

Composition de Physique et Sciences de l'Ingénieur, Filière MP

Rapport de MM. Pierre KERVILLA et Elie FAVIER, correcteurs.

Présentation du sujet

Le fonctionnement d'un hélicoptère est basé sur des principes simples, mais la conception de ce type d'aéronef est plus délicate que celle d'un avion du fait de la présence de liaisons mécaniques plus nombreuses et complexes. Le sujet proposé au concours traite quelques aspects de la conception d'un hélicoptère (Parties I et II) et propose l'étude d'un système de contrôle d'altitude asservi à l'accélération verticale de l'appareil (Partie III).

La première partie porte sur les efforts aérodynamiques s'appliquant sur la voilure, le dimensionnement de la motorisation de l'hélicoptère et le fonctionnement du rotor anticouple.

À partir de la forme de la voilure et de la masse à soulever, l'objectif est d'évaluer la puissance nécessaire pour lancer la voilure (questions **I.1-I.9**) et assurer le décollage de l'appareil (**I.10-I.12**). Les notions de base de l'aérodynamique nécessaires sont données dans l'énoncé sous la forme de l'expression de la portance et de la traînée en fonction des paramètres physiques pertinents. Un aspect du problème qui demandait un peu d'intuition, est que la puissance fournie par le moteur sert uniquement à compenser la puissance dissipée par la traînée. La portance, dans la définition qui en est donnée sur la Fig. 3 de l'énoncé, ne crée aucun couple résistant à la rotation du moteur. Cependant, la portance et la traînée étant toutes deux liées à l'angle d'incidence des pales du rotor sur l'air, une augmentation de portance est associée à une augmentation de la puissance nécessaire. L'introduction du vrillage des pales du rotor (**I.13-I.17**) permet de raffiner l'analyse et d'optimiser la conception des pales par l'adoption d'un angle optimal de vrillage (en se limitant à une dépendance linéaire de l'angle d'incidence en fonction de la distance à l'axe de rotation).

L'hélicoptère étant un système isolé dans l'air, l'application du couple du moteur sur l'axe du rotor principal induit par réaction un couple inverse tendant à faire tourner le corps de l'appareil sur lui-même. La fin de la première partie (**I.18-I.21**) est consacrée à une application des expressions trouvées dans les questions précédentes au fonctionnement du rotor anticouple servant à annuler cet effet. La géométrie d'ensemble de l'hélicoptère entre ici en jeu (plan vertical de l'anticouple, distance à l'axe du rotor principal), mais le principe est identique à celui du rotor principal.

La tête du rotor principal d'un hélicoptère est un système mécanique complexe permettant de répercuter les ordres du pilote à la voilure tournante via un système de plateaux et de biellettes. La Partie II porte sur l'étude des liaisons en jeu dans cet ensemble. Elle commence avec l'introduction d'un ensemble de liaisons simples équivalentes (**II.1-II.2**), puis se poursuit avec l'étude de la cinématique de la commande de pas collectif (**II.3-II.5**) et enfin de la commande de pas cyclique (**II.6-II.8**). La progression choisie permet de tester la compréhension fine par les candidats d'une cinématique originale en trois dimensions (particulièrement celle du pas cyclique), sans pour autant recourir à de trop lourds calculs.

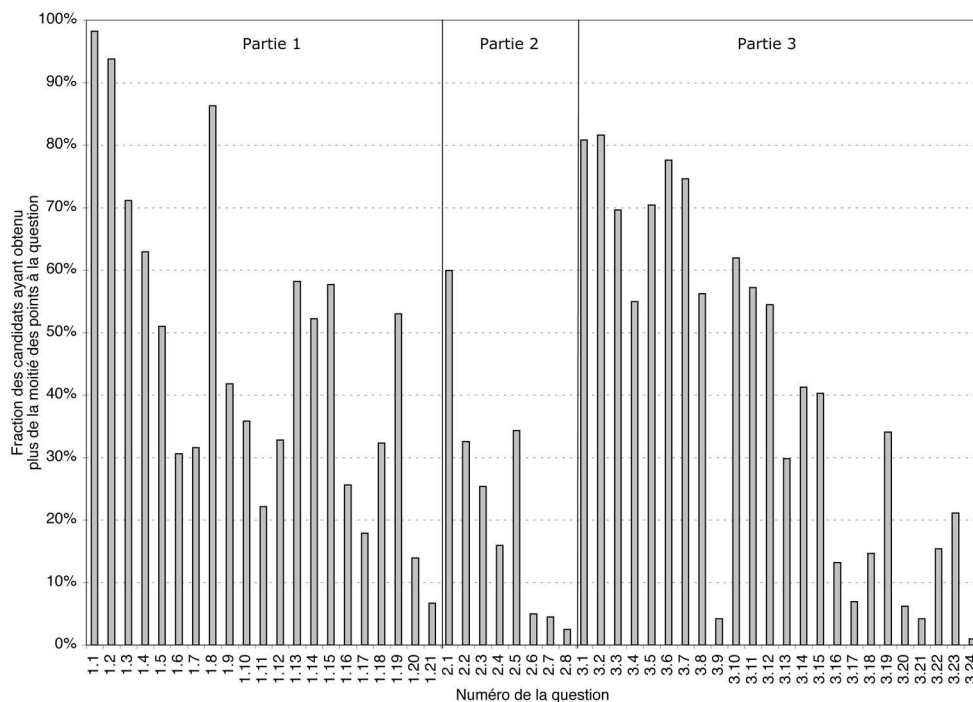
Le contrôle automatique de l'altitude (pilote automatique à un axe) est un dispositif particulièrement utile pour un hélicoptère, du fait de sa capacité à réaliser des vols stationnaires. La Partie III est dédiée à l'étude d'un accéléromètre électrostatique et à son insertion dans une boucle de contrôle de l'altitude. Le système choisi est fondé sur la variation de capacité d'un condensateur lors du déplacement relatif de ses électrodes. L'étude mécanique de la structure mécanique masse-ressort-amortisseur du capteur est des plus classiques et dérive directement du cours (**III.1-III.5**), avec une étude simple de la fonction de transfert en fréquence (tracé du diagramme de Bode). Les questions **III.6-III.9** concernent la variation de capacité des condensateurs en fonction de la position de l'électrode centrale. Pour intégrer ce système électrostatique dans le système mécanique, il est important de s'assurer qu'aucune résonance indésirable ne rendra le fonctionnement instable. L'étude de la loi de variation de la tension aux bornes du capteur en fonction de l'accélération, ainsi que la gamme d'accélération mesurables, sont déduites aux questions **III.10-III.17**. La dernière partie de l'énoncé est une mise en perspective de la boucle de contrôle d'altitude, en tenant compte cette fois de la fonction de transfert supplémentaire des actionneurs mécaniques utilisés. En fin d'énoncé, il est demandé une appréciation qualitative de la pertinence de l'utilisation du capteur étudié pour le contrôle d'altitude.

Résultats des candidats

Les notes des candidats français se répartissent selon le tableau suivant :

$0 \leq N < 4$	28	4 %
$4 \leq N < 8$	158	22,7 %
$8 \leq N < 12$	314	45,2 %
$12 \leq N < 16$	145	20,9 %
$16 \leq N \leq 20$	50	7,2 %
Total	695	100 %
Nombre de copies : 695		
Note moyenne : 10,14		
Écart-type : 3,72		

Le graphique présenté donne le taux de réussite des candidats français à chacune des questions. Une question est considérée comme réussie sur ce graphique si le candidat a reçu au moins la moitié des points. Certaines questions ont été réussies par une grande partie des candidats, mais ne sont de ce fait pas celles qui ont fait la différence sur la notation finale. Ce graphique permet aussi de visualiser les différentes « portes d'entrée » qui étaient offertes aux candidats.



L'attention des futurs candidats est attirée sur le fait que de nombreuses questions proches du cours n'ont été traitées correctement que par une minorité des candidats. Des applications numériques fort simples ont également fait perdre des points à une bonne partie des candidats (I.9 et I.11 par exemple). Il est rappelé que la valeur numérique d'une grandeur physique doit être obligatoirement suivie d'une unité, sans quoi le résultat est considéré comme faux. Les unités de base du Système International sont bien sûr correctes et acceptées, mais il est indispensable de savoir par exemple qu'une capacité s'exprime en farad (unité dérivée du S.I.), même si le $\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$ est équivalent.

Reprenant les termes de notre rapport de l'année dernière, nous souhaitons insister à nouveau sur l'importance de la qualité de la rédaction dans l'appréciation d'une copie. Un raisonnement clair, concis et bien exprimé a bénéficié d'une notation plus favorable que la simple énonciation directe du résultat, même si celui-ci est juste dans les deux cas. La faculté d'une copie à présenter *synthétiquement* sa démarche dans la résolution de la question posée est une qualité scientifique au même titre que l'aptitude à réaliser des calculs complexes. Les meilleures copies (plusieurs ont atteint la note de 20/20) se caractérisent toutes par une rédaction agréable et concise, ne sacrifiant rien à l'exactitude. L'utilisation de schémas adaptés a été encouragée dans la notation lorsque la question s'y prêtait.

Points particuliers

Partie I : Les questions du début de cette partie (I.1-I.4), très faciles, n'ont pas été particulièrement discriminantes. Beaucoup d'inexactitudes ont cependant été relevées dans le calcul des éléments de réduction des torseurs. Le calcul de l'expression de la puissance nécessaire au décollage (I.5-I.6) n'a été bien réussi que par peu de candidats. La question I.7 a été traitée de manière particulièrement décevante car elle ne réclamait pas de calcul pour la conclusion qualitative demandée. Le calcul de la puissance de décollage n'a pas fait l'objet de beaucoup d'erreurs, mais l'application numérique correspondante a débouché sur une gamme de valeurs proprement stupéfiante, de quelques watts à la puissance de plusieurs tranches de réacteurs nucléaires. Une erreur amusante qui s'est reproduite plusieurs fois : l'utilisation de la célérité de la lumière en lieu et place de la vitesse du son dans l'air... L'optimisation de conception apportée par le vrillage des pales, questions I.13 à I.17, ne donnait lieu qu'à des calculs légèrement plus lourds mais sans surprises. Les résultats essentiels étaient d'ailleurs fournis par l'énoncé. Et pourtant la sélection s'y est opérée entre les candidats ayant assimilé les grands principes développés dans les questions précédentes et ceux qui n'ont pas su émerger de leurs calculs. Les questions I.18 à I.21 demandaient de réaliser une série de calculs simples sur des expressions impliquant de nombreuses variables. Les erreurs de report ont été nombreuses, mais globalement les résultats ont été assez satisfaisants pour les meilleurs candidats.

Partie II : Cette partie a été globalement mal réussie par les candidats. La question II.1 a donné lieu à une étonnante variété de réponses approximatives, dont la plupart étaient toutefois suffisamment correctes pour justifier l'attribution de points. La question II.2 a relevé, pour beaucoup de candidats, de la loterie, avec l'attribution quasi-aléatoire des degrés de liberté aux réglages des pas collectif et cyclique. L'expression de la loi de levée (II.4) a marqué une frontière très nette entre les candidats à l'aise avec la géométrie des liaisons et les autres. Le taux de réussite étonnamment bas de cette question montre les difficultés généralisées pour exprimer une simple fermeture géométrique. En particulier beaucoup de candidats n'ont pas vu que la biellette BC ne formait pas un angle α avec la verticale. Un moyen simple de vérifier la potentielle validité de la loi obtenue était de s'assurer de la croissance de f_ε et sa nullité en 0. Malgré un échec à cette question, de nombreux candidats se sont tout de même rattrapés sur l'expression linéarisée (II.5), en bénéficiant souvent d'une combinaison d'intuition et de chance. La fin de la Partie II (II.6 à II.8), plus difficile, n'a été abordée que par une infime fraction des candidats. Sa rédaction ne réclamait pourtant pas de longs calculs, mais une bonne vision spatiale du système.

Partie III : Cette partie du sujet a été bien traitée (d'une manière générale) par beaucoup de candidats. Les premières questions sont directement une application du cours. La question III.9 n'a été réussie que par 17 candidats français sur 760. Il y était demandé de prendre un peu de recul sur le montage considéré, pour se rendre compte que si l'électrode centrale s'approche trop d'une des armatures, il y a risque de claquage du condensateur ainsi formé, et d'une destruction du capteur. Une *majorité* de candidats a fait une erreur

de lecture de la valeur de la masse m , de 96 milligrammes, et l'a considérée comme étant de 96 grammes. Cette erreur n'aurait rien d'étonnant sur quelques copies, mais sa répétition par des centaines de candidats nous a laissés perplexes. Après la réalisation d'un calcul, il est important de toujours vérifier la vraisemblance du résultat, et de s'assurer que l'unité physique donnée est correcte. Les valeurs numériques aberrantes obtenues lors des calculs en question n'ont que très (trop) peu surpris les candidats. Enfin, et comme souvent, il y avait de nombreuses questions en fin d'énoncé qui pouvaient être abordées sans pour autant avoir nécessairement réussi toutes les parties précédentes. On ne le répètera jamais assez : lisez jusqu'au bout !