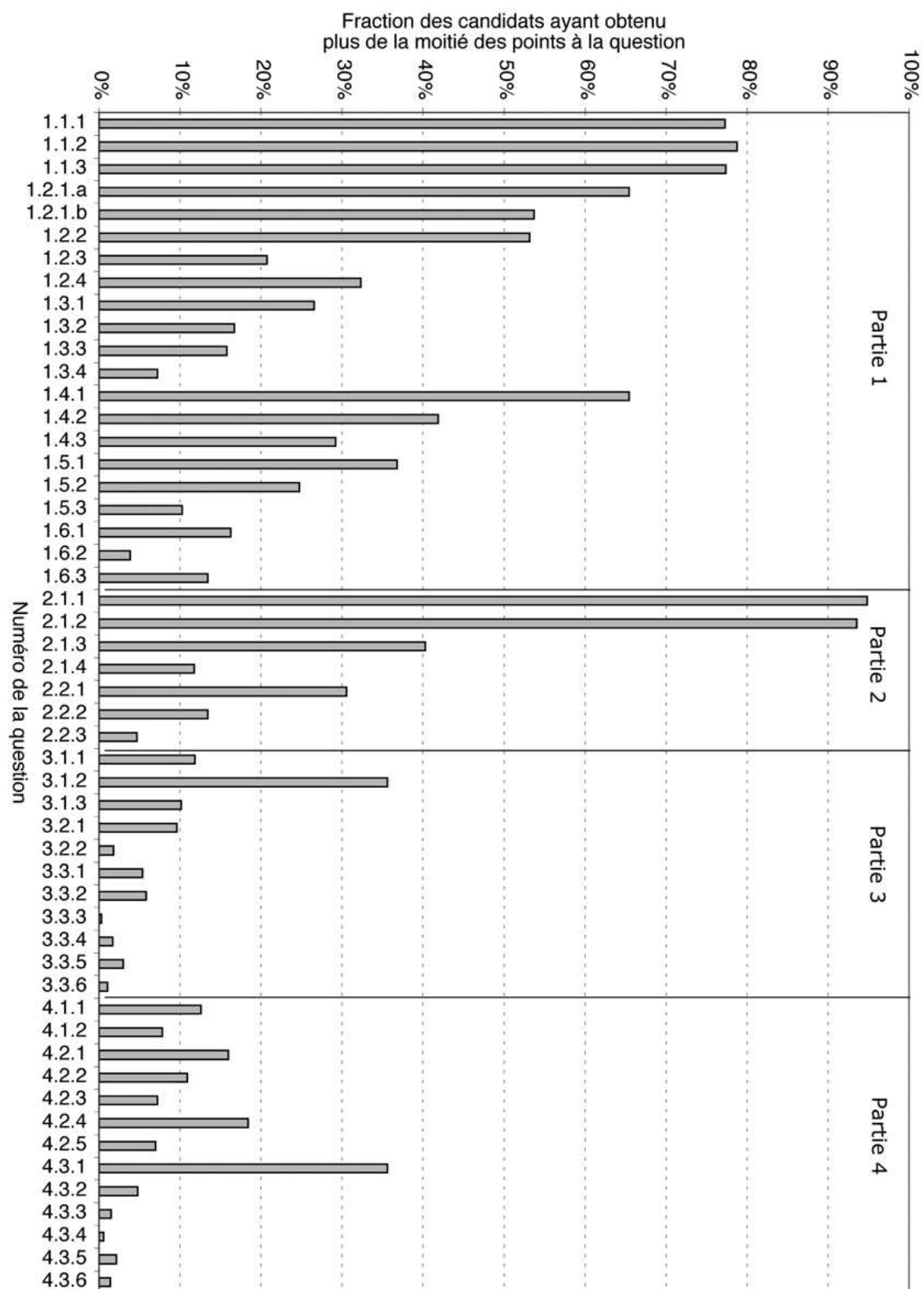
$0 \leq N < 4$	64	9 %
$4 \leq N < 8$	272	38,1%
$8 \leq N < 12$	275	38,6%
$12 \leq N < 16$	86	12,1%
$16 \leq N \leq 20$	16	1,4%
Total	713	100 %
Nombre de copies : 713		
Note moyenne : 8,28		
Écart-type : 3,43		

Le graphique de la page suivante affine les résultats globaux en précisant la réussite individuelle aux différentes questions. C'est un outil destiné aux futurs candidats en vue d'évaluer le degré de sélectivité des différentes questions du sujet. En particulier on peut y voir quelles auront été les questions discriminantes.

Avant de rentrer dans le détail des différentes questions, nous soulignons que la qualité de la rédaction, même si elle n'intervient pas directement dans la notation, nuance souvent la note obtenue sur chaque question. Nous entendons par « qualité de la rédaction » la faculté d'une copie à présenter synthétiquement sa démarche dans la résolution de la question posée. Trop de copies font état d'une rédaction abrupte (on rentre directement dans les calculs - pour se rassurer ? - sans donner la ligne directrice de la démarche), ce qui est la marque, bien souvent, d'une compréhension trop superficielle aussi bien du sujet que des outils employés. Les copies réussies vont, en ce sens, très sûrement et efficacement d'arguments scientifiques *ad hoc* jusqu'au résultat final. À ce titre, l'utilisation de schémas pertinents est souvent bénéfique.

Partie 1. Formation d'image et turbulence

- 1.1 Simples questions de cours qui avaient pour but de mettre en place le cadre physique du problème. Pourtant trop de candidats y ont perdu des points ou du temps. Une parfaite connaissance du cours alliée à une certaine efficacité sont incontournables pour réussir des telles épreuves. Déjà la sélection s'opère...
- 1.2 Encore du cours (fentes d'Young) qui faisait intervenir le rôle des interférences. La plupart des candidats qui ont franchi simplement les questions précédentes n'ont eu aucun problème à conclure ici. Remarquons par ailleurs que l'absence totale de schémas a desservi de nombreux candidats (notations non précisées, erreurs de compréhension de la configuration, *etc*).



- 1.3** Partie plus délicate qui a permis de faire une sélection importante. Après un passage à peine technique les meilleurs candidats ont pu faire preuve de toute leur compréhension du problème pour aboutir à une dimension caractéristique limitant la précision d'un télescope.
- 1.4** Partie plus facile qui a remis en selle beaucoup de candidats. Pourtant de nombreux points y ont été perdus à cause d'erreurs dans les applications numériques. Nous rappelons qu'au delà d'une simple valeur numérique, les grandeurs manipulées en physique possèdent des *unités* et des *ordres de grandeur*.
Des difficultés sont apparues également dans le calcul d'une différentielle (la différentielle logarithmique est à ce titre trop méconnue) : des problèmes techniques de cet ordre ne doivent pas constituer des handicaps, faisant ainsi d'une question simple un filtre véritablement sélectif. Enfin, la masse molaire de l'air n'est pas fournie par l'énoncé. Il nous semblait que sa connaissance faisait partie de la culture scientifique de base d'un étudiant sérieux, mais visiblement nombre de candidats présentent des lacunes sur ce point.
- 1.5** De la physique « avec les mains » : avec un raisonnement sûr et quelques schémas bien sentis, cette partie devient une formalité.
- 1.6** Peut-être la composante la plus discriminante de la partie 1. Il s'agit de faire la synthèse de tout ce qui précède pour évaluer le gain potentiel assuré par l'optique adaptative sur la résolution angulaire puis d'interpréter les clichés de la figure 3. Nous comptons la présence de quelques excellentes copies, qui, après une partie 1 quasi-parfaite, concluent en apothéose sur cette question.

Partie 2. Fonction de transfert d'un miroir déformable

- 2.1** Que du très classique. Pourtant l'expression de la force de rappel générée par un ressort est souvent mal justifiée (expression et signe) alors que tout est fait dans l'énoncé pour faciliter son obtention.
Par ailleurs l'écriture du principe fondamental de la dynamique (appellation non officielle) réclame un minimum de soin (précision du système isolé, du référentiel en jeu, du bilan des efforts), surtout lors de sa première apparition dans la rédaction. Un nombre conséquent de candidats se réfugie derrière une rédaction trop rapide (l'air de dire que c'est une évidence), mais cela ne masque pas le manque de maîtrise et de compréhension profonde des bases de la mécanique.
La forme canonique d'une fonction de transfert du second ordre est dans l'ensemble bien connue, encore faut-il commencer par la définir avant d'en donner les caractéristiques (penser au terme d'amortissement pour cela).
Là encore mêmes remarques à propos des applications numériques, en particulier des ordres de grandeurs complètement délirants qui ne gênent en rien les candidats. Quelques points ont été parfois accordés, malgré tout, à ceux qui critiquaient des résultats manifestement faux.
À noter : un diagramme de Bode comprend l'évolution de l'amplitude mais aussi de la *phase* puisque la fonction de transfert est *a priori* complexe. Son importance est capitale pour les questions de stabilité.

De plus encore nombre de copies présentent, avec beaucoup d'assurance, des filtres passe-haut pour des systèmes purement mécaniques...

Enfin, on sent encore un manque d'aisance dans la manipulation des diagrammes asymptotiques de Bode (*cf.* la dernière question).

- 2.2** L'écriture du système différentiel s'est généralement très mal passée chez les candidats, déjà moins nombreux, qui ont tenté d'aborder ces questions. Là encore la définition des déplacements $x_i(t)$ proposés par l'énoncé doit conduire à une écriture simple des équations différentielles.

Attention aux expressions non homogènes pour z (adimensionné), τ_1 et τ_2 (homogènes à un temps) ainsi que τ_i (qui lui n'est pas un temps caractéristique). C'est un réflexe qui permet parfois de rectifier une inexactitude, souvent de critiquer intelligemment une expression.

Une poignée de candidats, bien souvent les meilleurs, ont su invoquer avec à propos les associations série et parallèle pour les ressorts et amortisseurs pour considérablement simplifier des calculs vite lourds. Ceux là n'ont eu aucun mal à traiter la fin de cette partie et examiner les cas limites ($\mu_a \rightarrow 0$: masse soumise à l'effort $f(t)$ et $\mu_a \rightarrow +\infty$: « bâti » situé entre les ressorts et les amortisseurs).

Partie 3. Analyse du front d'onde perturbé

- 3.1** Retour à l'optique, géométrique cette fois-ci, mais toujours pas ou peu de schémas...

Cette partie a été rarement abordée, et pourtant elle est accessible, même sans avoir réussi les parties précédentes. On ne rappellera jamais assez l'intérêt de lire de manière approfondie un énoncé afin, au moins, d'y repérer les questions « cadeaux ». Enfin le grandissement n'usurpe pas son nom, une valeur bien inférieure à l'unité doit alerter tout candidat sérieux.

- 3.2** Questions bien réussies par ceux, peu nombreux il faut dire, qui les ont traitées.

- 3.3** Partie plus subtile qui repose sur une bonne compréhension de la configuration du problème. Mais une fois le bon schéma initial réalisé tout devient plus clair.

Hormis la question 3.3.3 réussie par une demi-douzaine de candidats, tout peut se faire grâce aux résultats donnés par l'énoncé, même en cas d'erreur de signe dans l'expression de $A_{\pm}$.

Partie 4. Boucle d'asservissement de l'optique adaptative

- 4.1** Les considérations attendues ici et concernant des points simples d'analyse *qualitative* d'un système asservi ont perturbé la plupart des candidats. Aucune réponse dans le moins pire des cas, des développements sans fin dans le pire.

- 4.2** Faire apparaître le produit de convolution voulu demande à la fois l'extension du domaine d'intégration à $\mathbb{R}$ mais aussi la mise en place du bon jeu de variables. Revoir la définition d'un tel produit ne serait pas du luxe.

Un manque flagrant de maîtrise des propriétés de base de la transformée de Laplace a rendu délicate ou laborieuse une partie ne présentant pourtant pas de difficultés majeures.

En tous cas on peut aborder la section 4.3 puisque tous les résultats nécessaires issus de la section 4.2 sont fournis ou largement suggérés par l'énoncé.

- 4.3** Quelques petits points pris par la plupart dans l'écriture des fonctions de transfert en boucle ouverte ou fermée : c'est rassurant ! Même si le retard invoqué ici rend originale l'étude de l'asservissement proposé, les définitions relatives aux questions de stabilité (et les marges associées) sont méconnues.

Les plus malins ont repéré le gain évident qu'ils pouvaient retirer de la question 4.3.5 : du cours ou presque sur la précision d'un système présentant un intégrateur.