

Sciences industrielles de l'ingénieur

Présentation du sujet

Le support d'études de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur de la session 2024 est un « *Droïde autonome* » exploité usuellement dans le contexte de l'aide aux personnes et de la logistique du dernier kilomètre.

Les problèmes de la robotique mobile sont particulièrement étudiés actuellement par différentes communautés urbaines, centres industriels ou entrepôts logistiques confrontés à l'augmentation du nombre de colis à traiter depuis l'émergence du e-commerce. Le système objet du sujet 2024 (plus précisément le droïde TH03) a été développé par la start-up française TwinswHeel et l'application visée est celle de la livraison en mode autonome.

L'objectif de l'étude proposée est de concevoir le suivi de trajectoire d'un droïde et de planifier avec pertinence le circuit reliant les différents points de livraison. Ainsi, le fil conducteur du sujet amène, les candidats, de la problématique de « *modélisation du suivi de la trajectoire* » à celle de la « *planification de trajectoire* » en vue d'optimiser un parcours de façon à garantir l'autonomie du droïde et *in fine* la bonne réalisation des tournées de livraison. La définition, la synthèse des paramètres et la validation de la commande du droïde, tant du point de l'architecture que des modèles dynamiques nécessaires, complètent ces étapes.

Un ensemble de questions de synthèse conduit à analyser les résultats observés sur une tournée de livraison de façon à identifier des éléments de progrès, au moyen de la mise en évidence d'un niveau de performance, puis de proposer une solution potentielle en vue de l'améliorer.

Pour cette session d'écrit, la part prise par l'informatique a été relativement importante (20 % du sujet) et amène à la planification de trajectoire du droïde posée sous la forme d'un problème d'optimisation sous contraintes et résolu au moyen d'un algorithme issu d'une approche par programmation dynamique. Le questionnement a été conçu de façon à rester entièrement dans le programme de la filière PSI.

Analyse globale des résultats

Dans la continuité des années précédentes, le jury apprécie la qualité exceptionnelle de certaines copies et donc des excellentes notes qui en résultent. En cela, il veut transmettre aux candidats et aux enseignants qui les forment, des félicitations méritées. Cet état de fait conforte le jury quant à l'orientation prise des sujets et leur contenu.

L'organisation et la longueur du sujet a été conçue en vue de permettre à la majorité des candidats de s'exprimer et à un grand nombre de réussir à traiter l'ensemble des questions. Le jury remarque que :

- les questions d'informatique et de résolution d'un problème d'optimisation ont été abordées par la majorité des candidats avec une très bonne démarche et que l'interprétation physique d'éléments de représentations des graphes a été bien réussie dans l'ensemble. Cela montre leur capacité à associer les concepts théoriques et la réalité ;
- les questions où une démarche de résolution est nécessaire sont plutôt bien réussies, même si parfois les candidats ne cherchent pas, ou s'essouffent, à la mener dans sa totalité et n'arrivent pas au bout de la résolution ;

- les questions d'analyse et synthèse intermédiaires sont assez bien réussies ;
- les questions d'analyse de synthèse globale sont les moins bien réussies car elles nécessitent une prise de recul importante et parfois un niveau d'analyse très précis. Cette remarque doit être relativisée car venant en conclusion du sujet le manque de temps peut conduire à une certaine précipitation dans les réponses des candidats l'ayant abordée.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Le jury attire l'attention des candidats sur le besoin de qualité dans la rédaction. Les copies, relativement peu nombreuses, montrant peu de soin (illisibilité, ratures multiples, allers/retours incessants entre questions, absence de numérotation des questions, etc.) ont systématiquement été pénalisées.

D'une façon générale lors de cette session, très peu de candidats n'ont pas fait l'effort de mettre en exergue leurs résultats en les encadrant par exemple, ce qui est une bonne chose. Toutefois, il est fréquent de constater que les candidats :

- peuvent rappeler un résultat de cours vu pendant leur formation sans le contextualiser et/ou l'adapter au cas du sujet proposé ;
- n'apportent pas toujours une analyse aux résultats obtenus.

Le jury rappelle l'importance qui est attribuée aux justifications argumentées et exhaustives des hypothèses, l'énoncé des savoirs et la conduite des démarches utilisées lors du traitement des questions. 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 généralement avec des données quantifiées, une propriété. 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** dans la construction des réponses aux questions. Un résultat **sans les justifications minimales** nécessaires n'est pas valorisé.

Le jury rappelle aussi à certains candidats que faire l'impasse sur certaines questions pour arriver à la dernière, puis remonter le sujet pour traiter d'une façon désordonnée d'autres questions n'est pas une stratégie à adopter dans une épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur qui **nécessite d'appréhender le sujet dans sa globalité**. Aussi, ce comportement assez opportuniste pour gagner des points, tout en évitant les questions de réflexion, est contraire au principe d'une épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur et sera pénalisé dans la suite.

Partie I – Modélisation linéaire du suivi de la trajectoire

Cette partie (**Q1.-Q10.**), amène les candidats à définir les modèles nécessaires à la conception d'un superviseur permettant de calculer les consignes de lacet et de vitesse du droïde, de façon à suivre la trajectoire de livraison issue de la planification. Après une brève étude (**Q1.-Q2.**) des paramètres caractéristiques de l'approche algorithmique utilisée par le superviseur, notée « pure poursuit », mal adaptée à une analyse

et une synthèse de ses paramètres, un modèle linéaire est dérivé (**Q3.-Q6.**) puis validé au regard des résultats de simulation (**Q7.-Q10.**).

Dans l'ensemble cette partie a été bien réussie par les candidats.

Néanmoins, dans les questions (**Q3.-Q6.**) relatives à l'étude des modèles linéaires, certains candidats arrêtent prématurément leur démarche en vue d'explicitier complètement le modèle linéaire ou/et les propriétés associées. L'étude des propriétés du modèle linéaire équivalent est assez bien réalisée, cependant certains candidats ne justifient pas précisément leurs conclusions (stabilité, précision ou encore rapidité) et d'autres ont évoqué le critère de Routh (hors programme) sans le développer ou le signe des pôles de la fonction de transfert sans les calculer, alors qu'une simple évocation du signe des coefficients du polynôme caractéristique d'ordre 2 était suffisante.

La conclusion de cette partie (**Q7.-Q10.**) est mitigée. La partie simulation (**Q7.-Q8.**) consistant à compléter les lignes de code en Python pour réaliser la simulation du modèle défini au préalable a été généralement bien posée par une majorité de candidats. L'analyse comparative (**Q9.-Q10.**) sans poser des réels problèmes de compréhension n'a pas été bien abordée par une part importante des candidats en raison d'une approche trop qualitative. Il fallait ici s'appuyer sur une quantification des écarts entre les résultats obtenus par le modèle linéaire et par l'algorithme « pure poursuit » (**Q9.**) pour conclure sur la validité du modèle linéaire puis de comparer le choix effectué au regard des exigences du cahier des charges (**Q10.**). Il s'agissait ici de comparer deux modèles et non pas un modèle vis-à-vis du cahier des charges. Lorsqu'une étude comparative est proposée et si les données fournies le permettent, le jury conseille aux candidats de quantifier au préalable les critères et les indicateurs caractéristiques de l'étude afin d'argumenter leurs réponses.

Partie II – Conception de la commande du droïde TH03

L'ensemble des questions (**Q11.-Q25.**) amenait les candidats à étudier l'architecture de commande en vitesse linéaire et vitesse de lacet du droïde. Cette phase nécessitait de définir un modèle de comportement dynamique (**Q11.-Q16.**) puis de calculer les paramètres et de valider la robustesse (**Q17.-Q25.**) de la structure de commande.

La démarche dans cette partie nécessitait de mobiliser des compétences en dynamique du solide de façon à déterminer une représentation du système.

Il est rappelé que dans le cadre de la justification de la forme particulière d'un opérateur d'inertie, un plan de symétrie matérielle est obligatoirement défini par un point du plan et un vecteur normal à ce plan (ou un couple de vecteurs coplanaires et non colinéaires du plan considéré).

Concernant la définition des modèles dynamiques, les calculs pourtant classiques des éléments de réduction de torseurs cinématiques, cinétiques et dynamiques posent encore des difficultés, essentiellement par manque de rigueur mathématique. De plus, lorsqu'un résultat est demandé sous sa forme la plus simple (**Q14.** par exemple), l'objectif n'est surtout pas de le projeter dans une base en particulier, mais au contraire d'exprimer le résultat dans une base qui apparaît « naturelle » et qui en permet une expression simple.

La rigueur nécessaire pour répondre aux questions portant sur des concepts de mécanique doit être améliorée de façon à atteindre le niveau d'exigences du jury. Il est rappelé que pour établir toute équation faisant intervenir des actions mécaniques, il est indispensable (**Q12.-Q15.-Q16.**) :

- d'indiquer l'isolement effectué ;
- d'effectuer un inventaire exhaustif des actions mécaniques extérieures au système isolé dans le cas de l'usage des théorèmes généraux (PFS, PFD) ou bien encore un bilan de puissances extérieures/intérieures au système isolé dans le cas de la mise en œuvre du théorème de l'énergie cinétique. Pour ce

faire, l'usage d'un graphe de structure (**Q12.**) mettant en évidence les solides, les liaisons et les actions mécaniques est d'autant plus indispensable que la structure du système est complexe. Il est toutefois rappelé qu'un moment articulaire (dans ce contexte les couples moteurs) ne peut être considéré que d'un solide i sur un solide j et non pas simplement sur un solide i à l'instar de l'action mécanique de gravité, sous peine d'être systématiquement considéré comme une action mécanique extérieure, quel que soit l'isolement effectué. Beaucoup de copies ont mis en parallèle la liaison et l'action mécanique ne résultant entre le solide i et le solide j , ne permettant pas une lecture univoque de leur graphe ;

- de préciser le ou les théorèmes généraux utilisés, le point de réduction des relations en moment, ainsi que la ou les directions de projection afin de limiter les calculs au strict nécessaire pour déterminer les équations demandées et seulement celles-là. La base d'écriture des vecteurs et des torseurs doit être systématiquement et clairement précisée.

Concernant l'étude de l'architecture de commande (**Q17.-Q25.**), la justification du choix du correcteur (**Q17.**) a souvent été argumentée d'une façon trop générique (pour améliorer la précision) ou encore erronée (pour améliorer la stabilité) et non contextualisée. Il suffisait ici de remarquer **en revenant au cahier des charges**, que le choix du correcteur était dicté par le critère de précision au regard des perturbations. La synthèse du correcteur nécessitait ici une approche originale par le calcul préalable du gain (à l'inverse de l'approche plus classique) et nécessitait l'utilisation du théorème de la valeur initiale, là encore peu souvent utilisé. Si le théorème de la valeur initiale est dans l'ensemble connu, le déroulement des calculs montre souvent un manque de rigueur (**Q18.**). Le simple suivi structuré à partir de l'expression de la valeur initiale de la grandeur de sortie du correcteur suffit à démontrer l'expression proposée.

Un diagramme de Bode (**Q20.**) est un outil graphique d'analyse. Toute construction qui n'apporte pas d'information est à supprimer pour faciliter la lecture, en revanche il est indispensable de bien préciser les éléments nécessaires à l'analyse (pulsations de brisure avec unités, pentes, nom des axes des graphes, points particuliers...). Dans l'ensemble cette question a été bien traitée, la difficulté principale pour certains candidats a été de situer le diagramme de gain par rapport à l'axe 0 dB.

Pour ce système, les modèles étant multivariables (deux entrées, deux sorties couplées), le questionnement a été réalisé de façon à rester strictement dans le programme de la filière PSI. Une question (**Q21.**) invitait les candidats à conclure sur la validité d'une approche simplifiée considérant des modèles découplés et leur robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres (vitesse linéaire et longueur des segments). La comparaison des modèles couplé/découplé a été bien abordée par la majorité des candidats, mais l'analyse de l'impact de l'influence des paramètres a été souvent trop qualitative. Il s'agissait ici de noter que la diminution de longueur des segments, comme suggéré dans le sujet, se traduisait en pratique par l'augmentation de la pulsation propre d'une paire de zéros complexes conjugués et par conséquent par une diminution de la marge de phase. À noter cependant que ce niveau d'analyse était exigeant.

La conclusion de cette partie invitait les candidats (**Q25.**) à choisir un paramètre du correcteur au regard de tracés fréquentiels fournis. Cette question demandait un retour sur le cahier des charges et de considérer l'ensemble des critères exigés pour la chaîne d'asservissement. Dans l'ensemble cette conclusion a été bien traitée, toutefois elle a mis en évidence une grande disparité dans la précision des réponses des candidats tant du point de vue des critères considérés (certains étant oubliés) que de leur quantification.

Partie III – Stratégie de planification de trajectoire

Cette partie, (**Q26.-Q30.**), proposait de finaliser et valider un algorithme de planification de trajectoire en vue d'organiser une tournée de livraison. Pour cela l'entrepôt logistique et les points de livraison sont modélisés au moyen d'un graphe orienté où les arcs représentent les quantités d'énergie consommées pour le déplacement entre deux nœuds. Pour ce problème d'optimisation sous contrainte un raisonnement issu de la programmation dynamique était proposé.

L'ensemble de ces questions, faisant appel à des compétences en informatique, a été assez discriminant en notant cependant que la majorité des candidats l'a abordé. Le sujet demandait d'analyser et de compléter des scripts écrits en exploitant les fonctionnalités du langage Python.

Le jury est resté tolérant sur l'évaluation de la syntaxe du code écrit à condition que l'algorithme envisagé restait compréhensible.

Ainsi, si l'interprétation physique du graphe et les fonctionnalités globales du script (**Q26.**, **Q29.** et **Q30.**) ont été bien appréhendées par une majorité de candidats, beaucoup d'entre eux ont effectué des analyses trop génériques concernant les choix de valeurs dans les structures de données utilisées, sans les contextualiser vis-à-vis du problème étudié. Ils ont ainsi éprouvé des difficultés pour traduire avec succès les équations de la programmation dynamique pour compléter la procédure d'optimisation (**Q27.** et **Q28.**) et parfois montré des confusions pour la gestion des indices dans l'implantation de l'algorithme.

Une série de questions (Q31.-Q33.) invitait à conclure sur les performances des solutions proposées en exploitant les évolutions de différentes grandeurs enregistrées au cours d'une tournée de livraison. Cette partie demandait un niveau de recul relativement important et très peu de candidats ont pu identifier le paramètre le plus critique (**Q31.**), ici l'angle de la trajectoire, sur le niveau de performance. L'analyse paramétrique (**Q32.**) de l'influence de la vitesse du droïde et de la longueur des segments est mieux réussie même si elle fait ressortir un certain manque de prise de recul des candidats l'ayant abordée par rapport au cas d'étude. Il est rappelé aux candidats de bien adapter les observations et les réponses au cas d'étude proposé. En conclusion du sujet, une dernière question (**Q33.**) invitait les candidats à proposer une solution en vue d'améliorer le niveau de performance observé. La réponse à cette question était la suite logique des deux questions précédente (**Q31.** et **Q32.**). Aussi très peu de candidats ont pensé à adapter les paramètres de la loi de commande au parcours connu a priori, la plupart se réfugiant sur une réponse généraliste et superficielle de réglage sans approche structurée proposée. À noter cependant des réponses intéressantes de certains candidats proposant un réglage en optimisant le comportement sur un cycle de fonctionnement, même si dans ce cas ce n'est pas la meilleure solution.

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 de critères quantifiés issus des exigences retenues dans le cahier des charges. Les conclusions génériques sont à proscrire.

Conclusion

Le jury souhaite rappeler la conclusion des précédentes sessions car elle reste opportune : « *Les sujets de sciences industrielles pour l'ingénieur sont construits autour d'une problématique industrielle. Structurés avec une colonne vertébrale et un fil conducteur, ils proposent une progressivité dans la démarche globale 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 et dans les évolutions des solutions proposées pour améliorer un niveau de performance ou de service.

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 distance entre les niveaux attendus et ceux 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 et les analyses quantifiées lorsque cela est possible.

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 enseignants à persévérer dans la voie de l'excellence de la préparation.