

# Sciences industrielles de l'ingénieur

## Présentation du sujet

Le sujet porte sur l'analyse des performances d'un robot à câbles de type suspendu développé pour la manipulation de charges lourdes pour le génie civil par plusieurs centres de recherche de la région nantaise. L'objectif général est d'évaluer certaines performances du robot à câbles, et notamment la précision du positionnement, afin de les comparer à celles d'un robot portique traditionnel.

La première partie a pour objectif de mettre en place le modèle inverse qui permet de relier la longueur des câbles à l'attitude de la plate-forme dont les mouvements sont restreints dans tout le sujet au plan médian afin de simplifier l'étude.

La seconde partie étudie l'évolution dynamique des efforts dans les câbles supérieurs lors d'un mouvement simplifié de translation verticale de la plate-forme en position centrée suivant une loi de commande en triangle des vitesses. Cette partie permet de tracer et d'analyser l'évolution temporelle du couple moteur.

La troisième partie s'intéresse à la comparaison des incertitudes de positionnement de la plate-forme, dues d'une part à la résolution des capteurs de position utilisés et d'autre part à l'allongement des câbles. La détection d'une erreur de positionnement trop importante, due par exemple à la défaillance d'un câble, est obtenue à l'aide d'une centrale inertielle dont le traitement des signaux de mesure d'accélération et de taux de rotation fait l'objet d'une étude.

La quatrième partie a pour objectif de vérifier que la source d'énergie alimentant les variateurs des moteurs synchrones utilisés permet d'assurer les performances de vitesse angulaire et de couple dans le cas le plus défavorable.

La cinquième partie vise à justifier le réglage du correcteur de l'asservissement en position angulaire des moteurs pour satisfaire des exigences de stabilité et de précision.

Pour terminer, une sixième partie de synthèse permet de comparer les performances du robot à câbles étudié dans ce sujet à un robot portique traditionnel. Cette partie suppose de prendre du recul par rapport à l'ensemble des études effectuées précédemment et de conclure quant à l'objectif du sujet.

## Analyse globale des résultats

L'ensemble des questions couvre de nombreux points du programme de la filière TSI. Toutes les questions du sujet ont été abordées, et certains candidats ont produit de très bonnes copies.

Si une grande majorité des candidats rédige avec soin leur copie en soignant l'écriture et les explications, le jury regrette de trouver encore des copies mal rédigées, où les questions, traitées dans le désordre, ne sont pas correctement identifiées et les résultats ne sont pas mis en évidence : ces copies ont été sanctionnées par le malus de présentation. Le jury rappelle à ce propos que la démarche d'étude proposée dans le sujet est cohérente et progressive, et que les candidats qui traitent les questions dans le désordre ne sont pas en mesure de s'approprier correctement la problématique.

Le sujet comporte de nombreuses applications numériques qui permettent de conclure : le jury rappelle que celles-ci doivent nécessairement comporter un nombre de chiffres significatifs cohérent et une unité.

Enfin, le jury constate un manque d'attention dans la lecture de l'énoncé, notamment au travers des erreurs de signes dans les expressions trouvées.

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

### Questions 1 à 4 : gestion de l'attitude de la plateforme dans le plan médian

Les projections guidées des deux relations vectorielles conduisent quelques candidats à des erreurs de signes ou de fonctions trigonométriques. Le jury note des difficultés à exprimer la longueur du câble équivalent en utilisant une relation du type  $\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = 1$  et des développements calculatoires parfois très importants qui ont pu faire perdre du temps aux candidats. Le jury note un manque de recul quant à la relation entre le nombre de degrés de liberté de la plate-forme dans le plan et le nombre de câbles à piloter indépendamment. Même si les deux expressions à dériver par rapport au temps sont données, il est regrettable qu'un nombre important de candidats ne parviennent pas à déterminer les deux relations demandées, qui s'obtiennent par des combinaisons linéaires des expressions dérivées.

### Questions 4 à 11 : commande des moteurs pour une évolution rectiligne de la plate-forme

Même si les liens entre les signes des différentes vitesses de rotation étaient clairement fournis dans le texte, trop de candidats proposent un signe faux dans la relation entre la vitesse d'enroulement du câble et la vitesse de rotation du moteur, issue de la relation de roulement sans glissement. Cette constatation rejoint l'invitation des futurs candidats à une lecture plus attentive des informations contenues dans l'énoncé.

Si la détermination des expressions des énergies cinétiques et des puissances extérieures sont correctement maîtrisées, l'application du théorème de l'énergie cinétique a posé des soucis aux candidats dans la mesure où l'inertie équivalente dépendait de la géométrie et devait donc être dérivée. Le jury regrette que certains candidats parviennent à l'expression donnée dans l'énoncé en incluant dans leur dérivation erronée des termes qu'ils ne parviennent pas à justifier ou en modifiant les signes des expressions obtenues précédemment de façon à obtenir le résultat fourni : ces candidats ont évidemment été pénalisés en conséquence.

La simplification des relations dynamiques dans l'hypothèse de quasi-statique n'est pas du tout maîtrisée puisque la plupart des candidats conservent des dérivées par rapport au temps dans leurs expressions.

Le jury regrette enfin que les candidats ne parviennent pas à trouver les relations cinématiques usuelles et à tracer les évolutions temporelles de la vitesse et de de la position dans le cadre d'une sollicitation en trapèze des vitesses, simplifiée ici au cas d'un triangle (absence de phase à vitesse constante). Pour la courbe de position, la continuité de la pente en amont et aval de la position médiane est en particulier indispensable.

### Questions 12 à 21 : analyse des différentes sources d'incertitude sur le positionnement de la plate-forme

La prise en compte du nombre de voies d'un codeur incrémental sur sa résolution n'est pas maîtrisée. Le jury a cependant tenu compte, quand elle était correcte et clairement définie, de la démarche même sans quadruplement de la résolution par traitement des fronts.

Le jury note que la relation de Hooke, reliant la contrainte dans le câble à sa déformation, vue en cours, n'est acquise que par une minorité de candidats et ne permet donc pas d'être appliquée pour estimer l'incertitude de positionnement due à l'allongement des câbles. La plupart des relations proposées par les candidats à cette question ne sont pas homogènes.

Le traitement des informations issues de la centrale inertielle supposait d'analyser un schéma-bloc fourni. Si la lecture du schéma-bloc est bien acquise, il est surprenant que les candidats ne parviennent pas à reconnaître les filtres de type passe bas et passe haut et à tracer le diagramme de gain correspondant. De plus, le jury constate que de nombreux candidats ne parviennent pas à exprimer correctement la forme

canonique demandée des fonctions de transfert, dont les expressions sont laissées brutes. La démarche de passage d'un filtre continu à un filtre numérique à l'aide d'une équation de récurrence basée sur un schéma de dérivation à gauche n'est pas acquise et seuls quelques rares candidats ont réussi à mettre en œuvre ce calcul. Les compétences en lien avec le programme d'informatique du tronc commun ne sont donc pas correctement acquises.

Les candidats ne parviennent pas à appréhender le graphe d'états partiel fourni et à proposer les expressions de l'événement et des actions demandées. Le jury recommande donc aux futurs candidats de travailler l'analyse des diagrammes SysML des systèmes séquentiels.

### **Questions 22 à 28 : étude de l'exigence « fournir l'énergie électrique aux moteurs »**

Le lien entre la valeur de l'angle  $\Psi$  et le quadrant de fonctionnement de la machine synchrone n'est pas correctement appréhendé.

Le jury regrette que les candidats ne parviennent pas à réaliser le bilan de puissance de la conversion électromagnétique permettant de déterminer les grandeurs électriques efficaces demandées. Seules les valeurs du courant efficace par phase et la fréquence des grandeurs électriques sont correctement abordées par les candidats.

Le rôle de la résistance de freinage et sa nécessité pour dissiper l'énergie notamment lors d'une phase de descente de la plateforme est rarement évoqué par les candidats.

Le jury s'étonne des résultats numériques erronés obtenus par les candidats lors de l'estimation de l'énergie récupérée lors de descente de la plate-forme sur une hauteur de 1 m, l'ensemble des valeurs numériques nécessaires étant donné dans l'énoncé. Sur ce constat, le jury suggère à nouveau aux futurs candidats de bien lire l'énoncé et d'en extraire les données pertinentes.

### **Questions 29 à 34 : étude de l'asservissement de la longueur d'un câble pour gérer le mouvement**

Si le lien entre la constante de temps et la bande passante en boucle fermée pour un système du premier ordre est globalement acquis (quelques justifications incohérentes), de nombreux candidats ne parviennent pas à tracer correctement le diagramme de Bode asymptotique du produit d'un système du premier ordre par un intégrateur, et notamment à positionner correctement les asymptotes du diagramme de gain sur le document réponses fourni. Ce problème de positionnement vertical entraîne des erreurs de lecture de la marge de phase. Le jury a tenu compte de toute démarche cohérente pour la mise en œuvre du tracé du diagramme ainsi que de la détermination de la marge de phase, dès lors qu'elle était clairement explicitée.

Le jury a constaté des réponses intéressantes de nombreux candidats sur le lien entre la classe de la fonction de transfert en boucle ouverte et les performances de précision du système en boucle ouverte. La réponse à cette question classique, utilisant directement le résultat du cours sans mise en œuvre du calcul, a permis à des candidats de fournir des réponses à la fois cohérentes et argumentées.

Néanmoins, le jury s'inquiète à nouveau cette année des confusions entre fonction de transfert en boucle ouverte et fonction de transfert en boucle fermée ainsi que de la prise en compte ou non de certains blocs de la chaîne de retour dans la fonction de transfert en boucle ouverte. Le jury conseille aux futurs candidats de savoir exprimer la fonction de transfert en boucle ouverte, même lorsque le retour n'est pas unitaire.

### **Question 35 : question de synthèse**

Le tableau de synthèse avait pour objectif de comparer les performances du robot à câbles étudié à un robot plus connu de type portique. Cette question ne peut pas être traitée de manière déconnectée des études précédentes. Il est d'ailleurs surprenant de constater que certains candidats traitent cette partie

sans avoir répondu à de nombreuses questions des parties précédentes et proposent alors des réponses totalement erronées.

## **Conclusion**

L'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur est destinée à valider d'autres compétences que celles évaluées par les autres disciplines, en s'appuyant sur des réalisations industrielles qu'il faut appréhender dans leur complexité. Il est recommandé aux candidats de lire attentivement l'énoncé et de traiter les questions dans l'ordre pour appréhender correctement la problématique et la démarche de résolution proposée. Il est essentiel que les candidats s'attachent à répondre aux questions d'analyse, de critique, de validation des modèles et des solutions technologiques proposées. En dernier lieu, une bonne culture technologique est indispensable pour réussir cette épreuve.