

Sciences industrielles de l'ingénieur

Présentation du sujet

L'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur de la session 2021 a pour support d'études un « Stabilisateur vertical pour appareil photo ». Il s'agit d'un dispositif qui limite, lors de prises d'images, les déplacements verticaux de l'appareil induits par l'utilisateur qui marche ou qui court. La problématique abordée dans ce sujet est la validation puis la comparaison de deux solutions commercialisées pour satisfaire les objectifs de maîtrise de la position de l'appareil photo à l'équilibre et en mouvement. La première solution dite passive est un mécanisme principalement constitué de quatre solides formant un parallélogramme et d'un ressort de traction. La seconde, dite active, intègre un motoréducteur permettant une régulation de la position de l'appareil photographique.

Le sujet est construit en quatre parties, selon un fil conducteur menant le candidat de l'analyse du cahier des charges à la comparaison des performances des deux solutions. Chaque partie est organisée avec une progressivité dans les difficultés donnant la possibilité à tous de s'exprimer.

La *première partie*, très courte, porte sur l'analyse des mouvements de marche et de course d'un utilisateur et la justification des critères chiffrés de l'exigence relative à la position de l'appareil photo en mouvement. Les candidats sont invités à analyser des captures du mouvement vertical d'une perche tenue des deux mains par un utilisateur qui se déplace sur un sol plat. Cette analyse leur permet d'appréhender la problématique du sujet et les amène à justifier l'utilisation d'un filtrage de ces perturbations.

La *deuxième partie* est consacrée à la vérification du respect de l'exigence relative à la position à l'équilibre de l'appareil photo dans le cadre de l'utilisation de la solution passive. Dans cette partie, les candidats sont amenés à mettre en place un modèle statique du mécanisme permettant de vérifier la capacité du système à permettre l'amplitude des déplacements verticaux attendue et le maintien de la position d'équilibre de l'appareil dans la plage de fonctionnement définie.

La *troisième partie* est consacrée à l'étude dynamique de la solution passive. Les candidats sont invités à déterminer un modèle dynamique, à le valider en comparant les résultats de la simulation du modèle dynamique et les mesures des signaux expérimentaux. Ils analysent ensuite les résultats obtenus pour conclure sur la satisfaction de l'exigence relative à la position de l'appareil photo en mouvement. Ce dernier point met en évidence la nécessité d'ajouter une commande active au système.

La *quatrième partie* de ce sujet propose aux candidats d'élaborer la loi de commande d'un système de filtrage actif conçu autour d'un actionneur électrique. Le questionnement initial les amène à étudier une loi de commande permettant de filtrer les composantes haute fréquence dues au mouvement de l'utilisateur et de conserver les composantes basses fréquence de façon à assurer la position d'équilibre. La loi de commande proposée est organisée autour d'un régulateur série comportant un terme intégral dont la démarche de synthèse conduit à choisir les paramètres selon une approche fréquentielle « classique ». L'actionneur est considéré idéal, c'est-à-dire ayant une dynamique infiniment rapide. Puis l'étude a pour objet de prendre en compte le retard induit par la chaîne de motorisation et les conséquences sur la stabilité. Cette partie se termine par la validation des exigences spécifiques à la commande active à partir de l'analyse du comportement temporel de cette solution.

Deux *questions de synthèse* terminent ce sujet. Elles permettent aux candidats de comparer les performances réalisées par les deux solutions, passive et active, aux performances attendues pour finalement, en intégrant des critères technico-économiques, proposer un choix entre les deux.

Analyse globale des résultats

Le jury est déçu des résultats obtenus par les candidats cette année car la moyenne est relativement faible alors que le sujet ne présente pas de difficultés particulières. Des questions (**Q7** pour la **Q8**, **Q11** pour la **Q12** par exemple) sont ajoutées par les auteurs pour guider le candidat dans sa réflexion quand la démarche à suivre n'est pas directement donnée dans la question (**Q13**).

Le contexte de formation des deux dernières années est bien évidemment une circonstance atténuante mais il n'explique pas tout, car des parties entières du sujet portent sur des compétences à acquérir en PCSI. Concrètement, moins de la moitié des candidats maîtrise les cas d'application et les méthodes de base de la mécanique (**Q8** et **Q9**) ou la condition d'équilibre d'un solide soumis à deux glisseurs. Seulement un quart des candidats est capable de trouver et de conduire la démarche pour appliquer le théorème de la résultante statique orthogonalement aux inconnues que l'on veut voir disparaître et très peu sont rigoureux dans la démarche de résolution (bilan des actions mécaniques extérieures correct, point d'application du théorème du moment dynamique). Toutes ces compétences forment le socle attendu dans ce concours par les écoles.

À peine plus d'un quart des candidats maîtrise rigoureusement la stabilité en terme de phase de la boucle ouverte. Beaucoup considèrent que la stabilité est équivalente à la précision. La question **Q24** a mis en évidence le manque de maîtrise du tracé théorique des diagrammes de Bode pour beaucoup de candidats quand la fonction de transfert n'est pas un premier ordre classique. La question **Q25** est la plus difficile du sujet. Elle laisse aux candidats le soin de déterminer la méthode à appliquer. En fin de sujet, elle devait permettre d'identifier les meilleurs candidats.

Les questions d'analyse de résultats (qu'ils soient fournis ou trouvés) et de synthèse, ont été très mal traitées par une grande partie des candidats car, pour beaucoup, vérifier le respect (ou le non respect) d'une exigence consiste à écrire qu'elle est (ou n'est pas) respectée sans plus de justifications. Cela est loin de la nécessité de rigueur attendue à ce concours.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

I Analyse du mouvement de l'utilisateur et justification du cahier des charges

Si la question **Q1** sur l'analyse des signaux, a été bien réussie dans l'ensemble, les réponses à la question **Q2** sur un choix de type de filtrage montrent une méconnaissance du vocabulaire (filtres passe-bas, passe-haut, coupe-bande...) d'une part importante des candidats ou un certain manque de sens physique perceptible au regard de l'effet de filtrage nécessaire.

II Vérification du respect de l'exigence relative à la position d'équilibre

La manipulation élémentaire (**Q3**) qui permet d'obtenir les coordonnées du centre de masse, a été bien traitée par une très grande majorité et la fermeture géométrique (**Q4**) n'a pas posé de difficulté particulière. Les erreurs liées aux projections sont dues au fait que l'angle est représenté avec une valeur négative sur le schéma cinématique.

À partir de la fermeture géométrique, les candidats ont obtenu sans difficulté l'expression du paramètre de longueur (**Q5**). Quant à la question **Q6**, elle a été souvent abordée par les candidats et les fautes de signes, ou l'oubli de la tension initiale dans l'expression de l'effort, représentent la majorité des erreurs rencontrées. Le jury ne s'attendait pas à ce que la question **Q7** soit aussi mal traitée. Beaucoup de candidats n'ont pas su donner la direction des efforts ou l'ont donnée sans justification ou complètement fautive. La question porte pourtant sur un cas de figure élémentaire d'un solide soumis à deux glisseurs. Les compétences évaluées dans les questions **Q8** et **Q9** le sont chaque année. Malgré cela, le jury regrette

encore cette année l'absence de méthode et le manque de rigueur. La démarche, pourtant simple, consiste à expliciter, avant d'écrire toute équation : l'ensemble des solides isolés, le bilan des actions mécaniques extérieures, le théorème retenu ainsi que la projection exprimée.

En **Q10**, le jury attendait que la fonction renvoie le résidu de l'équation d'équilibre obtenu à la question précédente. Beaucoup de candidats ont proposé une fonction basée sur une structure conditionnelle qui n'est pas compatible avec une approche par dichotomie.

La lecture du graphe (**Q11**) permet de déterminer les deux angles d'équilibre et les candidats doivent se reporter au cahier des charges pour vérifier que ces valeurs sont comprises dans l'intervalle spécifié. (**Q12**), ils doivent vérifier à partir de la relation établie à la **Q3** et des angles d'équilibre déterminés à la question précédente, que le débattement autour des positions d'équilibre permet à l'appareil photo d'évoluer verticalement d'au moins ± 20 mm vers le haut et vers le bas.

III Détermination de la loi de mouvement du système perturbé

Les questions **Q13** à **Q15** proposent aux candidats de formuler, en exploitant les théorèmes du principe fondamental de la dynamique, l'équation différentielle (**Q13**) décrivant le comportement de la solution passive et de formuler les fonctions Python en vue de la résoudre (**Q14** et **Q15**). Par manque de rigueur, une partie des candidats a abouti à des développements calculatoires inutiles et longs ne leur permettant pas de démontrer la forme proposée, ou encore à des erreurs de signe lors des projections. Le développement de la fonction Python a été réussi par une partie des candidats, même si une formulation complètement correcte n'a été réussie que par très peu d'entre eux. On peut remarquer beaucoup d'erreurs dans les types de variables manipulées.

Les questions d'analyse (**Q16** et **Q17**) amènent les candidats à conclure d'une part sur la validité du modèle développé (**Q16**) et sur les performances du filtrage passif. Sur la validité du modèle beaucoup de candidats confondent l'exigence sur les performances du système avec celle de validité du modèle, concluant ainsi de façon erronée. On peut noter par ailleurs que l'analyse comparative des signaux proposés (issus de mesures et de résultats de simulation) reste, pour beaucoup de candidats, beaucoup trop qualitative. Concernant la conclusion sur le niveau de performance, même si une part non négligeable de candidats conclut correctement (souvent avec des phrases confuses et maladroitement), beaucoup de réponses s'appuient sur le niveau des signaux relevés et non pas sur le niveau d'atténuation des signaux selon les fréquences mises en jeu. Le jury recommande aux candidats de lire attentivement les exigences considérées.

IV Étude d'avant-projet d'une solution technique avec une commande active

Après la mise en place d'un modèle dynamique du système (**Q18**) le questionnement amène à l'étude de la stabilité (**Q19**) de la structure de commande et à montrer l'insuffisance d'une correction proportionnelle. La mise en place du modèle dynamique, pourtant simple, n'a été complètement réussi que par un faible nombre de candidats. Le jury rappelle que le « bras de levier » n'est pas un théorème. L'analyse de stabilité pouvait être faite d'une façon succincte et rapide en étudiant la marge de phase ou encore en étudiant les propriétés de la fonction de transfert en boucle fermée. Le jury constate un nombre anormalement élevé d'erreurs souvent par confusion entre stabilité et précision ou encore dans le calcul de la fonction de transfert en boucle fermée. Le jury rappelle que la fonction de transfert caractérise une relation entre une entrée et une sortie d'un système linéaire, les entrées non considérées sont mises à zéro lors du calcul.

Les questions **Q20** à **Q22** amènent les candidats à déterminer, selon une démarche proposée, les paramètres d'un correcteur stabilisant le système bouclé, au regard des performances escomptées (rapidité, marge de phase). La question **Q20** permet aux candidats de poser les contraintes du correcteur en vue de déterminer les paramètres associés (**Q21** à **Q22**). Une part très importante de candidats ne maîtrise pas la notion de marge de phase et se trouve bloqué dans la suite de la démarche.

Les questions **Q23** à **Q25** demandent aux candidats de compléter le diagramme de Bode de la structure d'analyse retenue, puis d'exploiter ce tracé pour déterminer les conditions de stabilité. Si le tracé du diagramme de Bode est pour une grande partie des candidats correctement réussi, l'analyse des conditions de stabilité pose encore des problèmes en raison d'une lecture trop rapide des exigences (confusions dans le cahier des charge) ou d'un manque de rigueur ou de précision dans la démarche.

La question de conclusion partielle (**Q26**) a été généralement bien réussie sur la partie rapidité et précision, même si on peut remarquer parfois des rédactions maladroitement ou imprécises (beaucoup de réponses se limitent à analyser les performances pour une seule masse d'appareil). Cependant la conclusion de la stabilité ne peut se faire sur la seule analyse de la convergence sur un signal particulier, il faut pour répondre avec pertinence s'appuyer sur les performances manipulées lors de la phase de synthèse du correcteur et d'analyse de la robustesse.

V Synthèse

Les questions de synthèse (**Q27** et **Q28**) invitent les candidats à conclure d'une part sur les performances de chaque solution (**Q27**) et à établir un tableau comparatif de ces solutions (**Q28**) en utilisant des indicateurs comme la masse, le coût possible, la consommation énergétique etc.

Dans l'analyse des performances beaucoup de candidats ne sont pas revenus à la problématique initiale de l'étude, à savoir les exigences de filtrage des perturbations sur une bande limitée de fréquences et n'ont pas en conséquence analysé les bons critères. En particulier, il fallait ici s'intéresser à la bande de fréquences 1,5 Hz – 2,8 Hz en analysant le niveau d'atténuation de chaque solution et vérifier que les composantes basse fréquence étaient conservées.

La mise en place d'un tableau comparatif a été dans l'ensemble assez bien réussie en notant qu'au niveau des performances des positions d'équilibre beaucoup de candidats se sont limités aux seuls aspects statiques sans évoquer les aspects dynamiques (filtrage des perturbations).

Conclusion

Au bilan, la réussite à cette épreuve, ne comportant pourtant pas de réelle difficulté vis-à-vis de son cahier des charges, interroge. Le nombre de très bonnes copies est très faible et beaucoup trop se situent bien en dessous des attentes du concours. Il est à espérer que la situation complexe de formation dans laquelle cette génération de candidats s'est retrouvée en est la principale explication et que les années suivantes montreront une nette amélioration en termes de maîtrise des compétences attendues en fin de cycle PCSI/PSI. Il faut, encore plus que d'habitude, appeler les candidats à faire preuve de rigueur dans leur composition.

Les sujets de sciences industrielles pour l'ingénieur sont construits autour d'une problématique industrielle. Découpés en plusieurs parties, ils proposent une progressivité dans la démarche de compréhension du système, d'analyse et de modélisation. Ainsi, les candidats qui papillonnent, en ne traitant pas les problèmes dans l'ordre, éprouvent davantage de difficultés à répondre aux questions. Le jury rappelle tout le bénéfice que les candidats peuvent tirer de la lecture complète du sujet avant de commencer proprement la rédaction.

La validation de l'étude en sciences industrielles pour l'ingénieur est conduite par l'analyse de l'écart entre les performances attendues, données dans le cahier des charges, et les performances simulées, calculées au fil des questions. Le jury ne peut se satisfaire de réponses superficielles. Cette analyse doit être conduite avec rigueur et méthode. L'écart ne peut être que la « différence » entre les niveaux attendus et réalisés pour un critère clairement identifié et caractérisé par une métrique. Le jury conseille donc de lire attentivement le cahier des charges pour identifier les critères et les niveaux d'exigence demandés. Il attend qu'ensuite, les candidats se prononcent sur la pertinence de la solution.

Comme chaque année, le jury se réjouit de trouver d'excellentes copies qui sont manifestement le fruit d'un travail soutenu et de compétences affirmées. Par la qualité de leur prestation, ces candidats valident la longueur et l'adéquation de l'épreuve au public visé. Par leur exemple, ils encouragent les futurs candidats et leurs formateurs à persévérer dans la voie de l'excellence de la préparation.

Ces excellentes copies montrent également que, malgré le contexte particulier d'une épreuve de concours, il est possible de rédiger les réponses avec un graphisme clairement lisible et une présentation soignée. Cette capacité n'est pas partagée par tous. Aussi, le jury invite les professeurs de CPGE à exiger un niveau de qualité dans les copies que les étudiants leur remettent au cours des deux années de préparation.