

# Sciences industrielles de l'ingénieur

## Présentation du sujet

Le support d'études de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur de la session 2022 est un « *Système de stabilisation active pour des opérations à cœur battant* » conçu pour maintenir les déplacements du cœur dans une plage limitée pendant une opération à cœur battant. Les efforts cardiaques sont ici, considérés d'amplitude connue et comme un signal perturbateur périodique dans une plage de fréquences donnée par la fréquence de battements du cœur. Dans le contexte opératoire, l'utilisation d'un actionneur électrique ne pouvant être envisagée, les concepteurs ont retenu comme actionneur l'action de l'effet gyroscopique et installé un gyroscope sur le système pour contrôler les battements cardiaques.

Le sujet a été construit en quatre parties selon un fil conducteur menant le candidat de l'analyse d'une solution passive à une solution active reposant sur la mise en place d'une loi de commande qui rejette l'effet de la perturbation induite par les efforts cardiaques.

- **La première partie**, relativement courte, avait comme objectif d'amener le candidat à s'approprier le contexte et la problématique. Elle portait sur l'analyse des performances d'une solution passive et de conclure sur son incapacité à respecter le cahier des charges et donc de la nécessité de l'utilisation d'une solution active.
- **La deuxième partie** du sujet avait comme objectif de définir le modèle de l'actionneur gyroscopique et du stabilisateur. Cette partie a amené les candidats à déterminer le modèle dynamique du stabilisateur servant de base dans la suite de l'étude pour définir et déterminer une loi de commande globale.
- **La troisième partie** avait comme objectif le réglage de la loi de commande du stabilisateur.
- **Une question de synthèse**, a permis aux candidats d'analyser les trois structures potentielles, à les comparer puis à conclure sur la capacité du système de stabilisation active à maintenir le déplacement du cœur dans les limites exigées par le cahier des charges.

## Analyse globale des résultats

Comme chaque année, le jury apprécie la qualité exceptionnelle de certaines copies, et donc des excellentes notes qui en résultent. En cela, il veut transmettre aux candidats, mais aussi à leurs formateurs, les félicitations qu'ils méritent. Cet état de fait conforte le jury quant à l'orientation des sujets et de leur contenu.

L'organisation du sujet a été conçue en vue de permettre à la majorité des candidats de s'exprimer et à un nombre très important d'entre eux à réussir à traiter l'ensemble des questions. Le jury note cependant qu'un nombre non négligeable de réponses sont données sans préciser la démarche, les hypothèses et seule une (des) expression(s) (ou des valeurs numériques) finale(s) est (sont) fournie(s). Par exemple dans le calcul d'un moment dynamique (**Q 15.**, **Q 17.**), dans celui d'un modèle d'évolution (et de l'inertie équivalente) (**Q 18.**), dans le calcul d'un gain maximal assurant la stabilité d'un système bouclé (**Q 16.**), ...

## Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Le jury rappelle l'importance fondamentale qui est attribuée à la justification « correcte » des hypothèses, l'énoncé des savoirs et la conduite des démarches utilisées lors du traitement des questions par les candidats. Un résultat non justifié, même juste, ne peut être valorisé lors de la correction. Par exemple, dire

que le cahier des charges est respecté, sans citer l'exigence ou le critère du cahier des charges dont il est question, ne peut être considéré comme convenable par le jury. De même, l'utilisation du théorème de la valeur finale, s'il n'est pas correctement énoncé et utilisé, sera pénalisée, quand bien même le résultat obtenu et la conclusion associée seraient justes.

Dans les sessions à venir le jury valorisera, dans l'évaluation des prestations, **la prise en compte de la méthode, la cohérence des résultats intermédiaires et la rigueur des candidats** dans la construction des réponses aux questions. Un résultat **sans les justifications minimales** nécessaires sera considéré comme faux. L'intuition est importante à condition qu'elle soit accompagnée par la rigueur méthodologique indispensable.

## I – Résultats expérimentaux et modélisation du mécanisme

Cette partie, faisant l'objet des questions (**Q 1.** à **Q 4.**), permettait au candidat de comprendre le contexte, le besoin d'une solution de filtrage actif des perturbations, de formuler le modèle de la liaison entre la table d'opération et le stabilisateur et enfin d'exprimer la direction du moment permettant de compenser les perturbations.

Dans l'ensemble cette partie a été bien réussie. Les principales erreurs relèvent d'un manque de précision dans la lecture des graphes fournis et en conséquence à des erreurs ou à des valeurs aberrantes avec des unités fantaisistes dans les amplitudes angulaires de déplacement du stabilisateur. Certains, d'une façon surprenante, font des erreurs de calculs en dépit d'expressions analytiques correctes. Enfin, beaucoup, ne connaissent pas les caractéristiques d'un axe.

## II – Effet gyroscopique et modélisation du stabilisateur

L'ensemble des questions (**Q 5.** à **Q 20.**) de cette partie avait comme objectif d'amener les candidats à établir les modèles nécessaires à la conception de la loi de commande du stabilisateur.

### II.A – Étude de l'effet gyroscopique généré par le système GyroLock

Cette partie, objet des questions (**Q 5.** à **Q 10.**) proposait aux candidats d'analyser les actions mécaniques permettant de représenter l'effet gyroscopique et les relations caractéristiques de ce type d'actionneur.

Dans l'ensemble cette partie a été assez bien réussie par beaucoup de candidats. Des manques de rigueur sont notés dans les aspects dynamiques comme dans (**Q 8.**) où beaucoup de candidats remplacent l'utilisation du moment dynamique par une réponse intuitive en évoquant une compensation statique.

On note aussi parfois des réponses approximatives lorsqu'il s'agit de conclure sur des approximations numériques (une valeur numérique n'est importante ou faible que par rapport à une référence) (**Q 10.**). Certains candidats utilisent d'une façon maladroite des expressions « petit, faible, ... » pour qualifier des grandeurs proches de 0 (**Q 9.**).

### II.B – Réglage du correcteur de la chaîne d'asservissement de l'étrier

Un des problèmes de ce type d'actionnement est sa dérive. La solution choisie a été de mettre en place une boucle d'asservissement locale faisant l'objet des questions (**Q 10.** à **Q 13.**). Comme confirmé dans la partie III, une majorité de candidats maîtrise la manipulation et la réduction de schémas blocs.

Le jury note cependant un manque de rigueur lorsqu'il s'agit d'utiliser le théorème de la valeur finale (**Q 10.**). Il était en effet possible de déterminer un résultat correct avec une double erreur à savoir l'expression fautive du théorème concerné et de celle de la transformée de Laplace du signal d'entrée, ou encore de conclure sur le bon choix du correcteur avec des erreurs dans le calcul des limites. Ce type de réponses ne peut être accepté et la cohérence de la démarche et des résultats intermédiaires est indispensable.

## II.C – Comportement dynamique du stabilisateur

L'ensemble des questions (Q 14. à Q 20.) de cette partie conduisait le candidat à définir le modèle dynamique d'évolution du stabilisateur en prenant comme entrées le couple généré par l'actionneur gyroscopique (lié à sa vitesse de rotation) et l'effort cardiaque, considérés respectivement comme les grandeurs de commande et de perturbation.

D'une façon générale la majorité des candidats arrive à définir la démarche nécessaire (Q 14.) mais une partie non négligeable éprouve des difficultés pour la mener avec rigueur. En particulier pour déterminer d'une façon rigoureuse les expressions des moments dynamiques où trop d'erreurs sont faites dans les expressions de changement de point.

Le jury demande aussi aux candidats de préciser leur démarche avec méthode et rigueur, de ne pas limiter leur réponse à une expression sans aucune justification (Q 18.).

Les candidats devaient calculer numériquement (Q 20.) les constantes de la fonction de transfert sans oublier d'indiquer les unités du gain et de la pulsation propre. De plus, le jury attendait que les candidats commentent le coefficient d'amortissement très faible obtenu qui donne lieu à des oscillations importantes en régime temporel et à une résonance importante en régime fréquentiel. Certains candidats ont bien compris la question et concluent sur le contexte du stabilisateur qui se prête très mal à des dépassements importants et/ou à une résonance importante.

## III – Réglage de la loi de commande du stabilisateur

Cette partie amenait les candidats à concevoir une loi de commande pour un filtrage actif des perturbations dues à l'effort cardiaque dans une bande de fréquence limitée.

### III.A – valeur maximale de $K_p$

Un retour d'état partiel, déterminé avec les seules notions développées dans le programme, avait comme objectif d'amortir le comportement en boucle fermée. Pour cela, le calcul des gains était exploité en vue d'assurer la stabilité en boucle fermée par une analyse simple des marges de stabilité (gain et/ou phase) (Q 21., Q 22.). Une part importante de candidats aborde ces questions sans difficulté mais des réponses sans justification conduisent parfois à douter de l'exactitude de la démarche. Des confusions apparaissent entre la plage de pulsations typiques du signal de perturbation et la pulsation de coupure de la chaîne d'asservissement (Q 22.). L'analyse de stabilité doit prendre en compte l'ensemble des pulsations et ne pas se limiter au spectre seul des signaux d'entrée.

### III.B – vérification de la valeur de $K_p$

La validation des performances de la loi de commande faisait l'objet des questions (Q 23. et Q 24.) et amenait les candidats à montrer l'incohérence entre le gain maximal assurant la stabilité et une valeur de gain assurant le niveau nécessaire de rejet des perturbations. Des erreurs sont notées car beaucoup de candidats n'interprètent pas le gain maximal assurant la stabilité comme une borne maximale (qui, de plus, n'assure pas de marge de stabilité) et concluent d'une façon erronée.

Cette partie (Q 21. à Q 24.) avait comme objectif d'amener les candidats à comprendre la nécessité de compléter la première loi de commande afin d'assurer le niveau de performance attendu vis-à-vis du rejet des perturbations.

### III.C – amélioration des performances par compensation de l'effort cardiaque

Les questions (Q 25. à Q 28.) conduisaient les candidats à établir un correcteur par anticipation fondé sur la compensation de la perturbation. L'intérêt de l'approche est de conserver le niveau d'amortissement du bouclage stabilisant et de réduire l'effet des perturbations. Cette partie montre que la majorité des candidats manipule et réduit d'une façon efficace les schémas blocs et arrive à exprimer le correcteur.

Elle montre aussi les capacités des candidats à réduire le correcteur de façon à conserver le niveau de performances souhaité (Q 28.) tout en limitant sa complexité.

**Une question de synthèse (Q 29.)** invitait les candidats à conclure sur les performances de la solution proposée en exploitant les réponses fréquentielles (en boucle ouverte et en boucle fermée, sans puis avec anticipation) et les réponses temporelles fournies. Si la conclusion sur la réponse temporelle restait simple et ne posait aucun problème, l'analyse des réponses fréquentielles est plus contrastée. Beaucoup de candidats ont montré des difficultés à mettre en évidence et à bien séparer les apports de la boucle fermée qui assure un bon amortissement mais ne peut assurer seule le rejet de perturbation, de ceux du correcteur par anticipation qui ne peut amortir le comportement mais dont l'objectif est le rejet des perturbations. Beaucoup de candidats n'ont pas réussi à bien dissocier l'amortissement lié au réglage de la loi de commande et visible en analysant la résonance harmonique, de celui du rejet de perturbations dans une plage de pulsations limitée (située en dessous de la pulsation de résonance) caractérisé par le gain dans la plage considérée.

## Conclusion

Le jury souhaite rappeler la conclusion de la précédente session car elle reste opportune « 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, de modélisation et de validation. 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.