

Composition de Physique et Sciences de l'Ingénieur, Filière MP (X)**Présentation du sujet**

Le sujet proposé cette année comprend deux parties indépendantes permettant d'étudier, d'une part, la commande d'un exosquelette actif dans le cadre des sciences de l'ingénieur, et d'autre part, l'analyse de deux phénomènes d'instabilités mécaniques en physique.

La première partie, consacrée aux sciences de l'ingénieur, porte sur l'étude d'un exosquelette de bras développé par le CEA LIST. L'objectif est de déterminer la commande des moteurs permettant une interaction fluide entre l'utilisateur et le dispositif. La première étape consiste à modéliser le coude humain par une étude dynamique prenant en compte la masse, les couples moteurs et les frottements. On établit ensuite un modèle équivalent simplifié permettant de déterminer les paramètres mécaniques caractéristiques du mouvement. La seconde étape vise à modéliser l'interaction entre le robot et l'humain : les équations de mouvement du système couplé sont établies, puis linéarisées afin d'obtenir une relation exploitable pour la commande du moteur. Enfin, la dernière partie de cette section s'intéresse à la commande en boucle fermée de position du bras robotisé. Le modèle de commande met en œuvre un asservissement imbriqué en vitesse et position dont les correcteurs sont réglés pour répondre aux critères de stabilité, rapidité et précision. L'efficacité de la commande est vérifiée par simulation, notamment lors du port d'une masse en bout de bras.

La seconde partie, dédiée à la physique, s'attache à l'étude d'instabilité d'une couche de cristal liquide. La première étude concerne une structure élastique élancée soumise à une compression axiale. Elle permet de mettre en évidence le phénomène de flambement : au-delà d'un certain seuil d'effort, la structure fléchit pour adopter une configuration d'énergie minimale. La seconde étude traite du comportement d'un film de cristal liquide en phase smectique A soumis à une extension de son épaisseur. On modélise le matériau comme un empilement de couche met ainsi en évidence le lien entre les instabilités élastiques macroscopiques et les déformations microscopiques d'un matériau structuré.

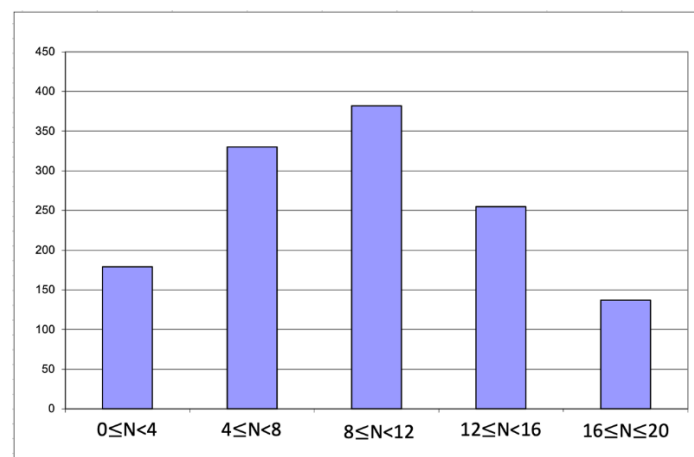
Résultats des candidats

Figure 1 : Statistique des résultats des candidats de l'épreuve par intervalle de notes

Les figure 2a, 2b, et 2c illustrent la fraction de candidats ayant abordé chaque question pour la partie science de l'ingénieur. Les figure 2d, 2e, et 2f illustrent la fraction de candidats ayant abordé chaque question, pour la partie physique.

Comme souvent, on voit assez clairement que les dernières questions des parties 1 et 2 ont été nettement moins abordées que les premières. Ce sont pourtant ces parties, moins abordées par les candidats, qui ont permis de départager les meilleurs d'entre eux.

On regrettera que les questions nécessitant des qualités d'analyse aient été significativement moins abordées que celles plus strictement calculatoires. Lorsque qu'elles ont été abordées, elles ont été assez mal traitées, comme la deuxième question de la partie 1 par exemple qui a été traitée par environ 90% des candidats mais seuls 20% des candidats ont répondu correctement.

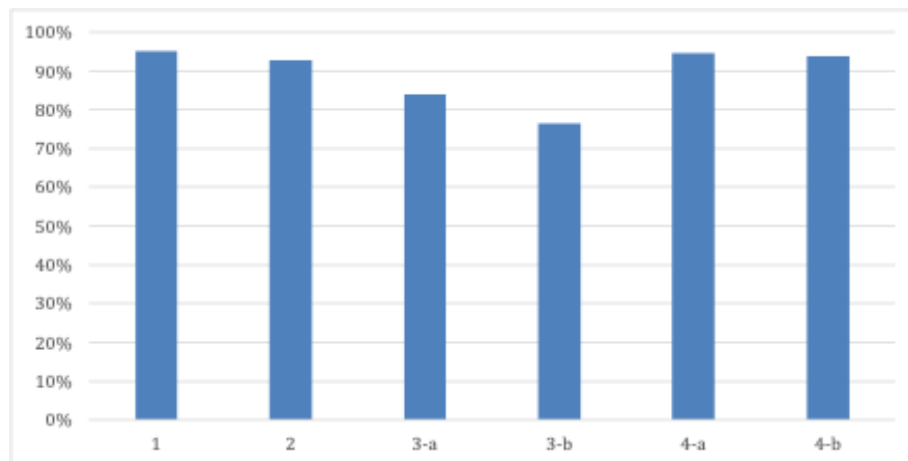


Figure 2a : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 1.1

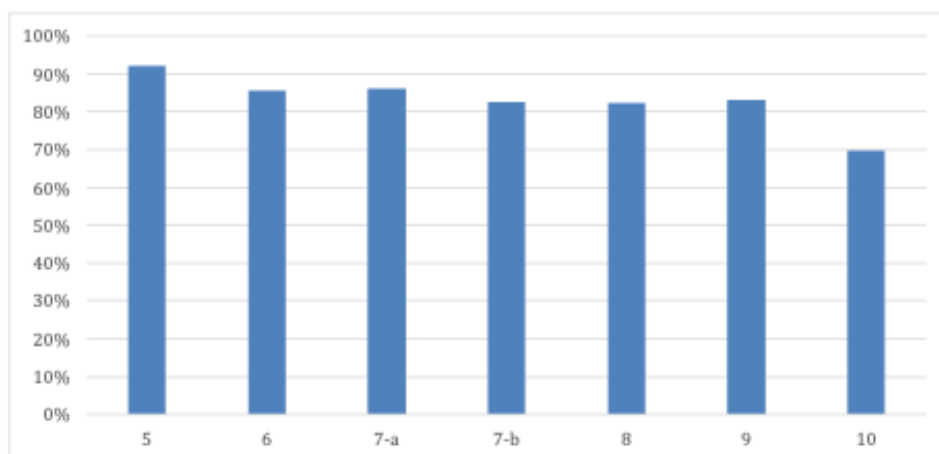


Figure 2b : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 1.2

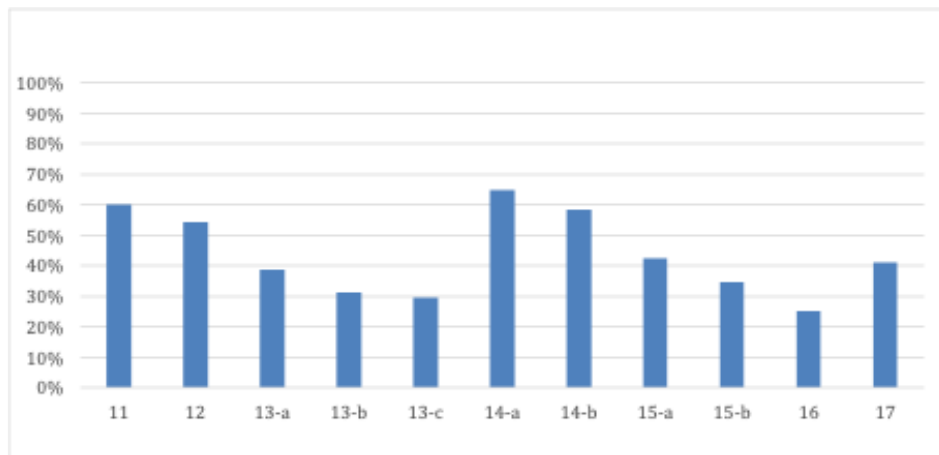


Figure 2c : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 1.3

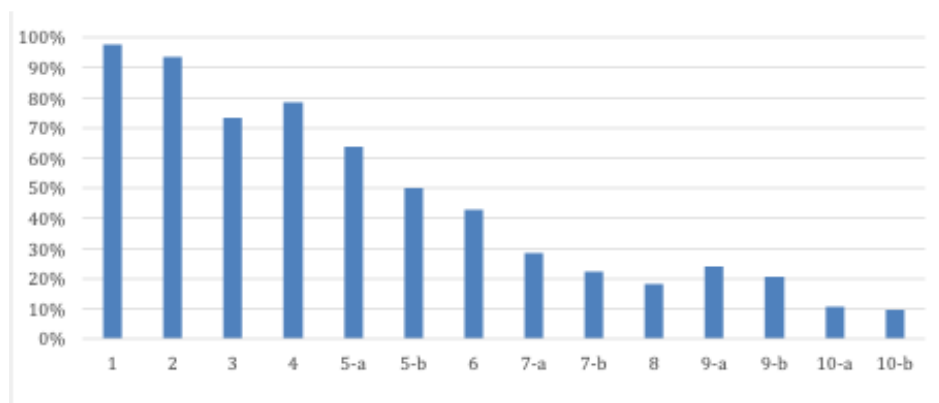


Figure 2d : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 2.1

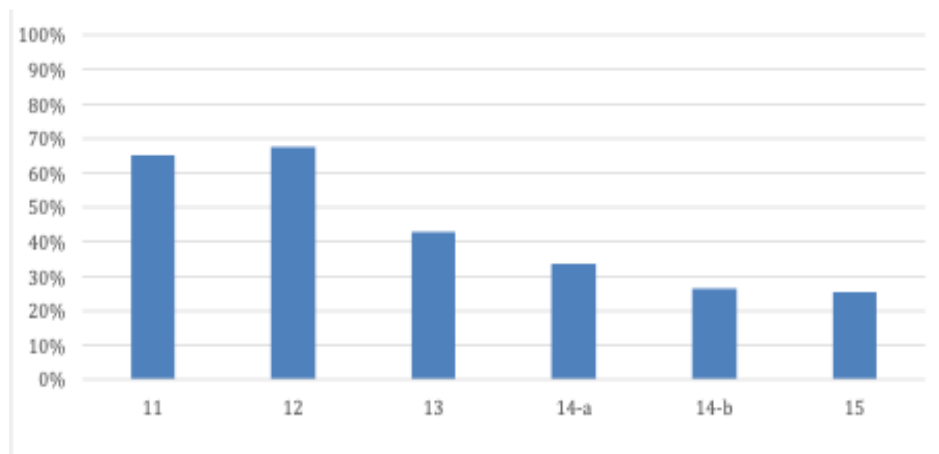


Figure 2e : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 2.2a

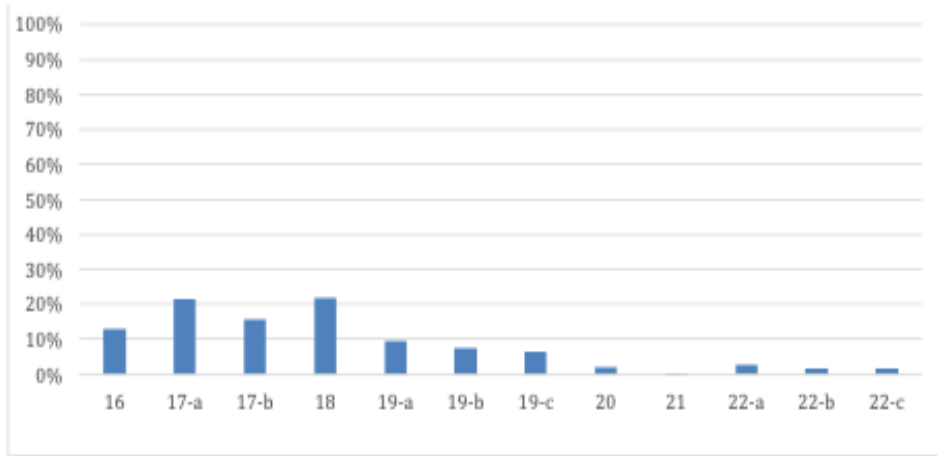


Figure 2f : Fraction des candidats ayant abordé chaque question – Partie 2.2b

Les figure 3a, 3b, et 3c indiquent le taux de réussite des candidats à chaque question pour la partie science de l'ingénieur. Les figure 3d, 3e, et 3f indiquent le taux de réussite des candidats à chaque question pour la partie physique. Une question est considérée comme réussie lorsque qu'il lui a été attribué au moins la moitié des points. Certaines questions ont été réussies par une grande partie des candidats, mais elles n'ont pas véritablement fait la différence sur la notation finale, notamment à propos de la partie 1.

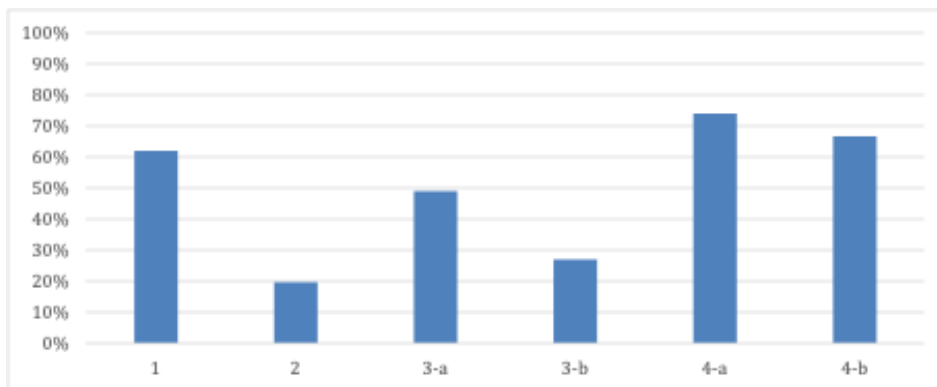


Figure 3a : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 1.1

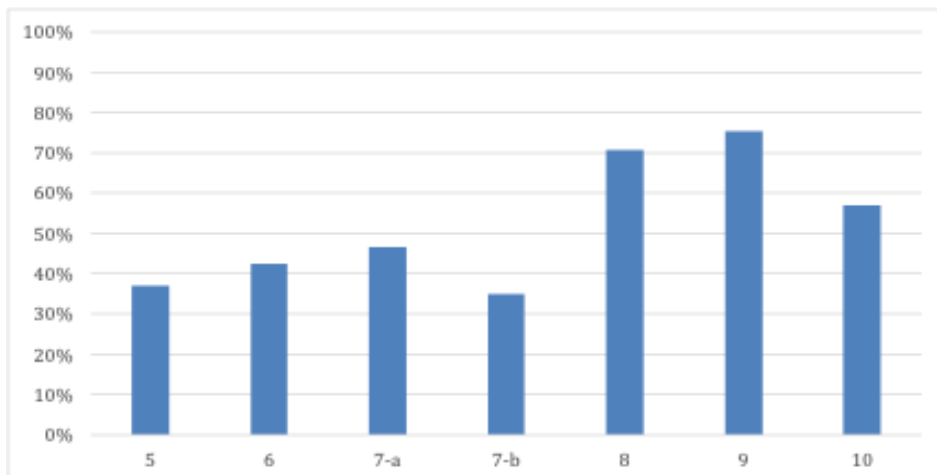


Figure 3b : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 1.2

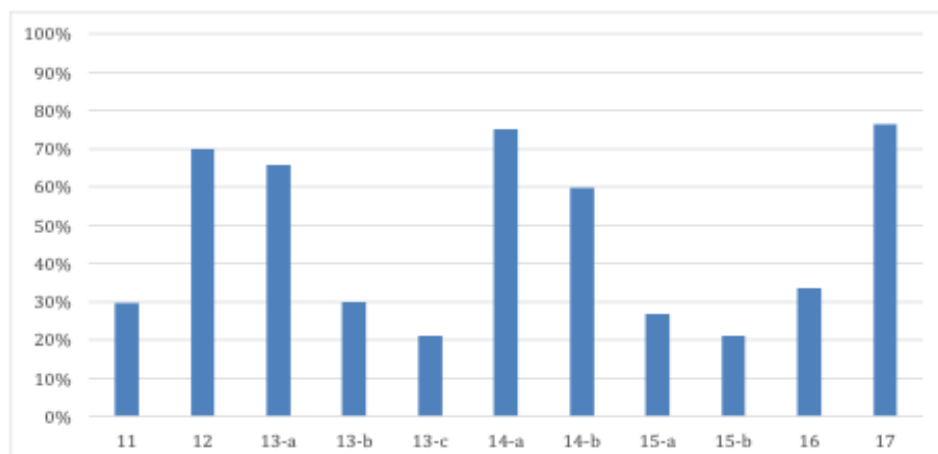


Figure 3c : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 1.3

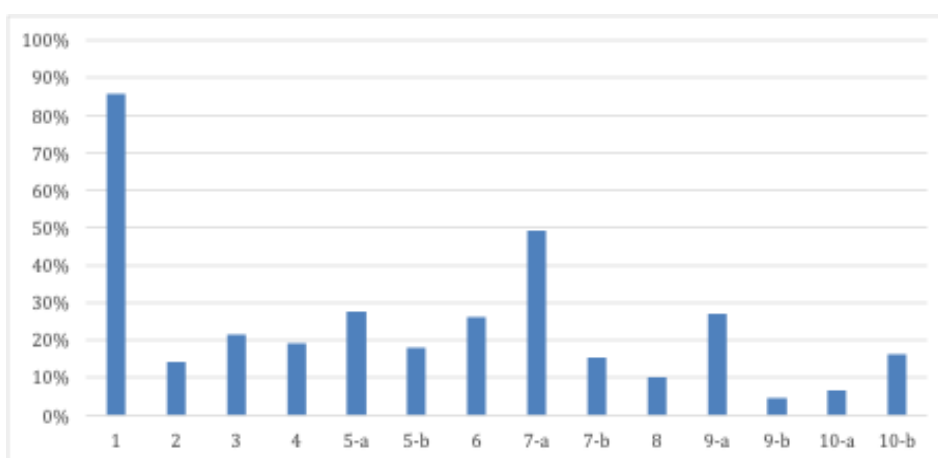


Figure 3d : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 2.1

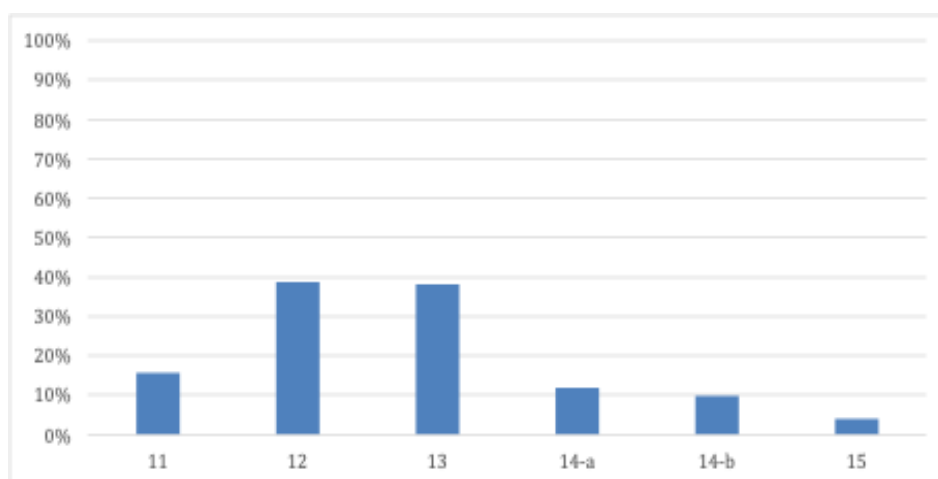


Figure 3e : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 2.2a

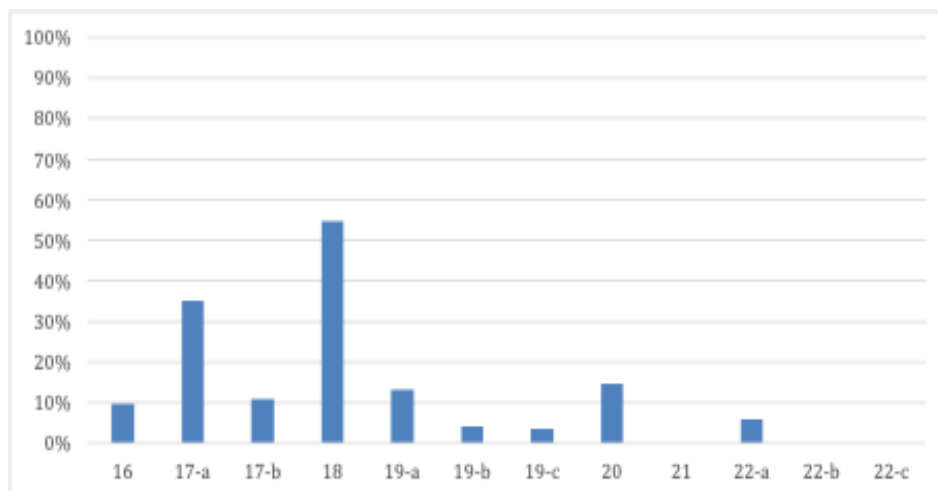


Figure 3f : Fraction des candidats ayant réussi chaque question – Partie 2.2b

Les taux de réussite bas des questions nécessitant une explication physique des phénomènes s'illustrent par la difficulté qu'ont les candidats à clarifier leur réflexion scientifique par écrit. On observe bien souvent des réponses confuses ne répondant que partiellement à l'ensemble des questions posées.

Nous attirons l'attention des futurs candidats sur l'importance des applications numériques. Celles-ci étaient assez simples pour être effectuées sans calculatrice. Elles ont toutefois fait perdre des points à une bonne partie des candidats. Il est rappelé qu'une valeur numérique d'une grandeur physique doit être obligatoirement suivie d'une unité, sans quoi le résultat est considéré comme faux.

Rappelons que chaque sous-question d'une question numérotée est évaluée séparément. Bon nombre de candidats ne répondent pas à l'intégralité des items mentionnés dans une question. Enfin, nous attirons l'attention des futurs candidats sur l'importance d'essayer de traiter les dernières questions de chaque partie qui sont souvent indépendantes des résultats précédents et qui font bien souvent la différence parmi les candidats.

Reprenant les termes des rapports des années précédentes, nous souhaitons insister à nouveau sur l'importance de la qualité de la rédaction (précision, concision et propreté) dans l'appréciation d'une copie. Un raisonnement clair, concis et bien exprimé a bénéficié d'une évaluation plus favorable que la simple écriture du résultat, même juste.

Partie 1 : Exosquelette actif

Partie 1.1 : Modélisation du coude humain

Cette première sous-partie, composée de 4 questions, a été largement abordée par les candidats. Elle introduit les bases de la modélisation biomécanique du coude humain, en considérant l'avant-bras comme un solide en rotation autour d'un axe fixe soumis à un couple de frottement visqueux.

La question 1, qui demandait l'établissement de l'équation différentielle du mouvement de l'avant-bras, n'a pas été bien maîtrisée par les candidats. Seulement 60% d'entre eux ont su appliquer correctement le théorème du moment cinétique et identifier les termes dynamiques. Cette question, bien que classique, reste pourtant un bon indicateur de la maîtrise des fondamentaux.

La question 2, qui introduisait une masse ponctuelle en bout d'avant-bras, a été plus discriminante. Si 90% des candidats l'ont abordée, seuls 20% ont su intégrer correctement les effets de cette masse sur le moment d'inertie. Cette question nécessitait une bonne compréhension des effets dynamiques d'une masse excentrée.

La question 3, plus expérimentale, portait sur la détermination du terme $m_1 l_1$ à partir de mesures de moment et de force sur une plateforme d'effort. Elle a été abordée par environ 75% des candidats, mais moins de 50% ont su correctement exploiter le principe fondamental de la statique pour relier les mesures à la grandeur recherchée (mouvement lent). Cette question a mis en évidence des difficultés dans l'interprétation des dispositifs expérimentaux.

Enfin, la question 4, qui proposait une modélisation du profil de vitesse angulaire à l'aide d'une loi triangulaire, a été bien réussie. Environ 75% des candidats ont su relier l'aire sous la courbe à l'angle parcouru et en déduire la vitesse angulaire maximale. Cette question, plus accessible, a permis à de nombreux candidats de gagner des points.

Partie 1.2 : Modélisation de l'interaction robot-humain

Cette sous-partie, plus technique, comprend 6 questions et introduit la modélisation de l'interaction entre l'exosquelette et le bras humain. Cette question a été abordée par un grand nombre de candidats, et ce malgré la complexité croissante du modèle et l'introduction de nouveaux paramètres liés à la structure mécanique du robot.

Les questions 5 et 6, qui portaient sur la relation géométrique entre les angles du bras humain et du robot, ont été correctement traitées par seulement 40% des candidats. La simplification $\theta_1 \approx \theta_2$, justifiée par un développement limité, n'a pas été bien comprise même si cela permettait de poursuivre l'étude avec un modèle unifié.

Les questions 7 à 9, qui introduisent les notions de puissances des efforts extérieurs / intérieurs, bilan énergétique, ont été bien traitées globalement. La question 9, en particulier, demandait une application rigoureuse du théorème de l'énergie cinétique à un système composé. Elle a été abordée par 80% des candidats, et 70% ont su correctement identifier les termes J , v et la fonction f . Le théorème de l'énergie cinétique appliqué à un système complexe semble être acquis par une majorité.

La question 10, qui portait sur la linéarisation de l'équation autour de la position d'équilibre, a été bien réussie. Les candidats ayant abordé cette question ont su effectuer le développement limité et identifier le couple d'équilibre. Question simple qu'il faut savoir aller chercher pour gagner le maximum de point et faire la différence dans le classement final.

Partie 1.3 : Pilotage en boucle fermée de position

Cette sous-partie, composée de 7 questions, a été abordée par une minorité de candidats. Elle introduit la commande en boucle fermée de l'exosquelette, avec une boucle imbriquée de vitesse et de position.

La question 11, qui demandait la construction du schéma-bloc de la commande, n'a pas été bien traitée, seulement 30% des candidats ont su répondre correctement. Elle permettait pourtant de vérifier la compréhension globale de l'architecture de commande.

La question 12, sur le fonctionnement du codeur incrémental, a également été bien traitée. Près de 70% des candidats ont su expliquer le principe de comptage des « tops » et la méthode d'estimation de la vitesse angulaire.

Les questions 13 et 14, qui portaient sur le réglage du correcteur PI et l'analyse des erreurs en réponse à différentes entrées (échelon, rampe, parabole), ont été un peu plus discriminantes, surtout la question 13 où seuls 30% des candidats ont su déterminer la valeur de K_p . La question 14 a été mieux réussie, 70% ont su correctement appliquer le théorème de la valeur finale pour trouver l'erreur en fonction des différentes entrées.

Les questions 15 et 16, qui demandaient le réglage du gain K pour obtenir une marge de phase supérieure à 45° ou une réponse rapide, ont été abordées par 40% des candidats, avec un taux de réussite de moins de 30%. Elles nécessitaient une bonne maîtrise / compréhension des diagrammes de Bode et des fonctions de transfert.

Enfin, la question 17, qui demandait une analyse de la qualité de l'asservissement, a été abordée par une minorité de candidats (environ 40%), mais ceux qui l'ont traitée ont souvent bien répondu (près de 80%), en identifiant correctement les effets de l'inertie sur la qualité de l'asservissement. Cette question, bien que située en fin de partie, pouvait rapporter des points précieux à ceux qui ont su l'aborder.

Partie 2 : Instabilité d'ondulation d'une couche de cristal liquide

Partie 1 : Étude du comportement mécanique d'une structure élancée soumise à une compression

Cette première sous-partie comprend 10 questions. Elle s'appuie sur un modèle mécanique simple constitué de ressorts soumis à une compression axiale, avec une transition possible vers un état de flexion. Les quatre premières questions ont été abordées par une large majorité de candidats (plus de 70%). Ces questions portaient principalement sur des expressions analytiques : calcul d'énergie potentielle en compression, géométrie de la flexion, conditions de validité du modèle, et énergie en flexion.

La question 1 a été bien réussie, avec environ 70% de bonnes réponses. Elle demandait une expression directe de l'énergie élastique en compression, ce qui reste accessible pour la majorité des candidats. En revanche, les questions 2 à 4, bien qu'abordées par beaucoup, ont été mal traitées : moins de 30% de réussite pour chacune. Cela montre une difficulté à manipuler les hypothèses géométriques et à interpréter les résultats obtenus, notamment dans le cadre de la flexion.

Les questions 5 et 6, qui introduisent la comparaison énergétique entre les deux états et la notion de seuil de transition, ont été abordées par environ 40% des candidats. Là encore, les taux de réussite sont faibles (moins de 30%), ce qui suggère que la compréhension du mécanisme de transition reste délicate pour une majorité.

Enfin, les questions 7 à 10, ont été très peu abordées (moins de 30% des candidats). La question 7, qui demandait une réalisation et interprétation graphique de la force en fonction du déplacement, a été mieux réussie (environ 50%), ce qui montre que les candidats ayant poursuivi leur raisonnement ont pu en tirer un avantage. En revanche, les questions 8 à 10 ont été mal traitées, avec moins de 20% de réussite chacune.

Ces dernières questions pouvaient rapporter des points précieux à ceux qui les ont abordées. Elles demandent une bonne maîtrise du modèle et une capacité à en tirer des conséquences physiques ou géométriques. Comme souvent, elles sont délaissées en fin d'épreuve, alors qu'elles peuvent faire la différence dans le classement final.

Partie 2 : Étude du comportement mécanique d'un cristal liquide en phase smectique A.

Cette sous-partie comporte 12 questions et s'intéresse à la modélisation d'un cristal liquide organisé en couches, en réponse à une extension verticale. Elle mobilise des notions de champ de déplacement, d'énergie volumique, et d'instabilité ondulatoire.

Les questions 11 et 12 ont été bien abordées par les candidats (environ 60%). La question 11, qui portait sur les conditions de validité de l'hypothèse de milieu continu, a été très mal réussie, moins de 10% de bonnes réponses. Cela montre une difficulté à interpréter physiquement les équations. En revanche, la question 12, qui demandait une expression analytique de l'énergie volumique en extension, a été mieux réussie (environ 40%), ce qui confirme que les candidats sont plus à l'aise avec les calculs directs que les interprétations.

La question 13, abordée par 40% des candidats, portait sur l'indépendance de la constante d'élasticité vis-à-vis de la taille du domaine élémentaire. Elle a été correctement traitée par environ 40% des candidats, ce qui en fait une question discriminante. Elle demandait une compréhension fine des invariances du modèle.

À partir de la question 14, les questions sont de moins en moins abordées. Pour la question 14, seulement 30% des candidats l'ont abordée, et moins de 10% ont bien répondu. Les questions suivantes, de 15 à 22, ont été traitées par moins de 20% des candidats. Surement parce qu'elles introduisent des notions plus complexes comme la flexion des couches, les corrections liées à l'inclinaison, et l'apparition d'une instabilité ondulatoire.

Parmi ces dernières, seule la question 18 se distingue avec un taux de réussite de 60%, malgré un faible taux de traitement. Elle portait sur la représentation et l'interprétation graphique de l'énergie moyenne en fonction de l'amplitude de l'ondulation. Ce type de question, non calculatoire, semble avoir été bien compris par les candidats qui l'ont abordée, et peut clairement faire la différence dans le classement final. C'est pourquoi, le jury conseille fortement aux candidats de lire tout le sujet pour aller chercher des questions de ce genre-là qui peuvent faire vraiment la différence.