

# Sciences industrielles de l'ingénieur

## Présentation du sujet

Le support de l'épreuve 2021 concerne l'étude des performances de la base TC200, conçue par Tecdron. Il s'agit d'un chariot dont la mise en mouvement est effectuée notamment par quatre roues holonomes motorisées, supportant un bras de robot collaboratif de vissage automatisé de pièces d'avionique dans une carlingue. Ce sont les exigences associées au déplacement de la base TC200 qui sont validées dans ce sujet.

La première partie du sujet permet de valider la structure de la base TC200, notamment les consignes cinématiques à imposer au niveau des quatre motorisations pour suivre une trajectoire de consigne de la base définie dans le plan de mouvement. Cette partie valide aussi le dimensionnement de l'articulation de l'essieu avant, rendu mobile par rapport au châssis pour limiter l'hyperstatisme de la structure.

La seconde partie permet de valider le choix des machines, des contrôleurs et capteurs associés. La base TC200 étant pilotée de manière globale en vitesse, cette partie s'intéresse aux performances du contrôle interne du couple — et donc du courant — pour chaque moteur synchrone brushless. Elle fait notamment appel à des résultats de simulation d'un modèle multiphysique d'un moteur.

La troisième partie a pour objectifs de justifier ou de mettre en place un modèle dynamique de la base TC200, dont chaque motorisation est asservie en vitesse, pour que la base suive au mieux les consignes de vitesse. Les hypothèses de simplification du mouvement à un mouvement de translation permettent de limiter la complexité des lois de mouvement.

La quatrième partie, utilisant les modèles mis en place précédemment, permet de simuler le suivi d'une trajectoire de consigne, compte tenu du réglage des asservissements de vitesse de chaque motorisation. Les perturbations influençant nettement la précision du positionnement à chaque poste de vissage, la nécessité d'un asservissement global en position de la base TC200 par des capteurs externes est mise en évidence. La conclusion de l'étude permet de justifier que le robot de vissage doit être équipé de sa propre commande en position par caméra pour satisfaire les exigences de précision dans la mise en position des vis.

## Analyse globale des résultats

L'ensemble des questions couvre de nombreux points du programme et les différentes parties de l'épreuve, progressives et cohérentes, permettent à une majorité de candidats de s'exprimer. Toutes les questions ont été abordées et certains candidats ont produit de bonnes copies.

À nouveau cette année, le jury note que les questions de synthèse sont très rarement traitées et que les candidats ont encore des difficultés à analyser correctement les résultats de simulation fournis en fin de sujet. Ces derniers permettent pourtant de conclure par rapport aux exigences présentées en début de sujet et à la problématique.

Si une grande majorité des candidats rédige avec soin leur copie, le jury regrette de trouver encore trop de 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.

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

Une erreur typographique sans conséquence était présente dans le tableau 1 puisque la roue 40 est la roue arrière droite (et non gauche). Dans la mesure où seules les relations au niveau de la roue 10 faisaient l'objet d'un questionnement spécifique et que le modèle cinématique d'une des motorisations est rappelé figure 17, cette erreur typographique a été sans conséquence.

### **Questions 1 à 6 : analyse de la solution de déplacement de la base TC200**

Les fonctions classiques (traiter, acquérir puis moduler, transmettre et agir) des constituants de la chaîne fonctionnelle d'une des motorisations sont mal connues des candidats. De plus, de nombreux candidats ont eu des difficultés pour s'approprier la structure. L'analyse de l'hyperstatisme des deux modèles proposés de la base TC200 est décevante. Les contacts entre les rouleaux des roues holonomes et le sol sont la plupart du temps omis, les mobilités ne sont pas correctement énumérées. Le jury note des calculs de degré d'hyperstatisme d'un modèle conduisant à des résultats négatifs non remis en cause par les candidats. Le jury conseille aux candidats de s'appuyer sur un graphe des liaisons correctement effectué au préalable.

L'hypothèse de roulement sans glissement demandée est rarement évoquée, le jury regrette que les candidats évoquent plus souvent des hypothèses de système à l'arrêt, de problème plan ou de liaisons parfaites pour justifier les deux relations cinématiques proposées, liant les vitesses de la base aux vitesses de rotation d'une des roues motorisées. Si le modèle inverse permettant d'exprimer les paramètres « articulaires » (vitesses angulaires des roues) à partir des paramètres cinématiques du châssis est bien compris, le modèle direct est moins bien abordé car il repose sur l'analyse précédente de l'hyperstatisme et sur la redondance des équations.

La lecture d'un graphe d'états permettait de tracer une trajectoire de consigne type pour ce robot. Le jury constate qu'une très grande majorité de candidats n'aborde pas cette question. Pour les rares candidats ayant abordé cette question, elle est souvent correctement traitée en dehors d'un non-respect de l'échelle du document réponse.

### **Questions 7 à 10 : validation du dimensionnement de l'articulation de l'essieu avant**

Le dimensionnement de l'articulation de l'essieu avant, nécessaire à la réduction de l'hyperstatisme, fait appel aux modèles de flexion en résistance des matériaux : flexion plane simple et flexion pure. Le jury note des problèmes de signe, des confusions entre résultante et moment et l'absence de vérification de l'homogénéité des expressions proposées par certains candidats.

### **Questions 11 à 15 : validation des machines et des contrôleurs**

Le jury remarque des confusions entre nombre de paires de pôles et nombre de pôles. La relation entre la vitesse de rotation du moteur et la pulsation des courants statoriques est mal connue.

L'écriture de la loi des mailles en notation complexe a souvent posé problème. En prenant appui sur le diagramme de Fresnel, un nombre trop important de candidats ne parvient pas à justifier correctement l'intérêt d'opter pour un angle  $\Psi = 0$ . De nombreux candidats n'ont pas réussi à utiliser le diagramme de Fresnel pour déterminer les grandeurs demandées, avec notamment des confusions entre la force électromotrice et la tension d'alimentation.

Les candidats ne parviennent pas à prendre encore suffisamment de recul par rapport aux courbes simulées par le modèle multiphysique pour justifier et repérer le couple résistant variable à l'origine du phénomène de baisse de la vitesse et d'augmentation de l'intensité du courant. Dans l'exploitation des courbes simulées, il y a une confusion entre amplitude et valeur efficace.

La validation du codeur incrémental choisi par rapport à la fréquence maximale du signal entrant dans le contrôleur est trop rarement abordée.

### Questions 16 à 18 : étude de la boucle de courant

De nombreux candidats traitent correctement cette partie. Le jury regrette néanmoins que certains candidats ne parviennent toujours pas à passer du domaine temporel au domaine symbolique de Laplace pour trouver des fonctions de transfert, et qu'il reste des grandeurs physiques dans les fonctions de transfert proposées, voire la variable temporelle  $t$ . Dans le cadre de l'asservissement de courant, le sujet propose de déterminer la fonction de transfert  $I_q(p)/V_q(p)$  alors que certains candidats déterminent la FTBF  $\Omega_m(p)/V_q(p)$  en raison d'une mauvaise lecture de l'énoncé et de l'application sans réflexion de la formule de Black.

### Questions 19 à 21 : commande particulière étudiée dans le cas de la translation

Cette partie a pour objectif de lier les efforts tangentiels exercés par le sol sur les rouleaux aux paramètres du mouvement à l'aide des théorèmes généraux de la dynamique dans le cadre simplifié du mouvement de translation du châssis par rapport au sol. La justification du modèle d'action mécanique du sol sur les rouleaux est incomprise par la plupart des candidats, qui, au lieu d'appliquer le théorème du moment statique au rouleau selon l'axe de la liaison pivot rouleau-roue, proposent des justifications incohérentes. La confusion entre action mécanique et mouvement est à souligner. Dans cette partie, où les hypothèses clairement énoncées suppriment la rotation du châssis par rapport au sol, certains candidats font apparaître cette vitesse de rotation dans leurs expressions ce qui montre une mauvaise lecture des hypothèses et de l'énoncé. Le jury rappelle ici que les théorèmes généraux de la dynamique se décomposent en deux : théorème de la résultante dynamique (en projection selon un ou plusieurs axes à définir), théorème du moment dynamique (en un point et en projection selon un ou plusieurs axes à définir). Le jury regrette l'application beaucoup trop vague du principe fondamental de la dynamique.

### Questions 22 à 24 : équation du mouvement pour chaque motorisation

Dans le cadre de cette modélisation comportant deux degrés de liberté en translation, il est surprenant que la plupart des candidats envisage d'utiliser le théorème de l'énergie cinétique ; seul le théorème du moment dynamique appliqué à l'ensemble (roue+rouleau), en un point de son axe et en projection selon l'axe de rotation de la roue permet de justifier l'expression proposée. C'est l'utilisation de l'ensemble des modèles mis en place précédemment qui permet alors d'exprimer le moment d'inertie équivalent d'une motorisation, dans lequel apparaît le rapport de réduction au carré.

Le jury conseille aux candidats de valider leur résultat en le comparant aux expressions usuelles qu'ils ont obtenues dans l'année car il est impossible de voir apparaître un rapport de réduction qui n'est pas au carré dans l'expression du moment d'inertie équivalent d'une chaîne de motorisation.

### Questions 25 à 30 : étude de l'asservissement en vitesse d'un moteur

Cette partie est généralement bien traitée dans la mesure où, après simplification de la boucle de courant interne, la fonction de transfert en boucle fermée de l'asservissement de vitesse est un système du premier ordre. Seul le gain (unitaire) de cette fonction de transfert pose quelques soucis puisque certains candidats ont omis le gain  $K_{\text{cod}}$  dans la chaîne directe. Le jury note néanmoins des confusions sur la justification de la stabilité et la valeur de la marge de phase. Il est ainsi surprenant de voir que la stabilité se justifie par la présence d'un intégrateur dans la boucle ouverte. Il apparaît là une confusion entre stabilité et précision dans certaines copies.

L'identification de la FTBO de type intégrateur à partir du diagramme de Bode fourni pose des soucis car la lecture du diagramme de gain et de ses échelles n'est pas acquise. La pulsation de l'intégrateur est souvent confondue avec le gain pour la plus petite pulsation du diagramme de gain.

### **Questions 31 à 33 : validation des performances du suivi de trajectoire**

Il s'agit ici de relever et de valider les performances de la base TC200 à partir de courbes simulées. L'écart de trajectoire est un scalaire qui se base sur la norme de l'écart de position entre la trajectoire de consigne et la trajectoire réelle. Il est surprenant de trouver dans les copies des expressions non scalaires de cet écart. De plus, il est possible de valider l'écart en régime permanent à chaque poste de vissage en analysant le comportement des courbes à l'arrivée au poste de vissage. Cet écart est nul en l'absence de perturbation et trop important dans le cas de l'introduction d'une perturbation. Les candidats confondent souvent l'écart en régime permanent (à l'arrivée au poste de vissage) et l'écart dynamique à chaque instant entre la trajectoire de consigne et la trajectoire réelle. Le jury note aussi des réponses non justifiées par une référence précise aux courbes de simulation fournies.

Quelques solutions technologiques intéressantes permettant de réduire l'écart en présence de perturbations ont été proposées par les candidats.

### **Questions 34 : conclusion**

Le jury note que les candidats éprouvent des difficultés à faire une synthèse de la démarche utilisée dans le sujet pour vérifier l'exigence de positionnement de la base TC200, mise à mal par la prise en compte des perturbations. La conclusion permettait de justifier la présence d'un contrôle par caméra de la position du bras manipulateur implanté sur la base TC200 pour le vissage des vis dans la carlingue pour suppléer le manque de précision de la base TC200 par rapport au sol. Très peu de candidats ont évoqué cette présence, justifiant qu'une précision de 1 cm était suffisante pour le positionnement de la base TC200. Certaines justifications sont d'ailleurs surprenantes, ce qui montre un manque de lecture de l'énoncé.

### **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.