

Sciences industrielles de l'ingénieur

Présentation du sujet

Le support d'études de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur de la session 2023 est un « *Exosquelette Atalante pour la rééducation à la marche* » de patients partiellement ou totalement paralysés au niveau des membres inférieurs.

Les cibles d'utilisation de ce système, imaginé et développé par la société Wandercraft, sont les établissements hospitaliers et les kinésithérapeutes.

Le contexte du sujet a ciblé deux modes de fonctionnement : le *renforcement musculaire* pour les patients ayant subi un traumatisme important et la *proprioception* de la verticalité et de la marche pour les patients paraplégiques ou ayant des problèmes d'équilibre. Le sujet a été construit en quatre parties selon un fil conducteur offrant aux candidats la possibilité de s'exprimer et de montrer leurs capacités d'analyse, de modélisation et de synthèse dans les différents champs de sciences industrielles de l'ingénieur :

- **la première partie**, constituée d'activités d'analyse, avait comme objectif d'amener les candidats à s'appropriier le contexte et la problématique, en reformulant le cahier des charges, exprimé globalement, en exigences au niveau des articulations ;
- **la deuxième partie** du sujet avait comme objectif de définir un modèle multivariable de l'exosquelette restreint ici à deux axes actionnés, hanche et genou. Après formalisation matricielle du modèle, les candidats étaient invités à analyser sa stabilité en limitant l'étude à l'une des fonctions de transfert. Cela les amenait à en déduire la nécessité de la mise en place d'un asservissement haut niveau pour la stabilisation ;
- **la troisième partie** avait comme objectif la conception et la validation des lois de commande de l'exosquelette selon les deux modes de fonctionnement considérés. La structure des lois de commande, fondées sur un découplage partiel des deux axes puis des matrices de gain était imposée. Le fil conducteur du questionnement conduisait le candidat au calcul des paramètres de gain au regard des exigences de fonctionnement en renforcement musculaire puis à l'analyse des performances pour les deux modes ;
- **une question de synthèse** a permis aux candidats d'analyser et de conclure sur les performances observées au moyen de résultats obtenus en simulation avec un modèle non linéaire. Cette activité, posée sans guider la démarche des candidats, devait les amener à bien séparer les cas des deux modes de fonctionnement et à mettre en évidence les performances associées, soit la raideur pour le cas du renforcement musculaire et la précision/stabilité pour le cas de la proprioception.

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 de réussir à traiter l'ensemble des questions.

Le jury note des copies de bonne qualité avec une nette amélioration de la rédaction et dans l'ensemble clairement présentées, même s'il manque parfois un peu de précision dans la formulation des réponses.

Toutefois, les copies, heureusement peu nombreuses, montrant peu de soin apporté (allers/retours incessants entre questions, numérotation des questions, ratures multiples, illisibilité...) ont systématiquement été pénalisées.

Le jury remarque que :

- les questions où une démarche de résolution est nécessaire sont plutôt bien réussies même si parfois le candidat ne semble pas réellement convaincu par la démarche proposée, ne cherche pas à la mener dans sa totalité et n'arrive pas au bout de la résolution ;
- les questions plus calculatoires sont assez bien réussies ;
- les questions d'analyse et d'interprétation sont les moins bien réussies car elles nécessitent une prise de recul.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Lors du processus de saisie du sujet une erreur concernant la définition d'un vecteur s'est glissée dans une annexe du sujet. La notation \vec{z}'_3 présente dans le corps du sujet s'est transformée en \vec{z}_3 dans le document annexe. Il était très facile pour les candidats de la corriger avant la première question qui en dépendait (Q7.) au moyen du schéma donné page 13 et des indications intervenant avant la question 6. La majorité de candidats a remarqué et corrigé cette erreur. Néanmoins elle a été très souvent oubliée dans la suite du sujet, notamment en (Q14.) et parfois en (Q8.). Toutefois, le jury a considéré justes les solutions issues des deux définitions sous réserve, bien sûr, que les réponses soient correctes et cohérentes avec une des deux définitions.

Le jury rappelle l'importance fondamentale qui est attribuée aux justifications scrupuleuses et exhaustives des hypothèses, l'énoncé des savoirs et la conduite des démarches utilisées lors du traitement des questions par les candidats.

L'art de conclure doit être mieux maîtrisé, il est nécessaire de mettre en évidence l'élément qui permet ensuite de conclure sur la question du sujet. Cela peut être une valeur numérique, l'observation d'une courbe et de préférence avec des données quantifiées, une propriété du cours. Ainsi, énoncer :

- une conclusion, qui paraphrase la question sans justification,
- que le cahier des charges est respecté, sans citer l'exigence ou le critère dont il est question,
- que le système est précis sans référence quantifiée aux écarts, en dynamique ou en régime permanent,
- que le système est stable sans une argumentation théorique ou en référence à une observation clairement précisée,

ne peut être considéré comme convenable par le jury. Une réponse binaire à une question, sans aucune justification, n'apporte aucun point. Le jury conseille aux candidats de toujours se référer au cahier des charges pour évaluer le comportement d'un système.

Dans la continuité des sessions précédentes, le jury valorise dans l'évaluation des prestations, **l'argumentation, la précision et la rigueur des candidats** dans la construction des réponses aux questions. Un résultat **sans les justifications minimales** nécessaires n'est pas valorisé.

Partie I – Mise en évidence de la problématique lors d'une marche en ligne droite

Cette partie (Q1.-Q5.), par l'analyse des exigences globales, amenait le candidat à exprimer le besoin de précision dans l'asservissement des axes afin de maintenir le patient en équilibre et la nécessité de la prise en compte du couplage entre les axes pour assurer cet équilibre. Dans l'ensemble cette partie a été bien réussie par les candidats.

Néanmoins, dans les questions (**Q1.-Q3.**) certains candidats compliquent leur démarche en réalisant une double projection alors qu'une simple projection est possible. De plus, la simplification des expressions trigonométriques et la linéarisation des relations ne sont pas toujours réalisées.

La conclusion de cette partie (**Q4.-Q5.**) est généralement bien posée par une majorité de candidats et les réponses sont très souvent argumentées. L'erreur la plus fréquente de certains candidats a été de limiter les observations aux valeurs maximales et ne pas considérer la tendance sur l'horizon d'observation.

Partie II – Élaboration et analyse d'un modèle dynamique de l'exosquelette

L'ensemble des questions (**Q6.-Q13.**) amenait les candidats à développer un modèle dynamique sur l'axe de la hanche puis à introduire le couplage avec l'axe du genou permettant ainsi d'interpréter le modèle global selon un système à deux entrées de commande (les couples des actionneurs sur la hanche et le genou) et deux sorties (les angles relatifs des articulations cuisse-hanche et tibia-cuisse). Ce modèle de l'exosquelette est exploité dans la partie III pour la conception des lois de commande pour les deux modes de fonctionnement envisagés.

La démarche dans cette partie nécessitait de la part des candidats de mobiliser des compétences en dynamique du solide de façon à déterminer une représentation du système puis en analyse des systèmes linéaires pour établir une des fonctions de transfert (couple de l'actionneur de genou \rightarrow angle relatif tibia-cuisse). La mise en évidence de l'instabilité de cette fonction l'amenait à conclure sur le besoin de mettre en place une chaîne d'asservissement de façon à pallier ce problème.

Partie II.A – Comportement dynamique de l'exosquelette

Cette partie (**Q6.-Q11.**) amenait les candidats à proposer une démarche en vue d'aboutir à une des équations différentielles représentatives du comportement de l'exosquelette.

Cette partie a été assez bien réussie par beaucoup de candidats en termes de démarche. Cependant des manques de rigueur sont notés ralentissant la mise en œuvre de la démarche et/ou ne permettant pas d'aboutir complètement à l'expression recherchée. En (**Q7.**), de trop nombreux candidats projettent systématiquement dans la base fixe avant de dériver alors que ce n'est ni nécessaire ni efficace, montrant ainsi un manque de méthode obtenant alors des expressions longues et fastidieuses et ne respectant pas l'exigence de la question. Le jury note que la relation de dérivation vectorielle n'est pas maîtrisée par un trop grand nombre de candidats. En (**Q8.**), une faible rigueur dans le développement des calculs (et parfois une absence de maîtrise des relations de cours sur les moments cinétique et dynamique) ne permet pas de conclure d'une façon juste. En (**Q9.**), il manque trop souvent l'action mécanique de la liaison pivot dans le bilan des actions mécaniques extérieures qui permet de justifier le choix d'équation (est-ce que cette liaison est bien prise en compte inconsciemment ou est-ce que le calcul de moment dynamique au point A de la question précédente incite les candidats à choisir la bonne équation ?). En (**Q10.**) le calcul des moments de force des actions de pesanteur est généralement bien réalisé mais parfois le moment dynamique du solide 2 est oublié.

Au regard des réponses observées dans cette partie, le jury conseille aux candidats de réaliser les calculs vectoriels dans les bases liées aux solides et de ne pas projeter dans le référentiel galiléen sauf si le sujet le demande expressément.

Partie II.B – Analyse du modèle dynamique

Le modèle dynamique de l'exosquelette peut être décrit au moyen de quatre fonctions de transfert et cette partie invitait les candidats à en déterminer une (**Q12.**) puis à conclure sur le besoin de mettre en place une chaîne d'asservissement afin de pallier le problème d'instabilité (**Q13.**). Cette partie est dans l'ensemble bien traitée en dépit d'un nombre un peu trop important d'erreurs de calcul et de la méconnaissance de certains candidats des critères de stabilité : prise en compte des zéros de la fonction

de transfert, utilisation du critère de Routh (hors programme et sans intérêt ici), les pôles sont de signes opposés, etc. Les pôles de la fonction de transfert étant fournis, la réponse à la question était immédiate au regard de la valeur positive d'un des pôles. Quelques candidats s'arrêtent avant la conclusion pourtant évidente au regard de l'analyse de stabilité. Trop de candidats énoncent le cours sans l'argumenter en citant le pôle concerné.

Partie III – Conception et analyse de lois de commande de l'exosquelette

Cette partie amenait les candidats à concevoir et analyser les lois de commande de l'exosquelette pour les deux modes de fonctionnement envisagés dans cette étude.

Le formalisme matriciel est courant en robotique et la manipulation matricielle n'a pas posé de difficulté à la majorité des candidats. Cependant le jury note des erreurs, d'une part non négligeable de candidats, dans la manipulation des objets mathématiques, qui sont dans ce cas des matrices et non des scalaires. La division d'une matrice par une autre n'a pas de sens et le produit matriciel n'est pas commutatif.

Partie III.A : Conception de l'asservissement en couple d'un actionneur

Dans l'objectif de considérer les couples aux articulations comme grandeurs de commande, cette partie conduit les candidats à l'étude de l'actionnement électrique d'un axe. Ils devaient pour cela mobiliser des capacités dans la modélisation dynamique, dans la manipulation des systèmes linéaires et dans la synthèse pour valider la pertinence de la solution choisie.

Le développement du modèle dynamique d'un axe (**Q14.-Q15.**) est mieux réussi que la modélisation dynamique des questions (**Q9.-Q10.**). Cependant des améliorations sont nettement perfectibles en précisant plus clairement le système isolé et la démarche retenue, en proposant un inventaire d'actions mécaniques extérieures incluant la liaison de guidage (comme en (**Q9.**), l'action mécanique de la liaison pivot est rarement donnée) et en évitant des erreurs : moment d'action mécanique de pesanteur ou de l'inertie équivalente avec des expressions non-homogènes par exemple. Le jury attire l'attention des candidats sur la nécessité de vérifier l'homogénéité des expressions manipulées.

L'élaboration de la loi de commande locale en couple de l'actionneur faisait l'objet des questions (**Q16.-Q19.**). Elle devait être effectuée à partir de la fonction de transfert en boucle fermée calculée à partir du schéma bloc fourni. Ce calcul bien qu'un peu fastidieux n'offrait pas de difficulté particulière. Par manque de rigueur, dans la méthode et dans les calculs, une part non négligeable de candidats éprouve des difficultés pour exprimer les paramètres caractéristiques : gain, pulsation propre, amortissement et constante de temps en fonction des gains de la loi de commande.

L'identification des paramètres de la loi de commande était immédiate, et facile à réaliser, à partir des expressions obtenues (**Q16.**). Le jury remarque toutefois que certains candidats ne connaissent pas la valeur de l'amortissement permettant d'obtenir un comportement amorti critique.

Pour finaliser cette partie, les candidats étaient invités à conclure au moyen de deux questions de synthèse intermédiaire sur les performances de la loi de commande (**Q20.**) puis sur la pertinence de la simplification du modèle de l'exosquelette en considérant transparente la chaîne d'actionnement (**Q21.**). En (**Q20.**), si beaucoup de candidats ont réalisé une bonne analyse des performances en termes de précision et rapidité à partir des réponses fournies, le critère de stabilité a rarement été argumenté précisément à partir des critères du cahier des charges (régime apériodique). L'analyse de la simplification du modèle (**Q21.**) nécessitait de prendre du recul et de comprendre la démarche. Ainsi, l'argumentation est souvent restée trop approximative pour une partie des candidats. Le jury attendait ici une argumentation à partir des écarts quantifiés (évolutions temporelles fournies) et du temps de convergence par rapport à la dynamique du cahier des charges et non des phrases trop qualitatives comme : « les courbes se superposent », « les réponses sont confondues », etc.

Partie III.B : Synthèse de la loi de commande de l'exosquelette

En conservant le modèle simplifié, les questions (**Q22.-Q29.**) conduisaient les candidats à choisir un correcteur pour le mode de renforcement musculaire, en prenant en compte les couplages entre les axes. Les exigences portaient alors sur un niveau de raideur à fixer à priori (exigence 1.2.1.3). La démarche était encore fondée ici sur une approche boucle fermée, les paramètres de la loi de commande regroupés dans des matrices de gain. Le calcul des quatre fonctions de transfert caractéristiques (**Q22.-Q26.**) n'a pas posé de problèmes à la majorité des candidats qui montre ainsi sa capacité à manipuler les notations symboliques, même issues d'un formalisme matriciel. L'analyse de stabilité (**Q24.**) a donné lieu à des erreurs ou des approximations d'une grande partie des candidats. Ici une simple analyse des coefficients des relations caractéristiques permettait de conclure très rapidement à l'instabilité des modèles (absence de terme en p , oscillateur harmonique... ou encore pôles à partie réelle nulle).

Alors qu'une part très importante des candidats disposait des bonnes expressions des fonctions de transfert, peu d'entre eux ont bien identifié les valeurs numériques des gains de la loi de commande à partir des exigences du cahier des charges (**Q28.**). Il suffisait pour cela d'écrire la relation entre les raideurs exprimées dans le diagramme des exigences et les gains statiques des fonctions de transfert H_{C1} et H_{C4} .

Une question de synthèse intermédiaire (**Q29.**) invitait les candidats à analyser la capacité de réglage de la rapidité des axes. Cette question demandait de prendre un peu de recul et a donné lieu à beaucoup d'erreurs et a été peu réussie. Le fait que les axes soient couplés n'était pas la bonne justification, ici le réglage de la raideur (exigence du cahier des charges) au moyen du gain statique conditionnait celui de la pulsation propre et donc la rapidité.

Les questions (**Q30.-Q31.**) invitaient les candidats à analyser les performances d'une loi de commande pour la proprioception. Si la justification de la pertinence du correcteur retenu (**Q30.**) a souvent été approximative, la majorité des candidats montre une bonne maîtrise de la notion de marges de stabilité (**Q31.**) et des conséquences qu'il est possible d'en déduire. Peu de candidats concluent sur l'écart statique à partir du diagramme de Bode, peut-être parce qu'ils ne pensent pas que l'analyse des réponses fréquentielles permet également d'évaluer un niveau de performance sur la précision.

Une question de synthèse (Q32.) invitait les candidats à conclure sur les performances des solutions proposées en exploitant les réponses temporelles pour les deux modes de fonctionnement : renforcement musculaire et proprioception. Cette partie demandait un niveau de recul relativement important et trop peu de candidats analysent les courbes au vu du type de rééducation souhaitée. L'analyse est souvent partielle ou superficielle avec des réponses génériques (le système est précis, stable, ...). Le jury sensibilise les candidats à considérer les questions de synthèse comme étant des questions importantes où il faut prendre du recul sur l'étude menée prise dans sa globalité et argumenter les réponses à partir des critères quantifiés issus des exigences retenues dans le cahier des charges.

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. Structurés 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 ». Ce constat prend une importance particulière dans les questions de synthèse, partielle ou globale, où la prise de recul est indispensable.

La validation de l'étude en sciences industrielles pour l'ingénieur est conduite par l'analyse de l'écart entre les performances attendues, exprimées sous la forme d'exigences, et les performances issues de simulations,

calculées au fil des questions ou de résultats expérimentaux fournis. Le jury ne peut se satisfaire de réponses superficielles, l'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. En conclusion, il attend qu'ensuite, les candidats se prononcent d'une façon argumentée 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.