



**MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE,
DE LA JEUNESSE
ET DES SPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Rapport du jury

Concours : AGREGATION EXTERNE

Section : sciences industrielles de l'ingénieur

Option : ingénierie mécanique

Session 2021

Rapport de jury présenté par : Hélène PILLET, présidente du jury
Professeure des universités

Sommaire

Remerciements	3
Résultats statistiques de la session 2021	4
Avant-propos	5
Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur	7
Rapport du jury de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur	19
Éléments de correction de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	24
Rapport du jury de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	32
Éléments de correction de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	37
Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	48
Exemple de sujet pour l'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnologique	52
Rapport du jury de l'épreuve d'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnologique	58
Exemple de sujet pour l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnologique	67
Rapport du jury de l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnologique	77
Rapport du jury de l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel	84
Rapport sur la transmission des valeurs et principes de la République	88

Remerciements

Le lycée La Martinière Monplaisir à Lyon a accueilli les épreuves d'admission de cette session 2021 de l'agrégation externe section sciences industrielles de l'ingénieur, option sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique qui se sont déroulées dans de très bonnes conditions du 14 juin au 22 juin 2021 inclus. Les membres du jury adressent de vifs remerciements à monsieur le Proviseur de cet établissement ainsi qu'à l'ensemble de ses collaborateurs pour l'accueil chaleureux qui leur a été réservé.

Ces remerciements s'adressent aussi à monsieur le Proviseur du Lycée Guillaume Tirel à Paris qui a accueilli les membres du jury pour la réunion préparatoire du 12 octobre 2020.

Résultats statistiques de la session 2021

Inscrits	Nombre de postes	Présents aux trois épreuves d'admissibilité	Admissibles	Admis
529*	35	264**	90***	35

*dont 113 candidats à l'agrégation marocaine

** dont 55 candidats à l'agrégation marocaine

*** dont 17 candidats à l'agrégation marocaine

Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le premier candidat admissible	19,74
Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le dernier candidat admissible	8,97
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le premier candidat admis	18,4
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le dernier candidat admis	11,1

Avant-propos

La session 2021 de l'agrégation de Sciences Industrielles de l'Ingénieur s'est déroulée en période de crise sanitaire consécutive à l'épidémie de Covid-19. En accord avec le décret n° 2020-1310 du 29 octobre 2020 prescrivant les mesures générales nécessaires pour faire face à l'épidémie, l'ensemble des épreuves du concours a pu être maintenu cette année. En particulier, les mesures gouvernementales visant à un strict respect des recommandations sanitaires ont été déclinées pour réaliser des aménagements adaptés intégrant notamment le nettoyage des supports de travaux pratiques. Les candidats ont ainsi pu être évalués pleinement sur leurs compétences expérimentales et sur leur transversalité dans le domaine des Sciences Industrielles de l'Ingénieur.

Dans cet avant-propos, je souhaite insister une fois encore sur les éléments d'ordre pédagogique. La direction générale des ressources humaines adresse le rappel suivant aux présidents de concours de recrutement de professeurs : *« Comme vous le savez, les épreuves des concours ont été conçues afin de prendre en compte une évaluation des compétences disciplinaires tout en établissant une professionnalisation progressive de leur contenu. Ainsi, les épreuves d'admissibilité évaluent la capacité du candidat à mobiliser des savoirs et des techniques dans une perspective professionnelle, tandis que les épreuves d'admission évaluent la capacité à élaborer une activité pédagogique à destination des élèves, à investir une situation d'enseignement en tant que futur professeur et à maîtriser des gestes techniques et professionnels »*. Ainsi, les épreuves d'admissibilité ont vocation à tester les compétences scientifiques des candidats et les trois épreuves orales d'admission évaluent les compétences pédagogiques s'appuyant sur la didactique des Sciences Industrielles de l'Ingénieur. Les candidats sont donc invités à se préparer spécifiquement à l'élaboration de séquences pédagogiques en accord avec les programmes d'enseignement. Les candidats doivent veiller à présenter les notions abordées avec exactitude et à mettre en évidence les compétences et connaissances qui seront mobilisées par les élèves en phase d'apprentissage.

Le jury rappelle que les coefficients des épreuves d'admission sont le double de ceux des épreuves d'admissibilité ce qui confirme l'importance de la préparation de ces épreuves. Ces dernières comportent également une dimension professionnelle et il est prévu qu' *« au cours de l'entretien qui suit l'exposé du candidat, la perspective d'analyse de situation professionnelle définie par l'épreuve est élargie à la capacité du candidat à prendre en compte les acquis et les besoins des élèves, à se représenter la diversité des conditions d'exercice de son métier futur, à en connaître de façon réfléchie le contexte dans ses différentes dimensions (classe, équipe éducative, établissement, institution scolaire, société) et les valeurs qui le portent, dont celles de la République »*. Si la majorité des candidats réagit correctement aux questions posées à l'oral, il est parfois étonnant de constater que certains d'entre eux ne connaissent pas la structure du système éducatif ou encore les particularités des programmes d'enseignement pourtant largement abordés dans les communications institutionnelles. Ceci ne leur permet pas de se projeter de façon réaliste dans l'exercice de leur futur métier.

Les exigences associées aux épreuves d'exploitation pédagogique d'une activité pratique ainsi qu'à la soutenance d'un dossier industriel doivent être prises en compte par les futurs candidats et leurs formateurs en s'appuyant sur les éléments du présent rapport de jury ainsi que sur les arrêtés qui décrivent les épreuves et le programme du concours disponible sur le site devenir enseignant : https://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/agregation_externes_21/46/4/p2021_agreg_ext_sii_1328464.pdf.

Les enseignants en poste en collège ou en lycée ne doivent pas se limiter aux acquis de leur expérience professionnelle. L'épreuve de soutenance d'un dossier industriel doit faire l'objet d'une attention particulière par les candidats ; le choix du support doit se faire en cohérence avec la dimension pédagogique qui constitue un réel transfert et qui doit être présenté. Il est indispensable de débiter l'élaboration du dossier dès l'inscription au concours pour mûrir le choix d'un support issu du milieu de l'entreprise et pour imaginer sa mise en œuvre dans le contexte d'une application pédagogique, en démontrant l'enrichissement de l'enseignement qui en découle.

Comme rappelé aux candidats lorsqu'ils sont accueillis par le directoire du jury avant le début des épreuves d'admission, il est impératif de respecter les modalités de chacune de ces épreuves. Les objectifs sont également rappelés et il est regrettable que certains candidats n'intègrent pas suffisamment ces recommandations ainsi que celles présentées dans ce rapport pour éviter une mauvaise interprétation des attendus du jury. De nombreuses questions ont été posées par les candidats lors de l'accueil concernant la mise à disposition des ordinateurs reliés à Internet. Il est rappelé que **seuls les sites ne nécessitant pas d'identification, indexés et accessibles par tous, sont autorisés**. Par ailleurs, il est important que le candidat intègre qu'Internet doit être utilisé comme une base documentaire pour l'élaboration d'une séquence pédagogique. Le téléchargement de documents prêts à l'emploi ne saurait se substituer à une réflexion personnelle à partir du support de travaux pratiques proposés et, en ce sens, ne permet pas de répondre aux attendus de l'épreuve. Enfin, le jury insiste une nouvelle fois sur le caractère prestigieux du concours qui impose un comportement et une présentation irréprochables, compatibles avec les circonstances particulières d'un concours de recrutement de cadres de catégorie A de la fonction publique d'État. Si la plupart des candidats se montrent respectueux des valeurs de la République et capables de représenter leur discipline et l'institution, le jury relève certains comportements allant du manque d'humilité à une certaine agressivité face aux questions qui doit être totalement proscrite.

Cette session 2021 est dans la continuité des précédentes puisque 35 candidats ont été déclarés admis alors que 264 ont participé aux trois épreuves d'admissibilité. Cette année, quatre candidates femmes ont été admissibles et une seule a été admise.

Les candidats admis ont tous plus de 11/20 et 48 candidats ont obtenu une moyenne supérieure à 09/20. Le jury félicite les candidats et leurs formateurs.

Les épreuves d'admission ont démontré leur complémentarité aux épreuves d'admissibilité dans l'évaluation des compétences des candidats. Parmi les candidats admis, quatre candidats ont progressé de plus de vingt places à l'issue des épreuves orales. Le jury a pu également observer de bonnes progressions de certains candidats qui avaient été admissibles les années précédentes, ce qui doit les inciter à se présenter à nouveau en tenant compte de leur expérience et des remarques du rapport de jury.

Pour conclure cet avant-propos, je souhaite que les informations contenues dans ce rapport aident les candidats à se préparer sereinement et efficacement au concours de l'agrégation de Sciences Industrielles de l'Ingénieur. Pour cela, je les invite, ainsi que leurs formateurs, à lire de façon approfondie les recommandations du jury afférentes aux différentes épreuves.

Helene PILLET, Présidente du jury

Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Contexte et étude préliminaire

Question 1

Les trois piliers du développement durable sont les enjeux sociaux, économiques, et environnementaux. L'analyse s'effectue du point de vue de chacun de ces enjeux :

- enjeu social, favoriser la mobilité des franciliens dans une région où les bassins d'emploi sont parfois très éloignés des zones d'habitation ;
- enjeu économique, faciliter les liaisons entre les centres d'affaires et les aéroports ;
- enjeu environnemental, augmenter la part des transports en commun avec un mode de transport utilisant l'énergie électrique, quasiment décarbonée en France.

Choix de la technologie du tunnelier

Question 2

Tunnelier vs tunnel à tranchée couverte :

- pour une tranchée couverte, le tracé doit approximativement suivre le tracé d'axes de communication existants. En passant sous des habitations, cela nécessite de nombreuses expropriations et destructions de bâtiments.
- le relief doit être régulier pour avoir une ligne de métro sans variation brutale d'altitude.
- les nuisances de chantier sont beaucoup plus importantes.

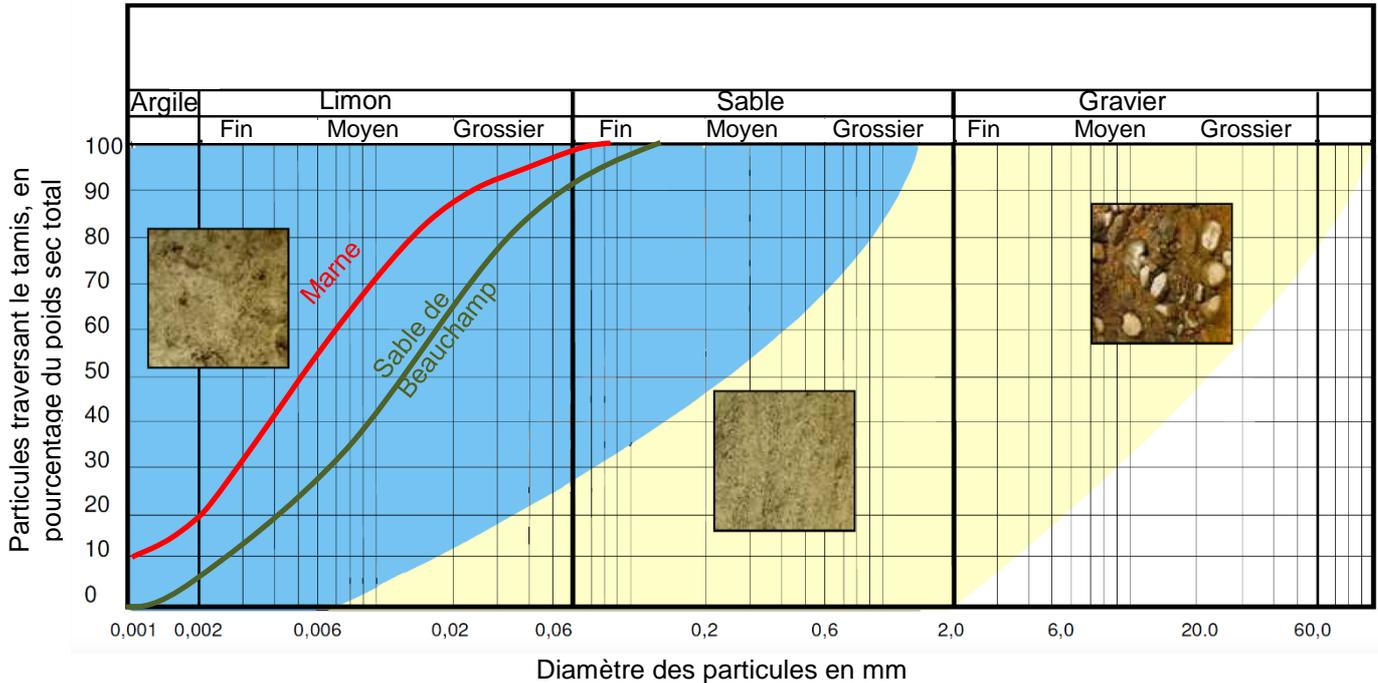
Tunnelier vs explosifs :

- réduit des nuisances sonores pour l'environnement ;
- limite la fragilisation de la roche ;
- pas de fumées toxiques difficiles à évacuer pour de longs tunnels ;
- sûreté pour le personnel.

Question 3

On relève sur le document technique DT4 un passage à travers de la marne, des sables de Beauchamp et du calcaire de Saint-Ouen.

Question 4



On constate bien que les deux courbes d'analyse granulométrique de la marne et des sables de Beauchamp se situent dans la zone de travail adaptée pour un tunnelier à pression de terre.

Question 5

La lecture du planning journalier permet d'identifier un fonctionnement en 3x8, avec une durée consacrée à l'excavation de 13h. Avec un fonctionnement 5 jours sur 7, le temps d'excavation hebdomadaire est donc de 65h.

Question 6

Le volume entre deux filets consécutifs est donné par : $V = \frac{\pi \cdot (D_e^2 - D_i^2)}{4} \cdot (p - e)$

Donc le débit volumique maximal vaut : $Q_m = \eta \cdot V \cdot N_v$

Question 7

La tête de coupe peut donc extraire : $Q_r = \frac{Q_m}{1+F} = 1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Or $Q_r = V_m \cdot S$ avec $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ et $D = 9,83 \text{ m}$, diamètre du tunnel.

Donc $V_m = \frac{Q_m}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (1+F)} = \frac{\eta \cdot \frac{\pi \cdot (D_e^2 - D_i^2)}{4} \cdot (p - e) \cdot N_v}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (1+F)} = \frac{\eta \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot (p - e) \cdot N_v}{D^2 \cdot (1+F)} = 0,0178 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = 1,07 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$

Question 8

Dans le document technique DT3, on relève la longueur de galerie à creuser de 3 274 m.

$\frac{3\,274}{1,07} = 3\,059 \text{ h}$ de creusement.

$\frac{3\,059}{65} = 47,1 \text{ semaines}$ soit environ une 1 année et 1 semaine de creusement.

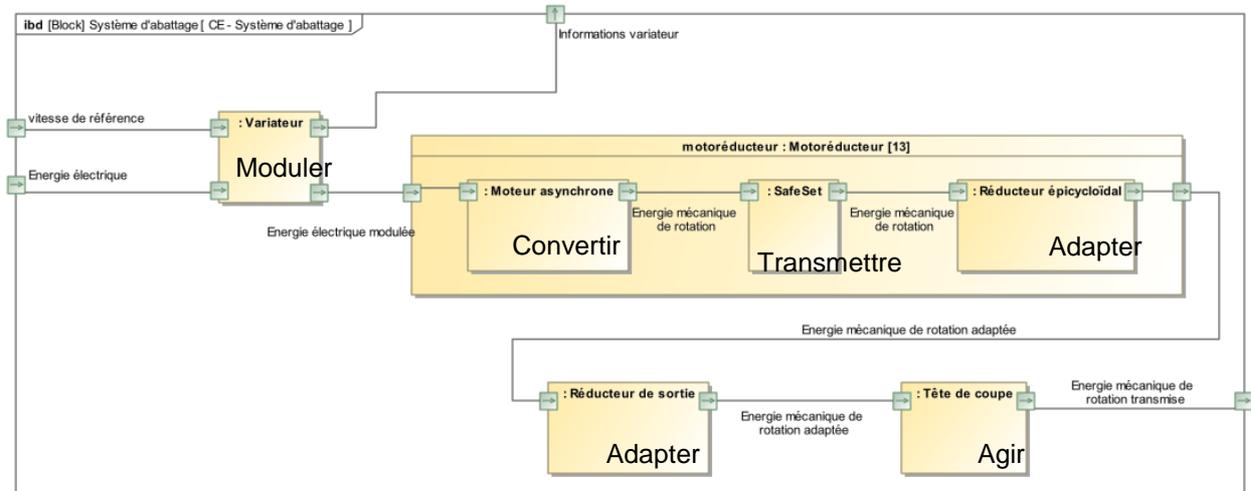
L'exigence 1.1.2 indique une durée maximale de 15 mois, donc celle-ci est respectée.

Tous les calculs ont été faits uniquement autour de la vis d'Archimède, sans problème. De plus, la vis est l'élément limitant dans le cas de terrains meubles mais la tête de coupe risque d'être limitante dans le cas de terrains durs. C'est d'ailleurs pour cela que l'on utilise un tunnelier à pression de terre.

La marge utilisée est liée aux variations de type de terrain, aux pannes et/ou casses potentielles, etc.

Analyse de la chaîne de puissance du système d'abattage

Question 9



Question 10

Par lecture graphique :

- en fonctionnement normal, la vitesse maximale est de $2\,522,7 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, le couple maximal est de $2\,259 \text{ N} \cdot \text{m}$ et enfin la puissance maximale vaut $\frac{2522,7 \times 2\pi}{60} \times 1329 = 351 \text{ kW}$.
- en fonctionnement exceptionnel, la vitesse maximale est de $2\,522,7 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, le couple maximal est de $2\,801 \text{ N} \cdot \text{m}$ et enfin la puissance maximale vaut $\frac{2522,7 \times 2\pi}{60} \times 1647 = 435 \text{ kW}$.

Question 11

La situation est celle d'un train à axes parallèles et fixes, pour un engrenage intérieur, donc on a :

$$r_c = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{3c/0}} = + \frac{Z_{3c}}{Z_4}$$

Question 12

En traduisant le roulement sans glissement aux deux points de contact, et en se plaçant dans le repère du porte-satellites, on peut écrire directement $\frac{\omega_{2a/3a}}{\omega_{0/3a}} = + \frac{Z_{0a}}{Z_{2a}}$ et $\frac{\omega_{1/3a}}{\omega_{2a/3a}} = - \frac{Z_{2a}}{Z_1}$. En multipliant ces deux expressions, puis en écrivant la composition des vitesses en passant par le repère du bâti, on obtient :

$$\frac{\omega_{2a/3a}}{\omega_{0/3a}} \times \frac{\omega_{1/3a}}{\omega_{2a/3a}} = \frac{\omega_{1/3a}}{\omega_{0/3a}} = \frac{\omega_{1/0} + \omega_{0/3a}}{\omega_{0/3a}} = - \frac{Z_{0a}}{Z_1}$$

Enfin, on exprime le rapport souhaité :

$$\frac{\omega_{1/0} - \omega_{3a/0}}{\omega_{3a/0}} = \frac{Z_{0a}}{Z_1}$$

$$r_1 = \frac{\omega_{3a/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_{0a}}$$

Question 13

De manière analogue, on obtient r_2 et r_3 . D'où : $r_2 = \frac{\omega_{3b/0}}{\omega_{3a/0}} = \frac{Z_{3a}}{Z_{3a} + Z_{0b}}$ et $r_3 = \frac{\omega_{3c/0}}{\omega_{3b/0}} = \frac{Z_{3b}}{Z_{3b} + Z_{0c}}$.

Alors :

$$r = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{3c/0}} \times \frac{\omega_{3c/0}}{\omega_{3b/0}} \times \frac{\omega_{3b/0}}{\omega_{3a/0}} \times \frac{\omega_{3a/0}}{\omega_{1/0}} = r_c \cdot r_3 \cdot r_2 \cdot r_1$$

$$r = \frac{Z_{3c}}{Z_4} \times \frac{Z_{3b}}{Z_{3b} + Z_{0c}} \times \frac{Z_{3a}}{Z_{3a} + Z_{0b}} \times \frac{Z_1}{Z_1 + Z_{0a}}$$

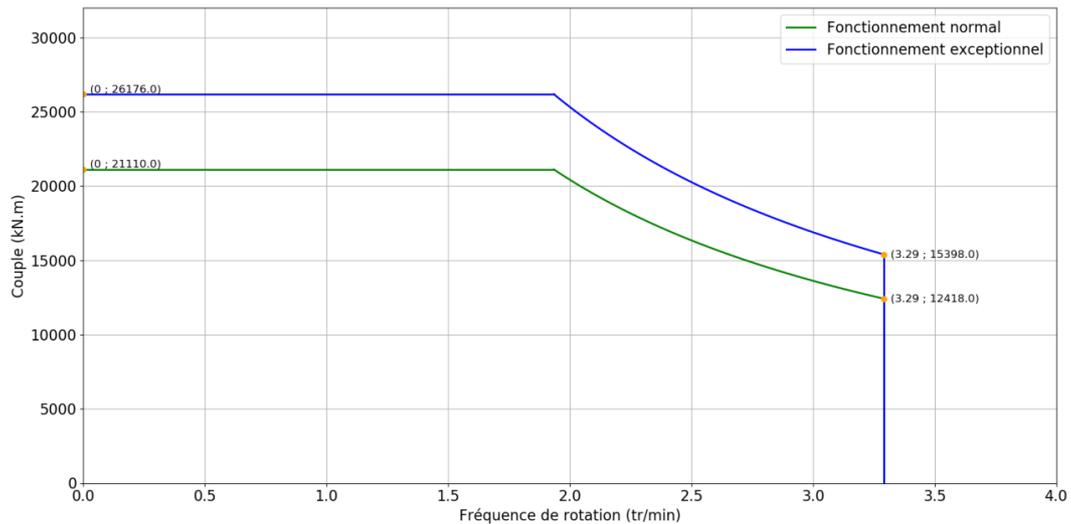
L'application numérique donne : $r \approx 0,0013 \approx \frac{1}{767}$.

Question 14

En régime stationnaire : $P_{tête} = N_{mot} \cdot \rho_{epi}^3 \cdot \rho_{red} \cdot P_u$

$$\text{Donc } C_{tête} = \frac{N_{mot} \cdot \rho_{epi}^3 \cdot \rho_{red} \cdot C_u}{r}$$

Question 15



Question 16

Pour ce diamètre de tunnelier ($D = 9,83\text{m}$), le couple maximum installé est usuellement de l'ordre de 20 000 kN.m. Ici, on est plutôt de l'ordre de 26 000 kN.m en fonctionnement exceptionnel, donc la puissance installée est largement surdimensionnée.

Commande des moteurs

Protocole de communication

Question 17

Avantages du réseau Profibus : moins de câble, plus de flexibilité,...

Inconvénients du réseau Profibus : lenteur, si une connexion est défectueuse toute la branche tombe,...

Le réseau Profibus peut accueillir 126 éléments, alors que 63 éléments sont à piloter. Donc Profibus est adapté.

31 éléments peuvent être pilotés par segment donc 1 segment sera dédié à la tête de coupe (13 esclaves) et 2 segments pour les autres éléments (2×25 esclaves).

Question 18

Télégramme envoyé :

	MSB										LSB						
PKE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
IND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
PWE-H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PWE-L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Valeur hexadécimale
0065
0052
0000
0000

Télégramme reçu :

	MSB										LSB						
PKE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
IND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
PWE-H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PWE-L	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1

Valeur hexadécimale
0065
0052
0000
05CD

Bien que codé sur 16 bits, il n'y a pas de mise à l'échelle (facteur 1) ; la valeur se lit donc directement. La précision est donc bien de 1 tr.min⁻¹.

Question 19

Les deux critères prépondérants à retenir sont :

- aucun risque en cas de blocage du rotor. Si la roue de coupe est bloquée, il n'y a pas de risque de démagnétisation des moteurs.
- la mise en parallèle des moteurs peut se faire sans asservissement, ce qui est très intéressant avec les 13 moteurs à piloter.

Ensuite, d'autres critères confirment le choix de moteurs asynchrones : le besoin de couple au démarrage est faible car il se fait sans que la roue de coupe soit en prise dans le terrain, il y a peu de limites sur la masse embarquée, leur entretien est facile, leur prix est compétitif, etc.

Question 20

$$I' = \frac{V}{\sqrt{X^2 + \left(\frac{r}{g}\right)^2}}$$

$$P_{tr} = 3 \cdot \frac{r}{g} \cdot I'^2 = 3 \cdot \frac{r}{g} \cdot \frac{V^2}{X^2 + \left(\frac{r}{g}\right)^2}$$

Question 21

En supposant le glissement faible : $\left(\frac{r}{g}\right)^2 \gg X^2$

L'expression précédente devient : $P_{tr} = 3 \cdot \frac{r}{g} \cdot I'^2 = 3 \cdot \frac{g}{r} \cdot V^2$

or $P_{tr} = C_{em} \cdot \Omega_s = C_u \cdot \Omega_s$ car il n'y a pas de pertes mécaniques.

avec $\Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$ la vitesse de synchronisme en rad.s⁻¹.

donc : $C_u = 3 \cdot \frac{g}{r \cdot \Omega_s} \cdot V^2$

Question 22

En remplaçant dans l'expression précédente le glissement : $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$

Il vient $C_u = 3 \cdot \frac{V^2}{r \cdot \Omega_s^2} \cdot (\Omega_s - \Omega)$

Donc :

$$a = -\frac{3.V^2}{r.\Omega_s^2} \text{ et } b = \frac{3.V^2}{r.\Omega_s}$$

$$\text{Applications numériques : } \Omega_s = \frac{2\pi f}{p} = 157 \text{ rad.s}^{-1} \quad a = -486 \text{ N.m.s.rad}^{-1} \quad b = 76\,400 \text{ N.m}$$

Question 23

$$\Delta N = 1 \text{ tr.min}^{-1} \text{ soit } \Delta\Omega = 0,1047 \text{ rad.s}^{-1} \text{ donc } \Delta Cu = a. \Delta\Omega \approx 51 \text{ Nm}$$

Vérification de la résistance de la chaîne de puissance

Question 24

$$\text{On a } \tau_{max} = \frac{C_u}{I_O} \cdot \frac{d_1}{2}$$

$$\text{A.N. : } \tau_{max} = 15 \text{ MPa}$$

Question 25

Cette valeur doit être comparée à la résistance pratique au glissement : R_{pg} .

$$\text{On en déduit un coefficient de sécurité : } s = \frac{R_{pg}}{\tau_{max}} = 7,8.$$

Ce coefficient de sécurité plutôt élevé s'explique par le contexte d'utilisation. Ici, la masse n'est pas un critère, donc le système peut être largement surdimensionné, d'autant plus que des ruptures de pièces dans un environnement aussi difficile d'accès, et avec des coûts d'exploitation particulièrement élevés, sont à proscrire.

Question 26

$$C_{sup} = G \cdot I_O \cdot \frac{\Delta\alpha}{L} = 9 \text{ N.m}$$

La valeur est extrêmement faible en comparaison avec C_u . Le surcouple introduit par le retard angulaire est donc tout à fait négligeable.

Question 27

Dans la documentation, on relève qu'avec un diamètre d'arbre $d_1 = 100 \text{ mm}$, le couple transmissible maximale est de 15 kN.m .

Pour cette valeur de couple, la contrainte maximale dans l'arbre de transmission vaut environ 75 MPa .

La contrainte vaut alors 1,5 fois moins que la résistance pratique au glissement. Il n'y a donc pas encore de déformation plastique de l'arbre de transmission au déclenchement du SafeSet.

Synthèse

Question 28

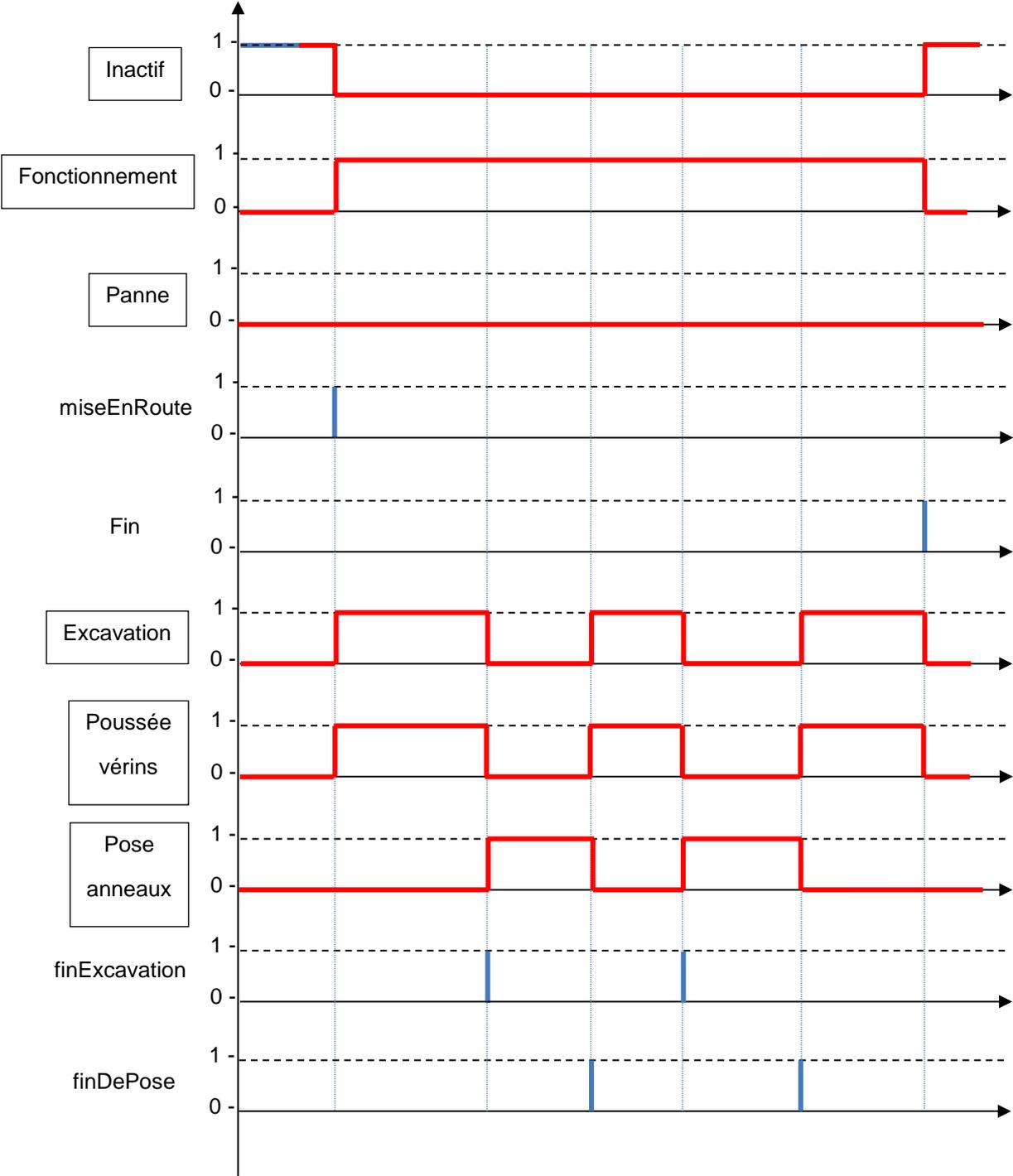
Le couple maximum transmissible par le SafeSet est de 15 kN.m , très au-dessus des variations de 9 N.m dues au décalage angulaire ou de 51 N.m dues au différentiel de vitesse. Ces variations sont donc négligeables et ne provoquent donc pas le déclenchement du SafeSet.

Le déclenchement se produit si un moteur se bloque. La tête de coupe est alors entraînée par 12 moteurs au lieu de 13, ce qui n'empêchera pas le fonctionnement du tunnelier compte tenu du sur-dimensionnement global de l'ensemble des composants.

La tête de coupe peut également être bloquée dans le sol ; les moteurs sont alors « calés » à leur couple maximum de $2\,800 \text{ N.m}$, ce qui n'a pas pour effet de déclencher les 13 SafeSet.

Étude du système d'avance

Question 29



Étude de la gestion de la position et orientation de la tête de coupe

Question 30

On se retrouve en coordonnées sphériques. Dans ce cas :

$$\overrightarrow{A_n A_{n+1}} = d \cdot \overrightarrow{e_{AB}} = d \cdot \cos \gamma \vec{z} + d \cdot \sin \gamma \overrightarrow{e'_{Ab}}$$

La projection du vecteur directeur $\overrightarrow{e'_{Ab}}$ donne :

$$\overrightarrow{e'_{Ab}} = \cos \beta \vec{x} + \sin \beta \vec{y}$$

Enfin :

$$\overrightarrow{A_n A_{n+1}} = \begin{matrix} d \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta \\ d \cdot \sin \gamma \cdot \sin \beta \\ d \cdot \cos \gamma \end{matrix} \begin{matrix} \vec{x} \\ \vec{y} \\ \vec{z} \end{matrix}$$

Par conséquent dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, les coordonnées du point A_{n+1} sont $(X_n + d \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta, Y_n + d \cdot \sin \gamma \cdot \sin \beta, Z_n + d \cdot \cos \gamma)$.

Question 31

En python :	En pseudo-code
<pre>def determinationZone(xv:float, yv:float, xr:float, yr:float) : dx = xr-xv dy = yr-yv d = ((xr-xv)**2+(yr-yv)**2)**(1/2) a = numpy.arctan2(dy,dx)/(2*numpy.pi)*360 # entre - pi / pi -> -180 / 180 if d*1e2 <= 5 : zone = 1 elif 5 < d*1e2 <= 10 : if -45 <= a < 45 : zone = 3 elif 45 <= a < 135 : zone = 2 elif -135 <= a < -45 : zone = 4 else : zone = 5 else : if -45 <= a < 45 : zone = 7 elif 45 <= a < 135 : zone = 6 elif -135 <= a < -45 : zone = 8 else : zone = 9 return(zone)</pre>	<pre>Fonction determinationZone(xv,yv,xr,yr) dx <- xr-xv dy <- yr-yv d <- ((xr-xv)**2+(yr-yv)**2)**(1/2) a <- tangente de l'angle mais prenant en compte les signes de cos et sin pour avoir un angle sur - pi,pi, puis le ramener en degré Si d en cm < 5 alors zone = 1 Si d entre 5 et 10 Si l'angle entre -45 et 45 alors zone = 3 Si l'angle entre 45 et 135 alors zone = 2 Si l'angle entre -135 et -45 alors zone = 4 Sinon zone = 5 Sinon Si l'angle entre -45 et 45 alors zone = 7 Si l'angle entre 45 et 135 alors zone = 6 Si l'angle entre -135 et -45 alors zone = 8 Sinon zone = 9 Retourner (zone)</pre>

Question 32

Torseur de la liaison glissière : $\{V_{T_i/C_i}\} = \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ \lambda_i \vec{x}_{ci} \end{Bmatrix}_{VP}$

Torseur de la liaison pivot : $\{V_{C_i/O}\} = \begin{Bmatrix} \delta_i \vec{z}_i \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{VP \in (O_i, \vec{z}_i)}$

Question 33

Cet assemblage est composé de structures en parallèles, chacune étant composés de n liaisons en série : pivot – glissière – rotule.

La liaison équivalente d'un assemblage série est obtenue en sommant les torseurs cinématiques (éléments de réduction exprimés au même point).

La liaison équivalente à la structure en parallèle est obtenue en égalisant les torseurs cinématiques (au même point).

Question 34

Le résultat n'est pas une liaison normalisée (en tout cas pas au point B – qui reste cependant le meilleur point d'expression). Cette liaison pourrait être appelée une liaison linéaire annulaire à doigt. Elle est intéressante dans la mesure où la tête de coupe doit être positionnée pour supporter les courbures autour de \vec{y}_t et \vec{z}_t . Le déplacement selon l'axe \vec{x}_t permet quant à lui d'amortir la sortie des vérins de poussée et leurs effets sur la tête de coupe.

Question 35

L'hypothèse de petits déplacements est clairement validée. Le ratio est très grand entre les déplacements utiles et les déplacements parasites.

Enfin, on remarque que les angles sont de l'ordre de 1° comme souhaité dans le diagramme des exigences. Par conséquent la cinématique particulière d'orientation du bouclier est validée.

Question 36

Ici, un accéléromètre peut être utilisé en inclinomètre ou, plus simplement, un gyroscope peut également être utilisé..

Analyse du système de poussée

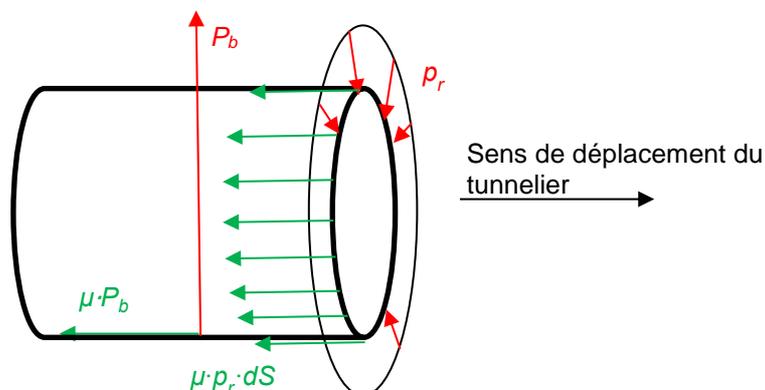
Question 37

Deux réponses sont possibles compte tenu de la précision de la représentation :

- au point marqué « b » : altitude la plus basse atteinte par le tunnelier ;
- dans la zone marquée Ch.14+500 : colonne de matière au-dessus du tunnelier la plus importante avec le monticule.

Pour une analyse plus fine, il faudrait également disposer de la masse volumique des matériaux, mais la composition du terrain varie peu le long du profil, donc ces propositions fournissent une bonne première approche.

Question 38



Le frottement est modélisé par les lois de Coulomb, dans une situation de glissement. En phase de poussée, il y a glissement entre le bouclier et le sol.

Donc :

$$F_1 = \mu \cdot \left(P_b + \pi \cdot L_b \cdot d_b \cdot \frac{\rho_v + \frac{\rho_h^{\max} + \rho_h^{\min}}{2}}{2} \right)$$

Application numérique : $F_1 = 21\,700$ kN

Question 39

Il faut effectuer le changement de variable : $h = H + \frac{d_b}{2} - z_M$

D'où $p_f(z_M) = K_0 \cdot \gamma_{\text{eq}} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} - z_M \right)$

Soit $A = -K_0 \cdot \gamma_{\text{eq}}$ et $B = K_0 \cdot \gamma_{\text{eq}} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} \right)$.

En considérant la surface élémentaire $dS = r \cdot dr \cdot d\theta$ autour de M, on obtient :

$$dF = K_0 \cdot \gamma_{\text{eq}} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} - r \cdot \sin\theta \right) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

Question 40

$$F_2 = \iint_{\text{surface}} dF$$

$$F_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_b}{2}} K_0 \cdot \gamma_{\text{eq}} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} - r \cdot \sin\theta \right) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta$$

$$F_2 = K_0 \cdot \gamma_{\text{eq}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} \right) \cdot \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^{\frac{d_b}{2}}$$

$$F_2 = K_0 \cdot \gamma_{\text{eq}} \cdot \pi \cdot \frac{d_b^2}{4} \cdot \left(H + \frac{d_b}{2} \right)$$

Application numérique :

$$F_2 = 27\,800$$
 kN

Question 41

$$F_3 = n_m \cdot F_m + n_c \cdot F_c$$

$$F_3 = 8\,052$$
 kN

Question 42

$$F_p = c_v \cdot (F_1 + F_2 + F_3)$$

Application numérique :

$$F_p = 63\,300$$
 kN

Question 43

On note d_v le diamètre minimal d'un vérin.

$$F_p = 2 \cdot 14 \cdot \rho_a \cdot \pi \cdot \frac{d_v^2}{4}$$

$$\text{D'où } d_v = \sqrt{\frac{F_p}{7 \cdot \pi \cdot \rho_a}}$$

$$\text{A.N. : } d_v = 280$$
 mm

En assimilant l'arc de cercle occupé par un vérin à son diamètre, les 28 vérins occupent un cercle de périmètre $0,28 \times 28 = 7,8$ m, donc de diamètre environ 2,5 m.

Ce diamètre est très inférieur au diamètre du bouclier $d_b = 9,83$ m. Il n'y a donc pas de difficulté d'implantation.

Étude du système d'alimentation électrique

Question 44

Désignation	Système d'alimentation	Courant par phase I kA	Facteur de puissance F_p	Puissance active P kW	Puissance réactive Q kVAR	Puissance apparente S kVA
Système d'abattage	Triphasé U = 690 V	4,36	0,852	4440	2728	5211
Groupe de refroidissement	Triphasé U = 400 V	0,493	0,7	239	244	342
Système d'évacuation	Triphasé U = 400 V	2,25	0,8	1247	935,4	1559
Groupe pompe à huile, eaux et air	Triphasé U = 400 V	2,08	0,6	867	1151	1441
Eclairage et prises de courant	Monophasé V = 230 V	0,3	0,8	55	42	69

Justifications :

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$P = S \cdot F_p$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Question 45

Le théorème de Boucherot en régime sinusoïdal permet de déterminer les puissances active et réactive totales :

$$P = \sum_i P_i = 6848 \text{ kW} \text{ et } Q = \sum_i Q_i = 5100 \text{ kVAR}$$

Et donc :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 8538 \text{ kVA}$$

D'où :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = 246 \text{ kA}$$

Question 46

La chute de tension se faisant dans chacun des trois conducteurs on en déduit : que la chute de tension est donnée par $\Delta U = \frac{\rho L_c}{S_c} \cdot I_t = 56 \text{ V}$ et les pertes joules pour l'ensemble des trois conducteurs

$$P_J = 3 \cdot \frac{\rho L_c}{S_c} \cdot I_t^2 = 42,5 \text{ kW}$$

Question 47

Phase de maintenance : $Q = 41,66 \text{ kVAR} \rightarrow$ pas de gradin

Phase d'attente : $Q = 285,79 \text{ kVAR} \rightarrow$ 2 gradins de 100 kVAR et 1 gradin de 50 kVAR

Phase de pose des voussoirs : $Q = 1436,79 \text{ kVAR} \rightarrow$ 8 gradins de 100 kVAR et 4 gradins de 50 kVAR

Phase d'excavation, tous les postes sont alimentés : $Q = 5100 \text{ kVAR} \rightarrow$ tous les gradins.

Question 48

Il faut recalculer la puissance réactive consommée et appliquer le théorème de Boucherot

$Q' = 5100 - 1000 = 4100$ kVAR donc $S = 7982$ kVAR d'où $I_t' = 230,4$ A.

Soit une chute de tension $\Delta U = \frac{\rho L}{S} \cdot I_t' = 52$ V et des pertes joules totales $P_J = 3 \cdot \frac{\rho L}{S} \cdot I_t'^2 = 35,9$ kW

Les condensateurs permettent une baisse de 18% des pertes en ligne.

Question 49

En triphasé 400V, avec un facteur de puissance unitaire, le courant dans les conducteurs aurait été cinquante fois plus élevé qu'en 20 kV, soit de 9900 A. La section des conducteurs aurait été telle qu'ils auraient été très rigides si la chute de tension en ligne restait sous les 3%, avec pour conséquence des problèmes de déroulage/enroulage de câble lors du déplacement du tunnelier.

Question 50

Les études et travaux préalables débutent en 2010 et n'engendrent pratiquement pas d'émission de GES. La construction de l'infrastructure débute vers 2015 et monte progressivement en puissance, générant ainsi de plus en plus de GES, jusqu'à la fin programmée en 2028.

La mise en service débutera vers 2024, ce qui dès le début de l'exploitation engendre une réduction des émissions de GES, d'une part grâce la diminution des véhicules déjà existants circulant en Île-de-France et d'autre part grâce à un développement territorial recentré sur Paris et sa proche couronne.

Le fait de commencer l'exploitation avant la fin des travaux permet d'amorcer plus tôt la compensation des GES générés pendant les travaux et d'atteindre l'équilibre en 2031, soit seulement 3 ans environ après la mise en service complète du GPE.

Le projet permettra en 2070, soit 40 ans environ après le début de son exploitation, de présenter un solde négatif de 27 millions de TeqCO₂.

Le projet GPE est donc très bénéfique par rapport aux GES car il permet très rapidement de compenser les émissions et d'entamer la réduction. Il permet également de limiter l'impact paysager et l'emprise foncière en surface, afin de préserver les espaces naturels.

La seule problématique reste la gestion et l'utilisation des remblais issus des percements des tunnels. Une évacuation par rails est à privilégier et le stockage doit s'assurer de la neutralité des matériaux extraits. Une partie peut éventuellement être valorisée selon la nature des terrains rencontrés.

Rapport du jury de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Cette épreuve, d'une durée de 6 heures, coefficient 1, est commune aux quatre options. Les candidats composent dans les mêmes conditions, sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie. Conformément à l'arrêté du 28 décembre 2009 modifié fixant les sections et les modalités d'organisation des concours de l'agrégation, « cette épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de mobiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour conduire une analyse systémique, élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances globales et détaillées d'un système des points de vue matière, énergie et information afin de valider tout ou partie de la réponse au besoin exprimé par un cahier des charges. Elle permet de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour analyser et modéliser le comportement d'un système pluritechnologique automatique. »

1. Présentation du sujet

Le sujet proposé pour cette épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur est disponible en téléchargement sur le site du ministère à l'adresse :

https://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/agregation_externe/96/6/s2021_agreg_externe_sii_1_138_9966.pdf



Il s'appuie sur un des tunneliers de la société Herrenknecht utilisé pour la réalisation du Grand Paris Express, fréquemment présenté comme le « chantier du siècle ». Le projet global vise à doter l'Île-de-France d'un métro automatique en rocade pour décongestionner le centre de l'agglomération parisienne, désenclaver les territoires de banlieues, et soutenir le développement économique de la région en mettant en réseau les grands pôles métropolitains. Le sujet se concentre sur la réalisation du lot 1 de la ligne 16, qui représente une galerie d'environ 9,8 m de diamètre et de 3,7 km de longueur.

L'objectif général de l'étude est la vérification des performances et des choix techniques par rapport à un cahier des charges imposé. Le sujet comporte plusieurs parties :

- la première partie d'ordre général vise à valider le projet et le choix du tunnelier par rapport aux enjeux du développement durable et aux exigences de planification ;

- la deuxième partie valide les performances du système d'abattage ;
- la troisième partie se focalise sur la commande des moteurs du système d'abattage et a pour objectif de valider la technologie de la motorisation choisie et de son système de commande tout en assurant la sécurité du matériel en cas de défaillance majeure ;
- le système d'avance comprenant l'orientation de la tête de coupe et le système de poussée est abordé dans la quatrième partie ;
- la cinquième partie a pour objectif la validation du système d'alimentation électrique ;
- le sujet comprend enfin une dernière partie de synthèse et d'ouverture visant à analyser sous le spectre du développement durable le projet dans sa globalité.

2. Analyse globale des résultats

L'analyse globale des résultats amène aux constats suivants :

- la première partie d'ordre général était accessible à l'ensemble des candidats. Elle a d'ailleurs été abordée par 90 % des candidats, mais traitée correctement par 62 % d'entre eux ;
- la deuxième partie visait à valider le bon dimensionnement d'une chaîne d'énergie électromécanique classique. Elle a été traitée par 77 % des candidats ;
- la troisième partie a la particularité de traiter la motorisation en abordant à la fois la commande, la modélisation électrique et le dimensionnement mécanique de l'élément de sécurité. Cette partie pluritechnologique a été abordée globalement par 45 % des candidats mais rares sont ceux qui l'ont traitée entièrement ;
- l'étude sur le système d'avance proposée dans la quatrième partie a été abordée par 41 % des candidats mais avec une réussite globale très faible. Certaines questions plus indépendantes ont toutefois permis à certains candidats de gagner quelques points ;
- la cinquième partie sur l'alimentation électrique a souvent été entamée. Deux tiers des candidats ont abordés le bilan de puissance, mais peu d'entre eux ont réussi à conclure ;
- la question de synthèse et d'ouverture n'a été abordée que dans 44 % des copies. Toutefois, les candidats ayant pris la peine de rédiger une conclusion ont souvent bien analysé les enjeux liés au développement durable du projet.

Encore une fois, les candidats ayant réussi cette épreuve sont ceux qui ont fait preuve de transversalité et qui ont fait l'effort d'aborder chacune des parties. Chaque partie était conçue avec une difficulté croissante des questions, permettant aux candidats des différentes spécialités à la fois de pouvoir aborder partiellement chaque problématique, mais également de s'affirmer dans son domaine de prédilection. Le jury ne peut qu'encourager les futurs candidats à s'orienter encore plus vers cette transversalité technologique qui fait la particularité des futurs enseignants de sciences industrielles de l'ingénieur.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Analyse du projet et validation du choix du tunnelier (Q1 à Q8)

Certains candidats ne connaissent pas les piliers du développement durable, concept pourtant essentiel dans l'enseignement en baccalauréat technologique STI2D. Leur identification était pourtant essentielle pour permettre une analyse pertinente. Les tracés des analyses granulométriques ont souvent été très approximatifs, mais la très grande majorité des candidats a pu identifier correctement le type de tunnelier. La partie visant à calculer le temps de percement de la galerie faisait intervenir un calcul simple de volume de couronne cylindrique, régulièrement mal écrit. Le jury rappelle aux candidats de vérifier l'homogénéité des expressions proposées. De nombreux candidats mettent difficilement en œuvre un calcul littéral, se perdant alors dans des applications numériques successives non demandées.

Quelques candidats ont mal lu le sujet, calculant le temps de creusement pour une galerie de 3,724 m au lieu de 3 724 m. Cela interpelle sur la capacité à critiquer un résultat. La conclusion de la partie a été plutôt bien traitée par les candidats qui ont pu effectuer des calculs cohérents.

Dimensionnement de la motorisation du système d'abattage (Q9 à Q16)

Le diagramme de blocs interne proposé a été souvent mal complété, les flux étant difficilement correctement complétés. Le jury rappelle que les diagrammes SysML sont désormais intégrés dans tous les programmes de pré-bac et de CPGE, et également dans quelques spécialités de BTS. Cela constitue donc un incontournable de la discipline.

L'analyse du diagramme couple-vitesse a été très souvent abordée mais beaucoup de candidats n'ont pas su identifier le point de puissance maximum et se sont contentés de multiplier la vitesse maximale et le couple maximum. Certains candidats n'ont pas converti les vitesses en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ avant d'effectuer le calcul de la puissance, ce qui est difficilement concevable à ce niveau.

Le réducteur classique a été bien traité alors que le calcul du rapport de réduction du réducteur épicycloïdal a été très peu réussi. Les candidats connaissant la méthode de résolution ont généralement réussi ce calcul. Les candidats ont généralement tout de même pu écrire l'expression du couple disponible sur la tête de coupe permettant de tracer le diagramme couple-vitesse en sortie de mécanisme, avec des erreurs régulières sur les rendements introduits. La comparaison, vis-à-vis des expériences des chantiers déjà réalisés, a souvent été traitée pertinemment.

Analyse de la motorisation (Q17 à Q28)

La première sous-partie sur le réseau Profibus a été convenablement traitée. Les conversions classiques binaire-décimal-hexadécimal sont bien maîtrisées, mais les candidats n'ont pas toujours exploité correctement la documentation technique permettant d'identifier les télégrammes échangés.

Les candidats ont majoritairement su exploiter le document permettant d'identifier les critères de choix de la motorisation du tunnelier. Par contre, la modélisation de la machine asynchrone, pourtant très classique, a été très peu abordée, souvent en omettant le caractère triphasé de la machine.

L'analyse du déclenchement du système de sécurité SafeSet, couplé aux moteurs, a été très rarement traitée correctement. L'étude portait sur une sollicitation simple de torsion d'un arbre cylindrique. Les candidats savent calculer dans la majorité des cas la contrainte maximale pour un couple imposé, ce qui n'est pas le cas pour un angle imposé. Ils ne parviennent pas à faire le lien entre les défauts d'angle ou variations de couple liés à la motorisation et les sollicitations sur l'arbre de transmission. Les conséquences sur le comportement du SafeSet sont alors mal analysées.

Étude du système d'avance (Q29 à Q43)

L'analyse du fonctionnement du système d'avance ne présentait pas de difficulté particulière si le candidat utilisait rigoureusement le diagramme d'états proposé : l'apparition d'une panne n'était pas envisagée et n'avait pas lieu de l'être. Les événements proposés (miseEnRoute...) ne devaient pas être considérés comme des états et donc être prolongés.

La projection demandée à la question 30 a été trop souvent envisagée dans le plan alors qu'elle était bien représentée dans l'espace. Une minorité de candidats a abordé le code permettant d'identifier la zone à renvoyer, mais pour ceux qui l'ont abordé, des solutions originales ont été proposées, permettant de condenser le code en jouant sur les numéros des zones adjacentes radialement.

L'analyse portant sur le dispositif d'orientation du bouclier révèle de réelles difficultés à écrire les torseurs cinématiques de liaisons pourtant très classiques, tant dans leur forme générale, que dans la rigueur des termes à introduire. Le principe général de détermination de liaisons équivalentes est assez bien connu.

L'analyse du système de poussée s'appuyait sur des calculs intégraux à partir de modèles locaux de répartition d'efforts.

Chaque étape a posé beaucoup de difficultés : représenter correctement les actions liées aux frottements, effectuer un changement de variable, identifier l'élément d'intégration, réaliser le calcul intégral. Seuls 1,7 % des candidats parviennent à mener l'ensemble de cette démarche dans son intégralité.

La détermination de la taille des vérins de poussée a été correctement abordée dans l'ensemble, l'erreur récurrente venant de leur association par paire. Le jury rappelle qu'il est indispensable de bien lire le sujet et de ne pas se précipiter lorsque la question semble simple.

Étude du système d'alimentation électrique (Q44 à Q49)

Le bilan de puissance a été souvent bien traité mais trop de candidats se contentent de sommer les courants pour obtenir le courant au primaire du transformateur. Le jury rappelle que l'utilisation du théorème de Boucherot est indispensable à cette étape.

Les chutes de tensions et les pertes ont souvent été calculées mais généralement en omettant le caractère triphasé de l'alimentation. Le choix des gradins de compensation à enclencher est souvent bien traité mais la surcompensation, pour les petites puissances, doit absolument être évitée. Certains candidats pensent que les condensateurs jouent le rôle de batterie en cas d'interruption de l'alimentation, ce qui est absolument faux.

La justification pertinente, à savoir la diminution de la section des conducteurs et les problèmes mécaniques qui en découlent, a été très peu mentionnée pour justifier l'alimentation en haute tension.

Synthèse (Q50)

L'analyse des courbes a été bien traitée pour les candidats qui avaient bien identifié le fait que le graphique donnait des émissions cumulées. Certaines réponses ont été considérées comme incomplètes car elles ne présentaient pas d'ouverture par l'analyse d'autres facteurs environnementaux comme la gestion des remblais par exemple.

Conseils aux futurs candidats

Le jury encourage fortement les candidats à traiter toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble des domaines des sciences industrielles de l'ingénieur. Les résultats démontrent que ceux qui refusent d'évoluer vers une approche transversale et sélectionnent les questions relatives aux différentes spécialités de l'ingénierie ne réussissent pas cette épreuve, car la note finale se trouve alors fortement limitée. Par conséquent, le jury conseille aux futurs candidats de s'investir sérieusement dans toutes les parties du programme du concours et d'acquérir l'ensemble des corpus des compétences et des connaissances associées aux disciplines qui constituent les sciences industrielles de l'ingénieur.

Les candidats doivent également s'attacher à utiliser leurs connaissances universitaires afin de résoudre des problématiques techniques associées à des systèmes industriels. Les plus efficaces ont su ne pas perdre de vue que les analyses, les justifications et les choix technologiques doivent être toujours menés en gardant à l'esprit les enjeux du contexte industriel spécifique à l'étude.

Le jury constate parfois un manque de rigueur, notamment dans l'écriture des expressions littérales, et de précision dans la présentation des copies et la rédaction. La présentation doit être irréprochable, les notations imposées dans le sujet doivent être scrupuleusement respectées et il convient de rappeler qu'il est attendu d'un fonctionnaire de l'État qu'il maîtrise convenablement la langue française et veille à construire ses phrases dans le respect de la sémantique. Il doit aussi respecter les règles de l'orthographe et de la grammaire française afin de s'assurer que ce qu'il souhaite exprimer soit compréhensible et lisible. Le jury ne peut valoriser une justification qui se limite à une suite de mots clés juxtaposés.

Le jury apprécie l'esprit critique face à des résultats aberrants, et admet le choix délibéré de commenter ces résultats pour continuer le traitement du sujet. Les réponses doivent être détaillées et argumentées : des résultats donnés directement, sans calcul, sans justification de principe, ne peuvent pas être pris en compte comme étant justes. Par ailleurs, les réponses montrant une maîtrise de la démarche mais n'arrivant pas jusqu'à la conclusion sont valorisées. Le jury souligne la grande qualité d'expression constatée dans certaines copies, rédigées avec un souci de clarté.

Réussir cette épreuve demande :

- de s'approprier en un temps limité un sujet technique pluridisciplinaire décrit avec les outils de modélisation de l'ingénierie système ;
- de maîtriser les modèles de connaissance des différents domaines d'étude de l'ingénierie ;
- d'analyser et d'interpréter des résultats d'étude, afin de formuler des conclusions cohérentes et pertinentes en concordance avec une problématique scientifique et technique.

4. Conclusion

Le sujet a été conçu pour permettre aux candidats d'exprimer au mieux leurs compétences dans différents champs d'application d'un système pluritechnologique correspondant au cadre de cette épreuve transversale. Le jury engage fortement les futurs candidats à se préparer conformément aux attendus de l'arrêté du 28 décembre 2009 modifié.

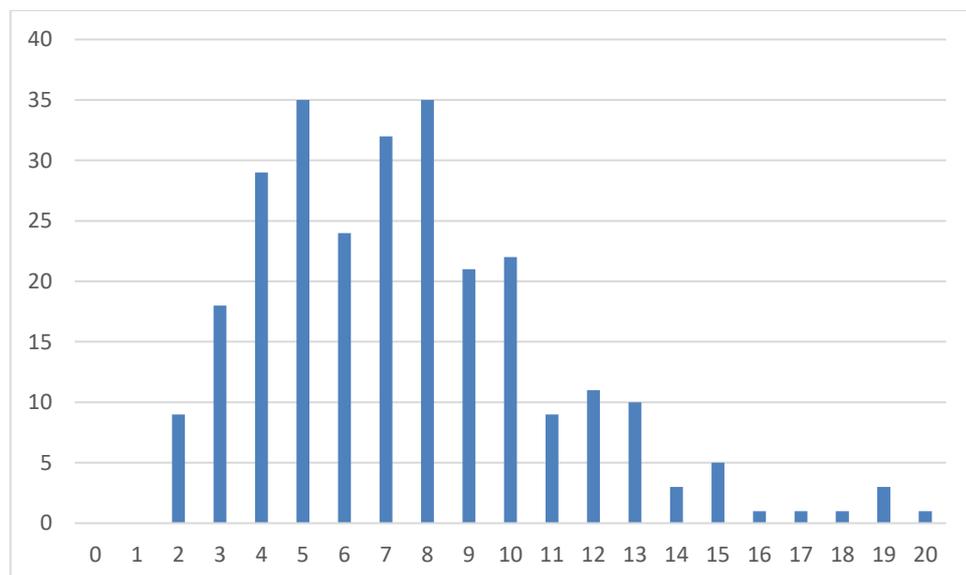
Les auteurs tiennent particulièrement à remercier la société Herrenknecht, fabricant du tunnelier support de cette épreuve, pour l'ensemble des données communiquées et les précieux conseils apportés pour proposer une analyse conforme aux problématiques industrielles.

5. Résultats

270 copies ont été évaluées. La moyenne des notes obtenues est de 8/20, avec un écart-type de 3,5/20 avec :

- 20/20 comme meilleure note ;
- 2,11/20 comme note la plus basse.

Histogramme des notes



Éléments de correction de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

Présentation de l'épreuve

Arrêté du 28 décembre 2009 modifié

Durée totale de l'épreuve : 6 heures

– Coefficient 1

L'épreuve est spécifique à l'option choisie.

À partir d'un dossier technique comportant les éléments nécessaires à l'étude, l'épreuve a pour objectif de vérifier que le candidat est capable de synthétiser ses connaissances pour modéliser un système technique dans le domaine de la spécialité du concours dans l'option choisie en vue de prédire ou de vérifier son comportement et ses performances.

Sujet

Le sujet est disponible en téléchargement sur le site du ministère à l'adresse :

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/concours-examens/13154/13154-agregation-ext-2021-sii-opt-sii-et-im-epreuve-2.pdf>

Éléments de correction

Question 1 : En considérant A1 mobile et A2, A3 fixes, on trouve directement $course = 2 \cdot \frac{3D}{4} \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \approx \frac{3D}{4} \sin \gamma$. La course maximale pour $\gamma = 15^\circ$ est de 49 mm. La course de l'actionneur étant de 59 mm, l'exigence est respectée.

Question 2 : A partir du résultat de la question précédente, on trouve un déplacement pour $\gamma = 0,1^\circ$ de 0,33 mm. La résolution assurée par l'actionneur est donc égale à $\frac{2\pi}{200} \cdot r_m \cdot r_e \cdot \frac{0,7}{2\pi} \approx 48 \cdot 10^{-9}$ m. On obtient alors un déplacement de $2,5 \cdot 10^{-7}$ °. Cette valeur est bien inférieure aux $0,33^\circ$ imposés.

Question 3 : La surface de contact entre un roulement et l'axe télescopique étant ponctuelle, la liaison réalisée est une ponctuelle de normale (R_i, \vec{e}_r) . Lorsqu'on a trois roulements répartis à 120° , on obtient alors en écrivant l'équation de compatibilité des torseurs d'action mécanique dans la base cartésienne :

$$\begin{Bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_p} + \begin{Bmatrix} \frac{-R_2}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} R_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_p} + \begin{Bmatrix} \frac{-R_3}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} R_3 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_p} = \begin{Bmatrix} X & 0 \\ Y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_p}.$$

Les trois liaisons en parallèle forment un torseur équivalent à une liaison sphère-cylindre de centre d'axe (O_p, \vec{e}_z) .

Question 4 : En associant deux liaisons linéaires sphère-cylindre de même axe, on obtient une liaison pivot-glissant d'axe (O_p, \vec{e}_z) équivalente au contact entre les six roulements et l'axe télescopique.

Question 5 : Le degré d'hyperstatisme du mécanisme est donné par la relation : $h = m_c + 6\gamma - I_c$ avec :

- m_c : le nombre de mobilités du mécanisme (ici égal à deux) ;
- γ : le nombre cyclomatique (ici égal à cinq) ;
- I_c : le nombre d'inconnues cinématiques (ici égal à 30).

On en déduit un degré d'hyperstatisme de deux. L'hyperstatisme permet de rigidifier la structure du mécanisme et donc d'améliorer la transmission des vibrations sismiques entre le sol et les instruments. Cette rigidité permettra de s'assurer que la fréquence propre du LVL soit supérieure à 50 Hz.

Question 6 : On applique le Principe Fondamental de la Dynamique sur le solide 1. Les équations de résultante s'écrivent alors :

$$\begin{pmatrix} M \ddot{x}_1 \\ M \ddot{y}_1 \\ M \ddot{z}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_h^t \cdot (x_{B_1} - x_{A_1}) - k_h^b \cdot (x_{C_1} - x_{sol}) \\ -k_h^t \cdot (y_{B_1} - y_{A_1}) - k_h^b \cdot (y_{C_1} - y_{sol}) \\ -k_v^t \cdot (z_{B_1} - z_{A_1}) - k_v^b \cdot (z_{C_1} - z_{sol}) \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \ddot{\theta}_x \\ I_1 \ddot{\theta}_y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1 \cdot k_h^t \cdot (y_{B_1} - y_{A_1}) - H_1 \cdot k_h^b \cdot (y_{C_1} - y_{sol}) \\ -H_1 \cdot k_h^t \cdot (x_{B_1} - x_{A_1}) + H_1 \cdot k_h^b \cdot (x_{C_1} - x_{sol}) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

On obtient ainsi cinq équations indépendantes.

Question 7 : On utilise la formule de transport des petits déplacements pour obtenir :

$$\vec{U}_{B_1, S_1/R_0} = \vec{U}_{G_1, S_1/R_0} + \vec{B}_1 \vec{G}_1 \wedge \vec{\theta}_{S_1/R_0}$$

ainsi :

$$\begin{pmatrix} x_{B_1} \\ y_{B_1} \\ z_{B_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + H_1 \theta_{1y} \\ y_1 - H_1 \theta_{1x} \\ z_1 \end{pmatrix}$$

et

$$\begin{pmatrix} x_{C_1} \\ y_{C_1} \\ z_{C_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - H_1 \theta_{1y} \\ y_1 + H_1 \theta_{1x} \\ z_1 \end{pmatrix}$$

Question 8 : $[U]$ contient tous les degrés de mobilité appelés « degrés de liberté » et $[U_d]$ représente le vecteur des déplacements imposés, ici ceux du sol. Le système est de taille 21 (21 degrés de liberté, 21 équations indépendantes).

Question 9 : Avant 10 Hz, le gain est de 1 ce qui signifie que jusqu'à 10 Hz, le mouvement du sol est transmis directement ; par contre après 10 Hz, le signal est amplifié par la résonance du LVL. Pour le VBB qui doit mesurer sur [0,01-5 Hz], le fonctionnement est assuré mais pas pour le SP qui doit mesurer entre 0,1 et 50 Hz. Comme les résultats analytiques et mesurés sont très proches, il est possible d'utiliser le modèle analytique pour corriger les mesures du SEIS qui sont affectées par une résonance du LVL.

Si on augmente la masse, la longueur ou la flexibilité des jambes, les fréquences propres du LVL vont se décaler vers les basses fréquences, détériorant alors les performances du SEIS. Il faut donc :

- minimiser la masse du LVL et des capteurs ;
- diminuer la longueur des jambes au maximum.

Ainsi, un sol plat ne nécessitant pas de mise à niveau sera optimal puisqu'on pourra abaisser le LVL au maximum.

Question 10 : On souhaite avoir la première fréquence propre au-delà de la bande de fréquence d'intérêt, tout en limitant la masse du pied et l'encombrement du système (pour des raisons de transport). On peut proposer par exemple :

- Objectif de maximiser la fréquence f_1 avec une masse maximale imposée ;
- Objectif de minimiser la masse avec une fréquence f_1 minimale imposée de 50 Hz.

Question 11 : La première fréquence propre du pied est $f_1=4017$ Hz, bien au-delà de 50 Hz. La conception du pied est donc suffisamment rigide pour pouvoir être assimilé à un solide rigide au sein de la structure LVL lors de l'étude du comportement dynamique en-dessous de 50 Hz de la structure.

Question 12 : La conception tubulaire des pieds télescopiques en INVAR et la liaison hyperstatique entre les deux parties du pied permet de reporter la première fréquence propre des pieds au-delà de la plage de fréquence étudiée et donc de leur conférer un comportement de solide rigide. La conception choisie permet donc de rigidifier au maximum la structure LVL, la souplesse de celle-ci provient essentiellement des liaisons entre les pieds et l'anneau. La structure LVL assure ainsi un lien rigide entre le sol et les capteurs jusqu'à 10 Hz.

Question 13 : L'utilisation d'une lame flexible permet de bloquer les translations entre les deux parties du système et de conserver deux rotations. La multiplication de ces lames permet de ne conserver qu'une rotation afin de réaliser une liaison pivot.

Question 14 : Avec l'hypothèses de petites perturbations, on trouve $v = \delta \cdot l$. Les lamelles sont alors déformées principalement par une sollicitation en flexion.

Question 15 : L'expression de la flèche subie par une poutre console avec un effort F_l à l'extrémité s'écrit : $v = \frac{F_l^3}{3E_l I_l}$ avec $I_l = \frac{he^3}{12}$.

Question 16 : On déduit du résultat précédent l'expression de F_l : $-F_l = -\frac{3E_l I_l}{l^2} \delta \theta$.

Question 17 : L'application du théorème du moment projeté sur l'axe (O, \vec{e}_2) permet d'écrire :

$$F \cdot \frac{l^3}{2} + 20 \cdot F_l \cdot l = 0$$

où le terme $F \cdot \frac{l^3}{2}$ représente le couple exercé sur la liaison pivot. On en déduit alors la raideur k de la liaison (exprimée en $Nm \cdot rad^{-1}$) :

$$k = \frac{-20 \cdot F_l \cdot l}{\delta \theta} = \frac{60E_l I_l}{l} = \frac{5E_l h e^3}{l}$$

Question 18 : L'application numérique de la relation précédente donne : $k = 0,003 Nm \cdot rad^{-1}$. La liaison réalisée possède donc une raideur très faible vis-à-vis des efforts mis en jeu.

Question 19 : La taille des éléments du maillage est $l_e = \frac{\pi r}{n}$.

Question 20 : L'angle β_i s'exprime donc : $\beta_i = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2n} + (i-1) \cdot \frac{\pi}{n} = -\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2n} + \frac{i\pi}{n}$.

Question 21 : La matrice de rotation du repère global au repère local est :

$$[R_i] = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & \sin \beta_i & 0 \\ -\sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de passage complète s'écrit donc

$$[P_i] = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & \sin \beta_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \beta_i & \sin \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Question 22 : Pour un maillage avec $n=2$ éléments, on obtient les angles : $\beta_1 = -\frac{\pi}{4}$ et $\beta_2 = \frac{\pi}{4}$. Ainsi, les matrices de passage s'écrivent :

$$[P_1] = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } [P_2] = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Avec l'application du principe des puissances virtuelles, on obtient les relations : $[K'_e] = [P]^T [K_e] [P]$ et $[F'_e] = [P]^T [F_e]$.

L'assemblage donne alors une matrice 6x6 et les conditions aux limites correspondent à :

- un encastrement au nœud 3 : $u_3 = v_3 = \theta_3 = 0$ et on supprime les lignes (et colonnes) associées aux degrés de liberté bloqués ;
- un chargement F selon \vec{e}_y au nœud 1.

Question 23 : La raideur c est donnée par la relation : $c \approx \frac{rF}{v_1} = \frac{r^2 F}{v_1}$ sous l'hypothèse de petites déformations. L'application numérique donne $c \approx 0,0143 \text{ Nm} \cdot \text{rad}^{-1}$. La faible sensibilité thermique du thermelast permet une application sur Mars.

Question 24 : L'application du théorème du moment statique en O appliqué à l'ensemble S_2 projeté sur l'axe (O, \vec{x}) donne :

$$\begin{aligned} & [-(c+k)(\alpha - \alpha_0) \vec{e}_z + \overrightarrow{OG} \wedge m \vec{g}] \cdot \vec{x} = 0, \\ & -(c+k)(\alpha - \alpha_0) + amg \sin \alpha = 0. \end{aligned}$$

Question 25 : L'angle du pendule par rapport à l'axe \vec{z} est $\alpha + \theta(t)$. Le point O n'est pas un point fixe du mouvement de S_2 par rapport à R_0 . Par transport du moment dynamique, à partir du point G , on obtient :

$$\vec{\delta}_{O, S_2/R_0} = \vec{\delta}_{G, S_2/R_0} + \overrightarrow{OG} \wedge m \vec{a}_{G, S_2/R_0}$$

avec $\vec{\delta}_{G, S_2/R_0} = J_G \ddot{\theta} \vec{x}$ et $J_G = J - ma^2$ (théorème de Huygens).

D'autre part, on trouve par dérivation :

$$\vec{a}_{G, S_2/R_0} = v_{zsol} \vec{z} - a \ddot{\theta} \vec{y}_c - a \dot{\theta}^2 \vec{z}_c.$$

On obtient alors :

$$\vec{\delta}_{O, S_2/R_0} = [J \ddot{\theta} - ma v_{zsol} \sin(\alpha + \theta)] \vec{x}.$$

Question 26 : L'application du théorème du moment dynamique à S_2 en O selon l'axe \vec{x} s'écrit :

$$\vec{\delta}_{O, S_2/R_0} \cdot \vec{x} = J \ddot{\theta} - ma v_{zsol} \sin(\alpha + \theta) = -(c+k)(\alpha + \theta - \alpha_0) + amg \sin(\alpha + \theta)$$

soit

$$J \ddot{\theta} - ma v_{zsol} \sin(\alpha + \theta) = -(c+k)\theta + amg(\sin(\alpha + \theta) - \sin \alpha)$$

Question 27 : Avec les hypothèses de petites oscillations, on peut linéariser l'expression de $\sin(\alpha + \theta)$ au premier ordre : $\sin(\alpha + \theta) \approx \sin \alpha + \theta \cos \alpha$.

En remplaçant l'expression dans le résultat de la question 26, on obtient :

$$-(c+k)\theta + amg \theta \cos \alpha = J \ddot{\theta} - ma v_{zsol} (\sin \alpha + \theta \cos \alpha).$$

En remarquant que

$$ma v_{zsol} \cos \alpha \ll c + k - amg \cos \alpha$$

l'équation se simplifie :

$$J \ddot{\theta} + [(c+k) - amg \cos \alpha] \theta = ma v_{zsol} \sin \alpha.$$

Question 28 : La pulsation propre du système d'ordre 2 obtenu question précédente s'écrit :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c+k-amg \cos \alpha}{J}}$$

On identifie la raideur équivalente du pendule $K=c+k-amg \cos \alpha$.

Question 29 : Le gain mécanique G représente le rapport d'amplification entre les déplacements Y_C générés au niveau du capteur et les accélérations générées par la surface de Mars dans cette même direction (selon l'axe de sensibilité) pour $\Omega \ll \omega_0$, donc à très basse fréquence. Le gain représente donc la capacité du système à mesurer les accélérations basses fréquences du pendule.

Question 30 : Les déplacements générés au niveau du capteur et les accélérations générées par la surface de Mars dans cette même direction sont respectivement :

$$y_c = b\theta \text{ et } y_{y_{c, \text{sol}}} = \vec{Y}_{z_{\text{sol}}} \cdot \vec{Y}_c = Y_{z_{\text{sol}}} \sin \alpha.$$

Les oscillations forcées du pendule sont gouvernées par l'équation obtenue question 27 avec l'accélération du sol : $y_{z_{\text{sol}}} = \Gamma_{z_{\text{sol}}} \cos \Omega t$ imposée dans la direction \vec{z} et θ de la forme $\theta = A \cos \Omega t$.

On définit donc l'amplitude des déplacements $Y_C = bA$ et l'amplitude des accélérations du sol $\Gamma_{y_c} = \Gamma_z \sin \alpha$. Le gain devient alors :

$$G = \lim_{\frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \rightarrow 0} \frac{bA}{\Gamma_{z_{\text{sol}}} \sin \alpha}$$

En injectant les formes des accélérations et les angles de rotation dans l'équation de la question 27, on obtient :

$$(\omega_0^2 - \Omega^2)A = \frac{ma \sin \alpha}{J} \Gamma_{z_{\text{sol}}}$$

et le gain :

$$G = \lim_{\frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \rightarrow 0} \frac{bA}{\Gamma_{z_{\text{sol}}} \sin \alpha} = \lim_{\frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \rightarrow 0} \frac{mab}{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2}\right) \omega_0^2 J} = \lim_{\frac{\Omega^2}{\omega_0^2} \rightarrow 0} \frac{mab}{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2}\right) K} = \frac{mab}{K}$$

Question 31 : Pour augmenter le gain à basse fréquence, on peut :

- augmenter la longueur b ;
- diminuer le rapport $\frac{c+k}{m}$ ou augmenter α tout en respectant $\frac{c+k}{m} > g \cos \alpha$ pour avoir un pendule inversé stable ($K > 0$), cela consiste à avoir des ressorts souples, c et k faibles et une masse m relativement grande.

Idéalement, il faudrait un angle $\alpha = \frac{\pi}{2}$ pour maximiser le gain.

Question 32 : On obtient pour le VBB les valeurs suivantes :

- $K = 0,0015 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$,
- $f_0 = 0,3759 \text{ Hz}$,
- $G = 0,1840 \text{ s}^2$.

Le VBB est donc performant pour des fréquences inférieures à 0,5 Hz avec des gains de l'ordre de 0,1 s². Il ne satisfait pas les exigences attendues pour des fréquences comprises entre 0,5 Hz et 5 Hz.

Question 33 : La fonction de transfert de la boucle interne s'écrit :

$$\frac{U_c(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{(1 + \tau_{HP}) b K_D}{b K_D K_H K_I p + (J p^2 + A)(1 + \tau_{HP})}$$

Question 34 : On applique le critère de Routh sur le dénominateur de la fonction de transfert. Celui-ci s'applique puisque tous les coefficients du dénominateur sont strictement positifs. On obtient avec les valeurs numériques le dénominateur suivant :

$$2,71 \cdot 10^{-7} p^3 + 2,71 \cdot 10^{-4} p^2 + (1,6 \cdot 10^{-6} + K_I \cdot 4,44 \cdot 10^{-3}) p + 1,6 \cdot 10^{-3}$$

Les coefficients du tableau de Routh sont donc :

$$\begin{array}{r} 2,71 \cdot 10^{-7} \quad (1,6 \cdot 10^{-6} + K_1 \cdot 4,44 \cdot 10^{-3}) \\ 2,71 \cdot 10^{-4} \quad 1,6 \cdot 10^{-3} \\ K_1 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6} \\ \hline 2,71 \cdot 10^{-4} \end{array}$$

Les coefficients de la première colonne sont tous positifs dès lors que K_1 est positif. La stabilité est donc assurée si $K_1 > 0$.

Question 35 : La valeur $K_1 = 0,4$ est la valeur permettant d'obtenir la meilleure rapidité (valeur de gain la plus élevée), sans résonance. Les trois pôles du système sont donc : $p_1 = -9,93 \cdot 10^2$; $p_2 = -5,54$; $p_3 = -1,07$. On conserve les pôles dominants 2 et 3 possédants la partie réelle la plus faible. La fonction de transfert simplifiée s'écrit ainsi :

$$\frac{(1 + \tau_H p) b K_D}{J \tau_H (p - p_2)(p - p_3)}$$

Question 36 : On applique le théorème de la valeur finale uniquement avec la boucle interne et on obtient :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} u_c(t) = \lim_{p \rightarrow 0^+} p U(p) = \lim_{p \rightarrow 0^+} p \cdot \text{mag} \sin \alpha \cdot \frac{(1 + \tau_H p) b K_D}{J \tau_H (p - p_2)(p - p_3)} \cdot \frac{Y_{z0}}{p} = \frac{b K_D}{J \tau_H p_2 p_3} Y_{z0}$$

La valeur de u_c étant proportionnelle au déplacement du pendule, celui-ci n'est donc pas dans une position neutre lorsque l'accélération est constante.

Question 37 : La fonction de transfert en boucle fermée est alors :

$$H(p) = \frac{\text{mag} \sin \alpha \cdot (1 + \tau_H p) b K_D p (1 + \tau_B p) p^2}{J \tau_H (p - p_2)(p - p_3) (1 + \tau_B p) p^2 + (1 + \tau_H p) b K_D K_B K_2 p (1 + \tau_2 p)}$$

Question 38 : Lorsque l'accélération est constante, on a $Y_z(p) = \frac{Y_{z0}}{p}$, le théorème de la valeur finale donne donc :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} u_c(t) = \lim_{p \rightarrow 0^+} p U(p) = \lim_{p \rightarrow 0^+} p \cdot H(p) \cdot \frac{Y_{z0}}{p} = 0$$

Lors d'une accélération constante, le balancier est bien en position neutre.

Question 39 : Cette configuration permet de s'assurer que celui-ci est toujours utilisé dans sa plage de fonctionnement optimal. Les distances mesurées de déplacement étant très faibles, il est nécessaire que sa position ne dépende pas de paramètres autres que les secousses sismiques (défaut d'orientation du VBB ou autre).

Question 40 : On souhaite utiliser le VBB pour mesurer les accélérations du sol. Il est donc préférable d'avoir le gain le plus élevé possible mais également le plus constant possible sur la plage de mesure. La valeur $\tau_2 = 50$ s semble donc la plus appropriée.

Question 41 : Sur la plage de fréquence attendue ($[0,01 ; 0,5$ Hz], soit $[0,06 ; 3$ rad.s⁻¹]) on a un gain inférieur à 110 dB ($110 \text{ dB} = 3,2 \cdot 10^5$). L'exigence est validée.

Question 42 : Il est préférable de choisir la valeur intermédiaire de K_2 (0,01) afin d'obtenir un système ayant une plage de réponse importante et un temps de réponse adapté à l'utilisation (de l'ordre de 1000 s).

Question 43 : Les directions de sensibilité sont :

$$\begin{aligned} \vec{u} &= \cos \alpha \vec{y} + \sin \alpha \vec{z} \\ \vec{v} &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \vec{x} - \frac{1}{2} \cos \alpha \vec{y} + \sin \alpha \vec{z} \end{aligned}$$

$$\vec{w} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha \vec{x} - \frac{1}{2} \cos \alpha \vec{y} + \sin \alpha \vec{z}$$

Les accélérations mesurées selon les axes de sensibilité sont définies par :

$$\begin{aligned} Y_{usol} &= \vec{v}_{sol} \cdot \vec{u} = \cos \alpha Y_{ysol} + \sin \alpha Y_{zsol} \\ Y_{vsol} &= \vec{v}_{sol} \cdot \vec{v} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha Y_{xsol} - \frac{1}{2} \cos \alpha Y_{ysol} + \sin \alpha Y_{zsol} \\ Y_{wsol} &= \vec{v}_{sol} \cdot \vec{w} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha Y_{xsol} - \frac{1}{2} \cos \alpha Y_{ysol} + \sin \alpha Y_{zsol} \end{aligned}$$

Sous forme matricielle, on obtient :

$$\begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha & -\frac{1}{2} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha & -\frac{1}{2} \cos \alpha & \sin \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{xsol} \\ Y_{ysol} \\ Y_{zsol} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{usol} \\ Y_{vsol} \\ Y_{wsol} \end{bmatrix}$$

On obtient : $Y_{zsol} = \frac{1}{3 \sin \alpha} (Y_{usol} + Y_{vsol} + Y_{wsol})$.

Question 44 : Les sources de bruit possibles sont :

- Les variations quotidiennes de température, qui agit sur la dilatation des matériaux et donc sur les caractéristiques géométriques et mécaniques (rigidité de la liaison pivot par exemple)
- Les bruits électroniques issus du champ magnétique, et des vibrations mécaniques.

Question 45 : L'accélération reconstruite Y_{zsol} s'écrit :

$$Y_{zsol} = \frac{1}{3 \sin \alpha} (Y_{usol} + Y_{vsol} + Y_{wsol} + 3\varepsilon) = \frac{1}{3 \sin \alpha} (Y_{usol} + Y_{vsol} + Y_{wsol}) + \frac{\varepsilon}{\sin \alpha}$$

Le bruit de mesure sur l'accélération reconstruite verticale est $\frac{\varepsilon}{\sin \alpha}$. Si on augmente α , on augmente ce bruit de mesure. Il faut donc un α assez grand pour optimiser le gain mécanique, mais pas trop grand pour limiter l'impact du bruit propre.

Question 46 : Il s'agit de reproduire l'accélération de la pesanteur de Mars sur Terre. Les gravités de Mars et de la Terre sont respectivement $g_{mars} = 3,71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ et $g_{terre} = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Pour reproduire la pesanteur il faut incliner le VBB tel que $g_{mars} = \cos \alpha g_{terre}$, soit $\alpha = \arccos\left(\frac{g_{mars}}{g_{terre}}\right) = 67,7^\circ$.

Question 47 : Exigence de bruit propre : $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{\frac{1}{2}}$ entre 0,001 et 1 Hz. Dans ce cas le bruit propre est bien inférieur à la valeur souhaitée entre 0,01 et 2 Hz. L'exigence n'est pas respectée pour les très basses fréquences entre 0,001 et 0,01 Hz.

Question 48 :

La première partie du sujet avait pour objectif de valider le choix des actionneurs linéaires pour que le LVL puisse mettre à niveau l'anneau support des sismomètres sur un sol, puis de valider la réponse fréquentielle du LVL dans son rôle de transmission des accélérations sismiques aux instruments du VBB. La justification de l'hypothèse de solide rigide utilisée pour un pied d'un point de vue conception technologique et comportement dynamique a permis l'obtention d'un modèle de fonction de transfert du LVL, validée par des résultats des mesures expérimentales. Cette première partie a ainsi permis de confirmer que le LVL assure bien la mise à niveau des capteurs pour vérifier les exigences de performances exigences 2.4 et 2.5 du SEIS et opère également comme lien rigide entre le sol et les capteurs VBB entre 0 et 10 Hz pour les sismomètres VBB (exigence 1.1).

La deuxième partie abordait la validation des exigences relatives aux performances de mesures du robot SEIS, en termes de gain et de plage de fréquence, à l'aide d'une modélisation du comportement général du sismomètre VBB.

Celui-ci est composé de trois pendules inversés orientés dans trois directions de sensibilité différentes. Ces pendules sont réalisés à l'aide de liaisons pivots utilisant des éléments flexibles, leurs conférant une légère raideur en rotation évaluée par un modèle de résistance des matériaux. Une étude dynamique menée sur l'un de ces pendules a dès lors permis de définir leurs gain et fréquence propre, déterminant ainsi l'orientation optimale à utiliser pour atteindre la sensibilité requise pour la mesure des ondes sismiques. Pour conclure cette partie, une étude du mécanisme de contre-réaction permettant la stabilisation des oscillations des éléments et la mesure des vibrations de surface martienne fut menée à l'aide d'une modélisation par schéma-bloc, permettant ainsi de vérifier la réponse à l'exigence 1.3 relative au gain d'acquisition de la chaîne de mesure.

La dernière partie du sujet avait pour objectif de remettre en perspective les choix réalisés durant les premières parties vis-à-vis de l'exploitation en conditions réelles du VBB. L'étude du rapport entre la sensibilité et les bruits de mesure observés sur les relevés issus des sismomètres a montré l'importance d'une réflexion sur les orientations à donner aux trois capteurs de vibrations pour respecter l'exigence 1.4.

Rapport du jury de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

1. Présentation du sujet

Le sujet portait sur la modélisation sismomètre SEIS (Seismic Experiment for Internal Structure) de la sonde Insight sur Mars. L'objectif de l'étude était de mettre en application les outils de modélisation permettant de caractériser les capacités d'acquisition du sismomètre VBB (Very Broad Band). Le VBB est un capteur trois axes à large bande de fréquences composé de trois pendules inversés placés dans une sphère en titane où le vide presque parfait est réalisé pour atténuer les contrastes de températures. Il est positionné sur une structure support appelée LVL, pour LeVeLing, qui doit assurer à la fois la mise à niveau des capteurs pour vérifier les exigences de performances du SEIS et doit opérer comme lien rigide entre le sol et les capteurs pour transmettre de façon intacte les ondes sismiques.

La modélisation de la structure d'acquisition, constituée des capteurs et de leur support LVL, avait donc pour objectifs de valider leur conception pour permettre la mesure des ondes sur une plage de fréquences de 0.01 à 50 Hz en environnement martien et de valider le fonctionnement de cette structure à partir de résultats d'observation.

La problématique générale était abordée en trois parties :

- la première consistait à valider les exigences relatives aux performances exigées pour le dispositif de mise à niveau LVL ainsi que la capacité du LVL à assurer une transmission correcte des vibrations du sol au VBB afin de rendre possibles les mesures sismiques par les capteurs ;
- la seconde permettait de valider les exigences relatives aux performances de mesures du robot SEIS, en termes de gain et de plage de fréquence, en modélisant le comportement général du sismomètre VBB ;
- enfin la troisième s'intéressait à la validation du fonctionnement du VBB en conditions réelles d'exploitation.

Il était proposé aux candidats de synthétiser la démarche mise en œuvre tout au long du sujet dans la dernière question.

2. Analyse globale des résultats

L'évaluation des copies montre une très forte hétérogénéité dans le traitement du sujet. Un petit nombre de candidats bien préparés traite correctement les trois quarts du sujet, pour bon nombre de candidats il se dégage un manque de maîtrise de connaissances et compétences élémentaires.

Une majorité des candidats a abordé le sujet de façon linéaire en suivant l'ordre des questions. La progressivité du questionnement autorisait cette démarche et a permis aux candidats les plus brillants d'exprimer toutes leurs qualités. Le jury a observé que les parties abordant des domaines de façon classique, comme l'asservissement et la théorie des poutres, a été traitée par la majorité des candidats. Certains candidats, en nombre trop réduit, démontrent leur capacité à produire des copies de qualité tant du point de vue rédactionnel que du point de vue orthographique. La capacité à produire des raisonnements bien construits a été fortement appréciée. Ce sont des compétences indispensables pour tout lauréat de l'agrégation.

En revanche, le jury a constaté de nombreuses erreurs ayant pour cause un manque de maîtrise des outils de résolution (projections, ...) et un manque de connaissance et de rigueur dans l'application et l'utilisation des modèles mécaniques même les plus classiques (calcul de moment de force, PFS, ...) par un nombre non négligeable de candidats.

Le jury tient à rappeler que la résolution d'un problème technique authentique de sciences de l'ingénieur nécessite de mettre en œuvre un raisonnement scientifique rigoureux avec la formulation d'hypothèses (qui peuvent être vérifiées *a posteriori*) afin de valider ou non un résultat. Si l'énoncé des lois est un préambule à la résolution des problèmes techniques à résoudre, cela ne saurait être suffisant pour une véritable valorisation de la copie.

Ainsi, la maîtrise des outils mathématiques est indispensable pour que les étapes relatives à la modélisation et à la résolution d'un problème soient menées avec rigueur. Le raisonnement est évidemment privilégié sur le résultat seul dans l'évaluation.

Les réponses aux questions d'analyse de solution technologiques revêtent un caractère trop souvent décontextualisé du problème à traiter ; elles s'avèrent également insuffisamment étayées technologiquement et scientifiquement. L'analyse ne peut se faire sans s'appuyer sur la modélisation proposée et doit être faite en regard des exigences du système étudié, une réponse convenue ne saurait satisfaire les exigences relatives à un concours tel que l'agrégation.

Enfin, le jury a constaté qu'un nombre non négligeable de candidats a traité uniquement le début du sujet avec maîtrise et rigueur. Le jury encourage vivement les candidats à s'entraîner en conditions proches de celles imposées par le concours afin de satisfaire les exigences de rédaction et de rapidité que nécessite la participation à une épreuve en temps limité.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie 1

L'objectif de cette partie était de valider les performances de la structure recevant les capteurs, le LVL, au regard des exigences relatives au fonctionnement des sismomètres du VBB.

Partie 1.1 : Choix d'un système de mise à niveau

Dans un premier temps, le questionnaire proposait au candidat de valider les performances de mise à niveau du dispositif LVL en regard des exigences des sismomètres avec une modélisation géométrique et un calcul de rapport de réduction.

La quasi-totalité des candidats a traité cette partie, seule la moitié des candidats a correctement mené cette étude fournissant des résultats justes. Les candidats ont étayé leur raisonnement à l'aide d'un schéma pour la première question ce qui a été apprécié du jury. Les erreurs émanent pour partie de l'analyse incorrecte de la configuration géométrique du LVL sur sol incliné et de l'interprétation erronée du schéma cinématique de l'actionneur linéaire.

Partie 1.2 : Réalisation des pieds télescopiques

Dans un second temps, il était proposé au candidat de modéliser et justifier l'architecture de la liaison entre les deux parties du pied télescopique. Il s'agissait d'analyser au préalable la liaison contact ponctuel entre deux éléments, un roulement et le tube, et d'en déduire par une méthode statique ou cinématique la liaison équivalente formée avec ces liaisons ponctuelles en parallèle et son degré d'hyperstatisme.

Une grande partie des candidats a été capable de mobiliser les connaissances sur l'équivalence des liaisons, malheureusement un trop grand nombre d'entre eux n'a pas été capable de les mettre en application sur le cas réel. De même la formule d'hyperstatisme a été énoncée avec justesse mais beaucoup de candidats n'ont pas réussi à la mettre en œuvre sur la liaison équivalente. Par ailleurs, quelques candidats n'ont pas analysé la configuration des roulements sur le pied télescopique et nous ont délivré un cours sur le montage de roulements sans lien avec la problématique abordée dans cette partie.

Partie 1.3 : Fonction de transfert du LVL

Enfin le candidat était amené à modéliser le comportement dynamique de la structure LVL composée d'un anneau et des trois pieds télescopiques supposés rigides et liés à l'anneau par des liaisons élastiques.

Le candidat devait valider sa conception comme lien rigide entre les capteurs et le sol pour transmettre les ondes sismiques de façon intacte sur la bande de fréquence d'intérêt pour le VBB. La sous-partie était structurée de façon à l'amener à justifier la modélisation de solide rigide d'un pied télescopique dans le cadre dynamique.

Le principe fondamental de la dynamique a été bien énoncé dans l'ensemble. Par contre, très peu de candidats ont mené la modélisation dynamique avec rigueur en considérant toutes les données du problème, comme les mouvements définis par rapport à la configuration au repos, et en modélisant correctement les actions mécaniques des liaisons élastiques. Le candidat n'a pas été pénalisé lorsqu'il faisait apparaître le poids dans son bilan logiquement déjà pris en compte dans la configuration au repos.

La fonction du système LVL comme lien rigide est qualifiée avec le gain de la fonction de transfert qui doit valoir 1 sur la plage de fréquence de fonctionnement des capteurs. Ainsi le jury attendait une fonction objectif énoncée en terme de première fréquence propre devant être supérieure à 50 Hz et une masse faible pour le transport jusque sur Mars. À cette question, la très grande majorité des candidats a répondu avec un indice de performance convenu mais sans faire le lien avec la problématique. Pour ce qui concerne l'analyse des modes propres d'un pied, un seul candidat a correctement interprété les résultats pour justifier sa modélisation en solide rigide dans la modélisation dynamique de la structure.

Partie 2

L'objectif de cette partie est de valider le comportement général du sismomètre VBB conformément aux exigences du robot SEIS.

Partie 2.1 : Modélisation de la liaison pivot du pendule avec le LVL

Dans cette sous-partie, il était proposé au candidat de caractériser la liaison entre le pendule et le LVL afin de déterminer sa raideur à l'aide d'une modélisation poutre des lamelles flexibles constituant la liaison.

Cette partie a été globalement bien traitée. Quelques candidats semblent avoir été surpris par une unité qui leur apparaissait inappropriée (Nm/rad). Il est rappelé aux candidats qu'une lecture attentive du sujet est nécessaire pour bien analyser ce qui est demandé.

Partie 2.2 : Caractérisation de la raideur du ressort lamellaire

L'objectif de cette sous-partie était de caractériser la raideur de la liaison pivot en présence du ressort lamellaire avec une modélisation éléments finis de poutre.

Le questionnement portait sur la méthode des éléments finis et sur l'interprétation des résultats du calcul éléments finis afin d'en déduire la raideur en rotation de la liaison. Très peu de candidats ont abordé cette sous-partie, quelques-uns seulement ont exposé rigoureusement la méthodologie et deux ont correctement caractériser la raideur demandée. La détermination de la raideur de la liaison pivot due au ressort exigeait de comprendre quelle raideur était demandée et d'extraire le déplacement *ad hoc* issu du calcul éléments finis.

Partie 2.3 : Etude du comportement dynamique du pendule inversé

Après avoir caractérisé les raideurs de liaison, le candidat devait effectuer une étude dynamique d'un des trois capteurs pendules inversés du VBB et de vérifier les performances vis-à-vis des exigences du sismomètre. Cette sous-partie a conduit à de mauvaises performances pour une majorité des candidats. Trop de candidats n'ont pas pris en compte le mouvement de translation du support S1 considérant ainsi le point O fixe. Un seul candidat a donné une interprétation précise du gain en lien avec le pendule inversé, deux candidats seulement ont donné les bonnes valeurs de la question 31.

La modélisation dynamique classique d'un système de solides se révèle malheureusement insuffisamment maîtrisée pour de nombreux candidats alors qu'il s'agit d'une compétence centrale et indispensable en ingénierie mécanique. Le jury a identifié des difficultés à la fois dans le calcul de moments de force et de moments dynamiques et dans l'application du Principe Fondamental de la Dynamique. Le jury recommande aux candidats de travailler cette partie du programme de l'agrégation.

Partie 2.4 : Modélisation par schéma-bloc du comportement du sismomètre VBB

L'objectif de cette sous-partie était de régler la commande du dispositif de contre-réaction du sismomètre VBB à l'aide d'une modélisation par schéma-bloc afin de vérifier l'exigence 1.3 relative à la capacité de mesure du VBB.

Cette sous-partie, abordée par la très grande majorité des candidats, a conduit à de bonnes performances pour une majorité. Les critères de stabilité sont cependant moins maîtrisés.

La représentation structurelle classique d'un asservissement pouvant être enseignée à différents niveaux (cycle terminal du lycée, STS, CPGE...), le jury recommande aux candidats de ne pas négliger cette partie du programme.

Partie 3

Partie 2.1 : Estimation du bruit de mesure

Le questionnement de cette sous-partie proposait au candidat de quantifier l'influence des orientations des capteurs sur le bruit de mesure associé à l'accélération verticale recomposée à partir des mesures des trois capteurs. Les candidats ayant abordé la question, moins du quart, ont la plupart du temps inversé le repère de définition et le repère de projection conduisant à une mauvaise conclusion sur les directions optimales des axes de sensibilité des capteurs.

Partie 2.2 : Conclusion

La dernière question invitait le candidat à conclure sur la validation de la structure retenue pour le sismomètre large bande VBB. Peu de réponses démontrent une appropriation correcte de la problématique. En effet, beaucoup de candidats ont conclu avec une réponse générale sans prendre appui sur les résultats scientifiques qu'avait apporté l'enchaînement des questions.

Commentaires généraux

Le jury encourage de nouveau les candidats à s'intéresser à toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble des différentes méthodes de modélisation nécessaire à la résolution de problématique en sciences industrielles de l'ingénieur. Ainsi, le jury apprécie les copies où les candidats tentent de répondre à la globalité du sujet. De nombreuses questions sont indépendantes et il est souvent possible de conclure malgré des résultats intermédiaires manquants.

Le jury apprécie les copies des candidats qui justifient, ou même simplement expliquent, les démarches adoptées pour répondre aux questions posées. Le jury attend pour cette épreuve que les candidats fassent preuve de rigueur et de précision dans les réponses aux questions d'analyse des modèles et dans la démarche de mise en données des problèmes.

De façon complémentaire, la rigueur scientifique et la maîtrise des outils mathématiques usuels nécessaires aux sciences industrielles de l'ingénieur sont des prérequis indispensables.

4. Conclusion

Le sujet avait pour objectif de permettre aux candidats d'exprimer au mieux leur potentiel et de montrer leur expertise dans la modélisation et la mise en données d'un problème de mécanique. Le spectre des compétences mobilisées était assez large et, pour une partie significative, relativement classique pour une épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation de l'agrégation externe.

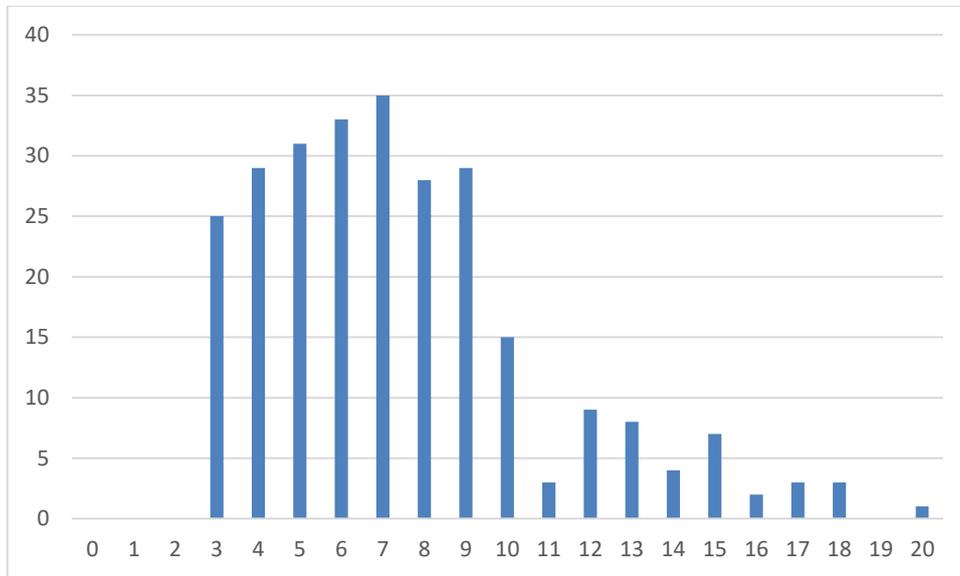
Le jury invite vivement les candidats à se préparer avec sérieux et rigueur et à s'inscrire dans les dispositifs de formation ou de préparation qui leur sont mis à disposition.

5. Résultats

266 copies ont été évaluées. La moyenne des notes obtenues est de 8/20, avec un écart-type de 3,5/20 avec :

- 20/20 comme meilleure note ;
- 3,1/20 comme note la plus basse.

Histogramme des notes



Éléments de correction de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

Présentation de l'épreuve

Arrêté du 28 décembre 2009 modifié

- Durée totale de l'épreuve : 6 heures
- Coefficient 1

L'épreuve est spécifique à l'option choisie.

À partir d'un dossier technique comportant les éléments nécessaires à l'étude, l'épreuve a pour objectif de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour proposer ou justifier des solutions de conception et d'industrialisation d'un système technique dans le domaine de la spécialité du concours dans l'option choisie.

Sujet

Le sujet est disponible en téléchargement sur le site du ministère à l'adresse :

https://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/agregation_externer/01/1/s2021_agreg_externer_sii_mecanique_3_1390011.pdf.

Éléments de correction

Q1 : Cas 1 :

Dans le triangle IAC on obtient $x = \frac{L}{\tan(\delta_1)}$ puis dans le triangle EGI par Pythagore on détermine :

$$R_1 = \sqrt{\frac{L^2}{4} + \left(\frac{L}{\tan(\delta_1)} - \frac{V}{2}\right)^2}$$

Q2 : Pour les cas 2 et 3 seuls les signes de l'angle δ_3 changent.

Cas 2 : $\delta_3 > 0$ et cas 3 : $\delta_3 < 0$

$$R_2 = R_3 = \sqrt{\left(\frac{V}{2} - \frac{L}{\tan(\delta_3) - \tan(\delta_1)}\right)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L \tan(\delta_1)}{\tan(\delta_3) - \tan(\delta_1)}\right)^2}$$

L'application numérique donne : $R_1 = 4305$ mm, $R_2 = 3780$ mm et $R_3 = 4958$ mm

Pour le cas n°2 la variation de rayon est de $\frac{-4305 + 3780}{4305}$ soit -12% de rayon de courbure. On a un gain de maniabilité.

Pour le cas n°3 la variation de rayon est de $\frac{-4305 + 4958}{4305}$ soit +15% de rayon de courbure. On a un gain de stabilité.

Q3 : On constate deux phases :

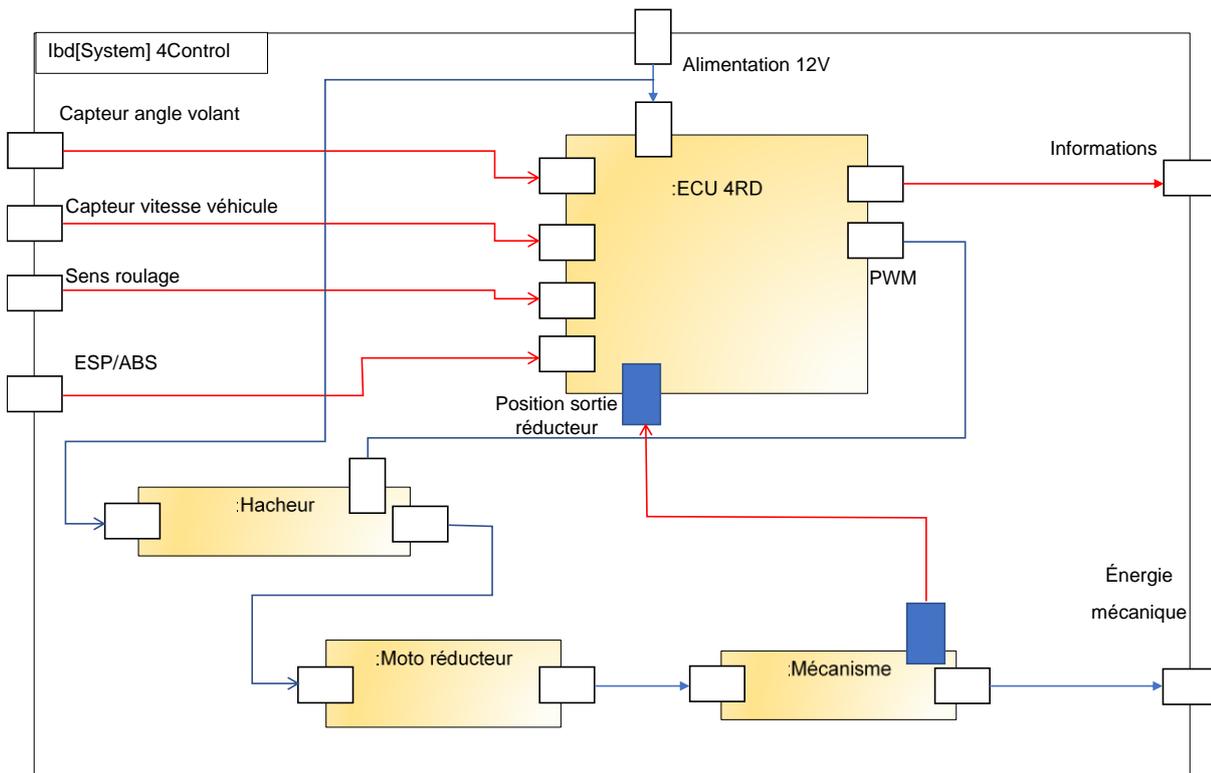
- Phase transitoire pour $t \in [0, 1s ; 0,22s]$

L'accélération transversale se stabilise en 0,1s pour le véhicule 4RD et en 0,35s pour le véhicule 2RD soit plus de 50% de réduction de la phase transitoire. L'exigence est vérifiée.

- Phase stabilisée pour $t \in [0,22s ; 1s]$

La vitesse de lacet diminue en phase stabilisée pour le véhicule 4RD d'environ 40% et l'angle de dérive pour le véhicule 4RD tend vers 0 sans toutefois respecter les exigences du cahier des charges (diminution de 50% et vitesse de lacet nulle) Toutefois le système montre une nette amélioration du comportement pour se rapprocher de l'exigence Id1.2. Les courbes de simulation utilisent un modèle de comportement linéaire qui peut expliquer l'écart entre la simulation et le comportement réel souhaité.

Q4 : diagramme IBD



Q5 : comparaison des solutions

Critères	Solution 1	Solution 2
Encombrement	+	-
Simplicité de la commande	-	+
Performances dynamique	-	+
Adaptation sur le train arrière existant	-	+
Coût global	-	+

La solution retenue permet d'obtenir satisfaction des exigences à moindre coût. La baisse de performance sera faible par rapport au système à deux actionneurs.

Q6 : PFD

On isole le véhicule en mouvement par rapport au référentiel Ra Galiléen.

On écrit le théorème de la résultante dynamique en projection suivant \vec{j}_v :

$$F_{y_1} + F_{y_2} = m \cdot \overline{A_{O_v, \text{véhicule}/Ra}} \cdot \vec{j}_v \text{ avec } \overline{A_{O_v, \text{véhicule}/Ra}} \cdot \vec{j} = \gamma_y$$

$$F_{y_1} + F_{y_2} = m \cdot \gamma_y \Rightarrow \gamma_y = \frac{F_{y_1} + F_{y_2}}{m}$$

On écrit le théorème du moment dynamique en projection suivant (O_v, \vec{k}) :

$$I_z \cdot \ddot{\Psi} = (\overline{O_v W_1} \wedge \overline{R_{sol \rightarrow R1}}) \cdot \vec{k} + (\overline{O_v W_2} \wedge \overline{R_{sol \rightarrow R2}}) \cdot \vec{k}$$

$$I_z \cdot \ddot{\Psi} = (L_1 \vec{i}_v \wedge (F_{x1} \vec{i}_v + F_{y1} \vec{j}_v + F_{z1} \vec{k})) \cdot \vec{k} + (L_2 \vec{i}_v \wedge (F_{x2} \vec{i}_v + F_{y2} \vec{j}_v + F_{z2} \vec{k})) \cdot \vec{k}$$

$$I_z \cdot \ddot{\Psi} = L_1 \cdot F_{y1} - L_2 \cdot F_{y2}$$

Q7 :

On a $\overrightarrow{A_{Ov,véhicule/Ra}} \cdot \vec{j} = \gamma_y$ avec $\overrightarrow{A_{Ov,véhicule/Ra}} = \left[\frac{d}{dt} \cdot \overrightarrow{V_{Ov,véhicule/Ra}} \right]_{Ra}$

Avec $\overrightarrow{V_{Ov,véhicule/Ra}} = V \cos \beta \vec{i}_v + V \sin \beta \vec{j}_v$ d'où $\overrightarrow{A_{Ov,véhicule/Ra}} = -V \dot{\beta} \sin \beta \vec{i}_v + V \dot{\beta} \cos \beta \vec{j}_v + V \cos \beta \dot{\psi} \vec{j}_v + V \sin \beta \dot{\psi} \vec{i}_v$

$\gamma_y = \overrightarrow{A_{Ov,véhicule/Ra}} \cdot \vec{j} = V \dot{\beta} \cos \beta + V \cos \beta \dot{\psi}$ soit en linéarisant : $\boxed{\gamma_y = V(\dot{\psi} + \dot{\beta})}$

Q8 :

La question 6 a permis de déterminer la relation suivante : $\gamma_y = \frac{F_{y1} + F_{y2}}{m}$

En combinant avec les résultats des questions précédentes avec les données de l'énoncé on obtient :

$$V(\dot{\psi} + \dot{\beta}) = -\frac{1}{m}(D_1 \alpha_1 + D_2 \alpha_2) \rightarrow V(\dot{\psi} + \dot{\beta}) = -\frac{1}{m} \left(D_1 (\beta - \delta_1 + \frac{L_1}{V} \dot{\psi}) + D_2 (\beta - \frac{L_2}{V} \dot{\psi}) \right)$$

$$V \dot{\beta} + \frac{D_1 + D_2}{m} \beta + \dot{\psi} \left(V + \frac{L_1 D_1 - L_2 D_2}{mV} \right) = \frac{D_1}{m} \delta_1 \rightarrow mV \dot{\beta} + (D_1 + D_2) \beta + \dot{\psi} \left(mV + \frac{L_1 D_1 - L_2 D_2}{V} \right) = D_1 \delta_1$$

On obtient donc : $\boxed{H_1 = mV ; H_2 = D_1 + D_2 ; H_3 = mV + \frac{L_1 D_1 - L_2 D_2}{V}}$

L'équation $I_z \cdot \ddot{\Psi} = L_1 \cdot F_{y1} - L_2 \cdot F_{y2}$ obtenue à la question 6 devient quant à elle :

$$I_z \cdot \ddot{\Psi} = -L_1 D_1 (\beta - \delta_1 + \frac{L_1}{V} \dot{\psi}) + L_2 D_2 (\beta - \frac{L_2}{V} \dot{\psi}) \rightarrow I_z \cdot \ddot{\Psi} = (-L_1 D_1 + L_2 D_2) \beta - (D_1 L_1^2 + D_2 L_2^2) \frac{\dot{\psi}}{V} + \delta_1 L_1 D_1$$

On obtient donc : $\boxed{H_4 = L_2 D_2 - L_1 D_1 ; H_5 = -(D_1 L_1^2 + D_2 L_2^2) \text{ et } H_6 = L_1 D_1}$

Q9 : Dans le cas d'un mouvement circulaire de rayon R on a $V = R\dot{\psi}$ et $\beta = \frac{\pi}{2}$ ce qui implique $\dot{\beta} = 0$

En reprenant le résultat de la question 7, $\gamma_y = V(\dot{\psi} + \dot{\beta})$ on obtient : $\gamma_y \approx V\dot{\psi}$ d'où $\boxed{\gamma_y = \frac{V^2}{R}}$

L'équation $mV \dot{\beta} + (D_1 + D_2) \beta + \dot{\psi} \left(mV + \frac{L_1 D_1 - L_2 D_2}{V} \right) = D_1 \delta_1$ de la question précédente devient

$$0 + (D_1 + D_2) \beta + \frac{V}{R} \left(mV + \frac{L_1 D_1 - L_2 D_2}{V} \right) = D_1 \delta_1 \text{ soit } (D_1 + D_2) \beta + \frac{1}{R} (mV^2 + L_1 D_1 - L_2 D_2) = D_1 \delta_1$$

$I_z \cdot \ddot{\Psi} = (-L_1 D_1 + L_2 D_2) \beta - (D_1 L_1^2 + D_2 L_2^2) \frac{\dot{\psi}}{V} + \delta_1 L_1 D_1$ devient quant à elle

$$I_z \cdot \ddot{\Psi} = (-L_1 D_1 + L_2 D_2) \beta - (D_1 L_1^2 + D_2 L_2^2) \frac{1}{R} + \delta_1 L_1 D_1$$

En supposant le mouvement uniforme, $\dot{\psi}$ est constant donc $\ddot{\psi} = 0$

On obtient alors : $\delta_1 L_1 D_1 = (L_1 D_1 - L_2 D_2) \beta + (D_1 L_1^2 + D_2 L_2^2) \frac{1}{R}$

Q10 D'après l'énoncé, on a $\delta_1 = \frac{L_1 + L_2}{R} - \frac{mV^2}{R(L_1 + L_2)} \left[\frac{D_2 L_2 - D_1 L_1}{D_1 D_2} \right]$ et on pose $K = \frac{m(D_2 L_2 - D_1 L_1)}{D_1 D_2 (L_1 + L_2)^2}$

On obtient donc : $\delta_1 = \frac{L_1 + L_2}{R} - K \frac{V^2}{R} (L_1 + L_2)$ ce qui correspond à l'expression demandée.

Q11 D'après les expressions de α_1 et α_2 données dans l'énoncé $\alpha_1 \approx \beta - \delta_1 + \frac{L_1}{V} \dot{\psi}$ et $\alpha_2 \approx \beta - \frac{L_2}{V} \dot{\psi}$ on a :

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \beta - \delta_1 + \frac{L_1}{V} \dot{\psi} - \left(\beta - \frac{L_2}{V} \dot{\psi} \right) \text{ avec } V = R\dot{\psi} \text{ d'où } \delta_1 = \frac{L_1 + L_2}{R} - (\alpha_1 - \alpha_2)$$

On en déduit par identification : $\boxed{(\alpha_1 - \alpha_2) = K \gamma_y (L_1 + L_2)}$

Q19

On applique le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble E en mouvement composé de la tige de l'actionneur (1) et de la vis de commande (2)

Energie cinétique : dans son mouvement par rapport à (R₀)

$$T_{E/R_0} = T_{1/R_0} + T_{2/R_0} = \frac{1}{2} I_{vis} \cdot \dot{\theta}_{20}^2 + \frac{1}{2} m_{ch} \dot{x}^2 \text{ avec } \dot{x} = \frac{pas}{2\pi} \dot{\theta}_{20}$$

$$\text{D'où } T_{E/R_0} = \frac{1}{2} I_{vis} \cdot \dot{\theta}_{20}^2 + \frac{1}{2} m_{ch} \cdot \left(\frac{pas}{2\pi} \dot{\theta}_{20} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \dot{\theta}_{20}^2 \left(I_{vis} + m_{ch} \cdot \left(\frac{pas}{2\pi} \right)^2 \right)$$

Bilan des puissances :

Liaisons parfaites → P_{intérieures} = 0

Pesanteur → P_{pesanteur} = 0 car le poids ne travaille pas dans la position considérée.

Puissances extérieures : P_{moteur} = C_m · θ̇₂₀

$$P_{F_{pal \rightarrow tige}} = \overrightarrow{F_{pal \rightarrow tige}} \cdot \dot{\vec{x}} = -F_{pal \rightarrow tige} \cdot \dot{x} = -F_{pal \rightarrow tige} \cdot \dot{\theta} \frac{pas}{2\pi}$$

Le théorème de l'énergie cinétique appliqué à l'ensemble E donne :

$$\frac{dT_{E/R_0}}{dt} = P_{moteur} \text{ soit}$$

$$C_m - F_{pal \rightarrow tige} \cdot \frac{pas}{2\pi} = \ddot{\theta}_{20} \left(I_{vis} + m_{ch} \cdot \left(\frac{pas}{2\pi} \right)^2 \right) \Rightarrow C_m = \frac{2\pi}{pas} \ddot{x} \left(I_{vis} + m_{ch} \cdot \left(\frac{pas}{2\pi} \right)^2 \right) + F_{pal \rightarrow tige} \cdot \frac{pas}{2\pi}$$

$$\text{D'où } C_m = \ddot{x} \left(\frac{2\pi}{pas} I_{vis} + m_{ch} \cdot \frac{pas}{2\pi} \right) + F_{pal \rightarrow tige} \cdot \frac{pas}{2\pi}$$

C_m est minimal lorsque la dérivée /au pas s'annule pour une accélération imposée

En dérivant cette expression par rapport au pas :

$$\frac{dC_m}{d_{pas}} = \ddot{x} \left(\frac{m_{ch}}{2\pi} - \frac{2\pi I_{vis}}{pas^2} \right) + \frac{F_{pal \rightarrow tige}}{2\pi}$$

$$\text{Cette dérivée s'annule pour } \frac{dC_m}{d_{pas}} = 0 \Rightarrow \ddot{x} \frac{m_{ch}}{2\pi} + \frac{F_{pal \rightarrow tige}}{2\pi} = \ddot{x} \frac{2\pi I_{vis}}{pas^2}$$

On trouve le $\boxed{pas = 2\pi \sqrt{\frac{\ddot{x} \cdot I_{vis}}{\ddot{x} \cdot m_{ch} + F_{pal \rightarrow tige}}}}$ cela correspond bien à un minimum car :

Si pas < 2π √(ẍ · I_{vis} / (ẍ · m_{ch} + F_{pal→tige})) on a dC_m/d_{pas} < 0 donc la courbe est décroissante

Si pas > 2π √(ẍ · I_{vis} / (ẍ · m_{ch} + F_{pal→tige})) on a dC_m/d_{pas} > 0 donc la courbe est croissante

Q 20. On calcule l'accélération du chariot

$$x = \frac{1}{2} at^2 \Rightarrow a = \frac{2x}{t^2} \Rightarrow a = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{(0,05)^2} = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{On a trouvé à la question précédente ; } pas = 2\pi \sqrt{\frac{\ddot{x} \cdot I_{vis}}{\ddot{x} \cdot m_{ch} + F_{pal \rightarrow tige}}} \rightarrow pas = 2\pi \sqrt{\frac{8 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 40 + 400}}$$

$$pas = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Le pas optimal est donc égal à environ 2mm.

On peut calculer le couple moteur :

$$C_m = \ddot{x} \left(\frac{2\pi}{pas} I_{vis} + m_{ch} \cdot \frac{pas}{2\pi} \right) + F_{pal \rightarrow tige} \cdot \frac{pas}{2\pi} \quad C_m = 8 \left(\frac{2\pi}{0,0015} 5 \cdot 10^{-6} + 40 \cdot \frac{0,0015}{2\pi} \right) + 400 \frac{0,0015}{2\pi}$$

$$C_m = 0,34 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Calcul de la vitesse de rotation en sortie moteur

$$V_{max} = at \rightarrow V_{max} = 40 \cdot 0,05 = 2 \text{ m/s}$$

$$\rightarrow \dot{\theta} = V_{max} \frac{2\pi}{pas} = \pi \text{ rad/s} \sim 8373 \text{ tr/min}$$

Le moteur 12V à un couple de 2 N·m > au 0,34 demandé, la vitesse de rotation sera un peu plus faible que celle attendue de l'ordre de 10%.

Q21 : Calcul de β et des composantes de F

$$\tan\beta = \frac{L_2 \sin\beta}{(L_1 + L_2 \cos\alpha + L_3)} \quad \beta = 0,07 \text{ rad} \quad \vec{F} = \begin{pmatrix} -F \cos\beta \\ F \sin\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -997 \text{ N} \\ 73 \text{ N} \end{pmatrix}$$

Q22 : Actions mécaniques de cohésion

Tronçon	Effort normal N	Effort tranchant	Moment de flexion
(AB)	$-F \cos\beta$	$F \sin\beta$	$-F \sin\beta x'$
(BC)	$-F \cos(\alpha - \beta)$	$-F \sin(\alpha - \beta)$	$Ax' + b$
(CD)	$-F \cos\beta$	$F \sin\beta$	$+F \sin\beta(L - x')$

Continuité du moment fléchissant en $x' = L_1$ et L_2

$$aL_1 + b = -F \sin\beta L_1$$

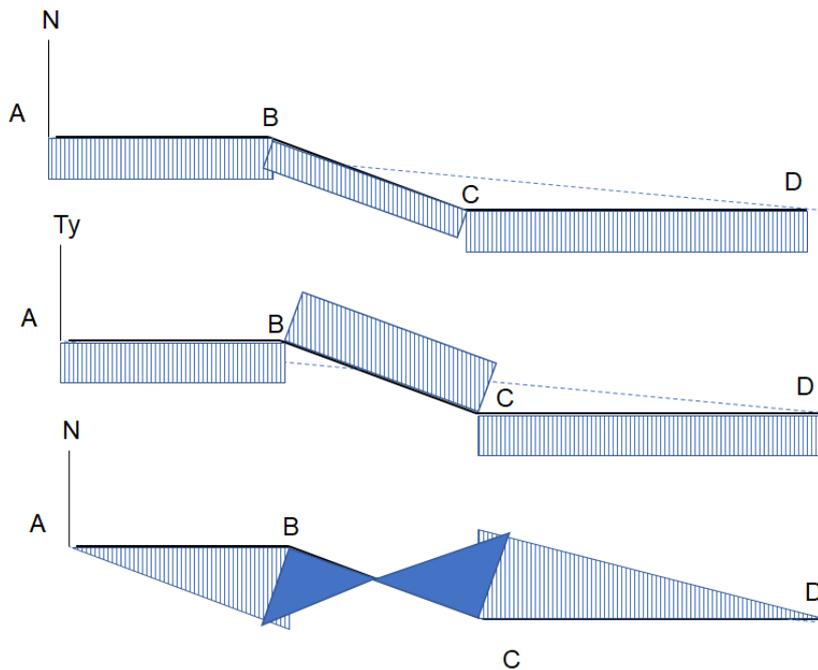
$$aL_2 + b = +F \sin\beta L_3$$

d'où

$$a = F \sin\beta \frac{L_3 + L_1}{L_2 - L_1}$$

$$b = -F \sin\beta L_1 - aL_1$$

Diagrammes



Q 23 : Contrainte maximale

Section la plus sollicitée en C : Mf max et N max

$$\sigma_{max} = \left| \frac{M_{fmax}}{\frac{I}{v}} \right| + \left| \frac{N}{S} \right|$$

AN :

$$\sigma_{max} = 39 \text{ MPa} + 7 \text{ MPa} = 46 \text{ MPa}$$

Si on considérait la poutre droite, la contrainte maximale vaudrait 7 MPa (soit environ 6 fois moins)

Q24 : Analyse des conditions limites du modèle EF

Les conditions limites sont conformes à la géométrie mais créent une liaison pivot en A au lieu de la rotule du modèle RdM. Donc les modèles différent et la structure modélisée en EF est plus rigide. On retiendra la modélisation RdM qui est plus conservative.

Q25 : Différence entre les résultats EF et RdM

Contrainte de Von Mises max en C : 22 MPa

Contrainte normale en C : 24.8 MPa

Nettement plus faible que celle du modèle RdM 46 MPa

Différence : Modèle RdM plus technologique (centrage court)

Modèle EF tient compte des concentrations de contraintes en C

Q26 : Flambage analytique

Cas 3 : $F_c = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$ AN : $F_c = 36600 \text{ N}$

Q27 : Flambage EF

Facteur de chargement 37

$F_c = 37000 \text{ N}$ Ecart relatif 1.09%

On note très peu d'écart car la bielle flambe dans le plan normal aux axes des pivots, et se trouve bi-articulée dans les deux modèles.

Q28 : La ruine est statique, la marge de sécurité issue du calcul RdM vaut 5 (ce qui est très inférieur à la marge de sécurité au flambage qui vaut 37)

Q29 : L'hypothèse d'épaisseur faible devant les diamètres permet de linéariser en fonction de l'épaisseur la section S et le moment d'inertie I :

$$S \sim \pi e D_{moy} \quad , \quad I = \pi \frac{D_{moy}^3 e}{8}$$

Ceci amène aux indices $\frac{\sigma_e}{\rho}$ pour la masse mini à résistance donnée et $\frac{E}{\rho}$ pour : la masse mini à résistance au flambage donnée. Diagrammes 2 et 4

Q30 : Le critère dimensionnant étant la résistance statique, l'indice est $\frac{\sigma_e}{\rho}$ sur le digramme 2

Cet indice vaut 0,5 pour le CFRP et 0,1 pour l'acier faiblement allié : Donc un rapport 5.

Une biellette en composites carbone qui supporte le même chargement que celle en acier sera 5 fois plus légère.

Q31 :

	CFRP	Acier faiblement allié	Ecart relatif
€/m ³	60000	5000	
Kg CO ₂ / m ³	60000	20000	
Coût en €	8	0,7	Env 1000%
Coût en kg CO ₂	8	2,7	Env 300%

La solution en composite est 10 fois plus couteuse et 3 fois plus génératrice de CO₂ sur la phase production primaire du matériau.

Q32 : Ici seule la phase production primaire est prise en compte. Les phases de fabrication, transport, usage et fin de vie ne l'ont pas été.

Q33 : Si l'on fabrique une biellette en carbone pour la sollicitation principale de flexion il faut orienter des fibres principalement dans la direction longitudinale et pour la compression aussi.

Q34 : Modèle de pression sinusoïdale

$$p(M) = a \cos(\theta) + b \quad \begin{cases} p(0) = p_{max} \\ p(\theta_0) = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} b = -a \cos(\theta_0) \\ p(\theta_0) = \frac{p_{max}}{(1 - \cos(\theta_0))} \end{cases}$$

$$p(M) = \frac{p_{max}}{1 - \cos(\theta_0)} (\cos(\theta) - \cos(\theta_0))$$

Q35 :

$$F_y = \iint_S p(M) dS \quad F_y = \frac{DL p_{max}}{4(1 - \cos(\theta_0))} (2\theta_0 - \sin(2\theta_0))$$

Q36 :

Application numérique : $\theta_0 = 1.05 \text{ rd}$

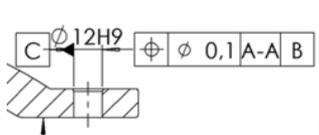
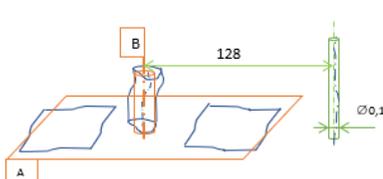
$$p_{max} = 3.25 \text{ MPa} > 3 \text{ MPa}$$

Q37 : Coussinet Glycodur

P= 2.22 MPa

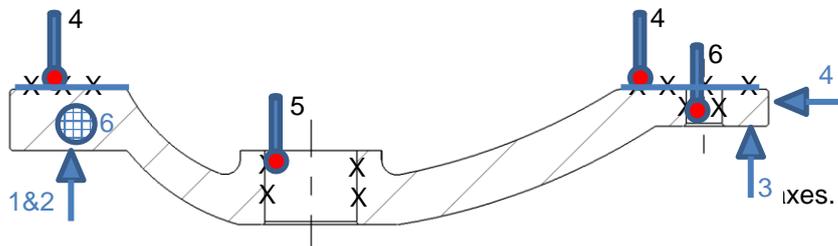
Préférer la solution indirecte car elle génère plus de sécurité. (et elle est plus adaptée pour le glissement)

Q38

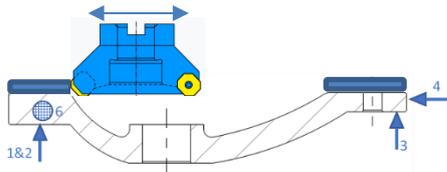
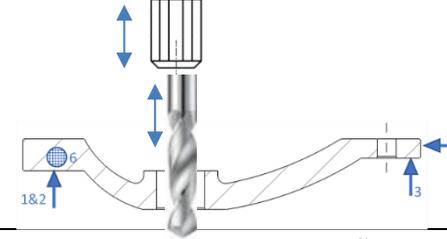
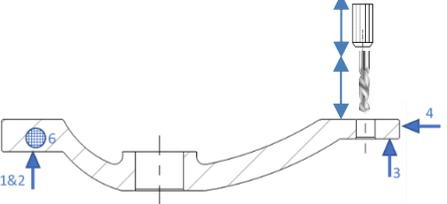
Fiche GPS no	1	Éléments non idéaux	Éléments idéaux
Spécification	Pièce : zone GPS	Éléments de référence	Références spécifiées :
Type :	orientation, forme, battement, position	A : 2 surfaces réelles réputées planes.	SIMPLE , COMPOSEE ;
Auteur :	Candidat	B : surface réputée cylindrique	SYSTEME
Modèle nominal			A : plan tangent extérieur matière aux deux surfaces réputées planes minimisant les écarts. B : axe du plus grand cylindre tangent extérieur matière contraint perpendiculaire à A
		Élément tolérancé	Zone de tolérance Contrainte : La zone de tolérance est perpendiculaire à A centrée sur un axe à 128mm de B
Skin Model			Objectif : Minimiser la distance minimale cyl B cyl C.
		Caractéristique	Condition
			Le diamètre de la zone de tolérance est de 0,1mm située à 128mm de B perpendiculaire à A

Gamme de contrôle :

1. Mise en position isostatique de la pièce
2. Choix d'un palpeur permettant l'accessibilité à chaque surface
3. Etalonnage sur la sphère de référence.
4. Palpage de 2 fois 5 points des surfaces réputées planes (pl1) et (pl2)
5. Palpage de 8 points pour construire le cylindre 1 (cyl1)
6. Palpage de 8 points pour construire le cylindre 2 (cyl 2)
7. Association des surfaces et vérification des conditions



Phase A

Opérations	Outils	Mise en position
Surfaçage de 1	Fraise carbure à surfacer	
Perçage/Alésage de B	Foret Ø28mm + alésoir Ø30mm	
Perçage/Alésage de C	Foret Ø10mm + alésoir Ø12mm	

Phase B

Opérations	Outils	Mise en position
Surfaçage	Fraise carbure à surfacer	
Chanfreinage	Fraise à chanfreiner	
Perçage des trous oblong	Foret à trou oblong Ø14mm	

Q40



Tirant avec un filet à gauche+un filet à droite avec 2 contres écrous.
 (Remarque : sur cette représentation les rotules sont à 90° de leur position réelle)

Q41

L'étude suit un ordre bien établi qui démarre par une modélisation du comportement de la voiture pour prédéterminer les caractéristiques de conception du véhicule d'un point de vue dynamique, commande système, dimensionnement mécanique, conception et étude de réalisation. La conception technologique doit se baser sur des modèles scientifiques de dimensionnement définis dans les premières parties de l'étude. Les études de conception et de fabrication ne peuvent se faire qu'après la définition d'un modèle de calcul issu d'une modélisation. Les essais réels viendront caractériser les écarts entre le réel et le modèle.

Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

Cette épreuve est d'une durée de 6 heures, coefficient 1. Elle a pour objectif de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour proposer ou justifier des solutions de conception et d'industrialisation d'un système pluritechnologique dans le cadre de l'option sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique.

1. Présentation du sujet

Ce sujet permettait de justifier et de valider les différents choix technologiques réalisés par la société Renault pour concevoir un véhicule à quatre roues directrices. Le système, appelé 4Control est conçu pour s'adapter à plusieurs véhicules de la gamme du constructeur.



Vue d'ensemble du système étudié

2. Analyse globale des résultats

L'objectif de la première partie était de valider l'intérêt pour le constructeur de lancer l'étude du produit du point de vue cinématique et dynamique. Pour cela, il était nécessaire de déterminer les rayons de courbure des différentes configurations proposées puis d'analyser des courbes issues de la littérature de recherche pour valider l'étude. Cette partie débouchait sur l'énoncé de la problématique industrielle développée dans le sujet. Cette partie a été abordée par 90% des candidats.

Les deux parties suivantes consistaient à analyser l'implantation du système dans son environnement géométrique mais aussi du point de vue des échanges informationnels entre les différents composants du véhicule. Ces études débouchaient sur un choix d'architecture à partir de critères à préciser. Ces parties, très abordables, ont été abordées par 90% des candidats.

La quatrième partie permettait de définir un modèle de comportement mécanique du véhicule nécessaire à la détermination des paramètres de commande de braquage des roues par analyse du comportement dynamique simulé. Le modèle « bicyclette » à deux roues directrices était à développer. Les résultats du modèle à quatre roues directrices étaient donnés aux candidats sous forme de courbes.

Cette étude, à partir du modèle de connaissance, mais aussi de résultats expérimentaux, permettait d'obtenir les caractéristiques mécaniques et comportementales de l'actionneur utilisé dans le système permettant ainsi de valider la motorisation. Cette partie a globalement été abordée par 60% des candidats.

L'objectif de la cinquième partie était de dimensionner les biellettes de direction de la timonerie. Deux études étaient proposées :

La première, permettait de comparer les résultats basés sur un modèle poutre à une analyse par éléments finis. Cette étude débouchait sur une analyse argumentée des écarts.

La deuxième, basée sur la théorie du flambage, permettait de comparer un modèle analytique à un modèle par éléments finis. Cette étude débouchait sur une analyse des conditions au limites.

L'ensemble de ces deux études permettait de déterminer le mode de ruine.

La suite de cette partie permettait de faire un choix de matériaux dans une démarche de développement durable en limitant l'impact du produit sur une étape de son cycle de vie. Cette partie a été abordée par 40% des candidats mais traité entièrement par seulement 30%.

La sixième partie permettait l'étude de la pré-industrialisation d'un des composants du système. L'analyse d'une spécification débouchait sur une gamme de contrôle puis sur une proposition de gamme de fabrication en lien avec les spécifications. Cette partie a été traitée par seulement 30% des candidats alors que le taux de réussite a approché les 90%.

La septième partie était axée sur la re-conception du réglage de parallélisme des roues arrière. Cette partie a été traitée par 30% des candidats.

Le sujet se terminait par une synthèse sur les différentes phases d'étude permettant de répondre à la problématique industrielle. Cette partie a été abordée par 20% des candidats avec un taux de réussite de 90%. Une grande majorité des candidats ont abordé toutes les parties du sujet et toutes les questions ont été correctement traitées par plusieurs candidats.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie 1 : Analyse du système et définition de la problématique. (Q1 à Q3)

Cette partie n'a pas posé de difficulté particulière aux candidats. Les conclusions issues des calculs demandés ont globalement été bien traitées. Le jury rappelle qu'une conclusion s'appuie sur des résultats chiffrés.

Parties 2 et 3 : Environnement du système et choix géométrique (Q4 à Q5)

La question 4 demandait de compléter l'IBD fourni. Un nombre important de candidats ne maîtrise pas ce formalisme. De nombreux candidats n'envisagent pas d'ajouter des ports entre les composants mais se contentent de compléter les cases vides sans réflexion sur l'environnement du système.

Partie 4 : Élaboration d'un modèle de comportement et détermination d'un paramètre de commande (Q6 à Q20)

Les questions 6 à 11 étaient basées sur l'application du principe fondamental de la dynamique. Le jury rappelle que la rigueur dans l'écriture est importante. Dans un cas simple comme celui traité dans ces questions, une rédaction précise mais concise était attendue.

Pour les questions 12 et 13, il était attendu une analyse rigoureuse et complète des différents cas. Une analyse chiffrée était attendue. La question 14 était une analyse de courbes. Cette analyse débouchait sur une zone de validité du modèle.

La question 15 demandait de passer dans le domaine de Laplace. La plupart des candidats maîtrise ce calcul mais un grand nombre n'a pas été attentif aux paramètres demandés dans le sujet pour l'expression finale attendue.

La question 16 consistait à l'analyse d'un diagramme de Bode et débouchait sur l'obtention du paramètre de commande de l'actionneur.

La question 17 a été globalement mal traitée. Les tracés graphiques étaient imprécis et la course du vérin a été mal définie. De nombreux candidats ont mesuré la distance entre les deux positions du point E alors qu'il fallait mesurer la variation des distances EF.

Les questions 18, 19 et 20 mettaient en œuvre le théorème de l'énergie cinétique. La plupart des candidats ont bien mis en œuvre le théorème. Le jury rappelle qu'un bilan précis des puissances est attendu avec une distinction entre puissances intérieures et extérieures et une justification argumentée des puissances nulles.

Partie 5 : Vérification de la timonerie (Q21 à Q34)

L'objectif des questions 21 à 23 était de déterminer les composantes du torseur des actions mécaniques et l'état de contraintes au sein des biellettes. Un modèle isostatique plan a été choisi en raison des centrages courts aux extrémités de cette structure. Pour ce problème plan, il est préférable de ne pas adopter l'écriture torseurienne mais une écriture scalaire des 3 composantes N, T et M_f . D'autre part, il est judicieux de vérifier la cohérence des efforts intérieurs avec les efforts de liaison. (ex : Moment de flexion nul au niveau d'une liaison rotule)

Les questions 24 et 25 ont été mal traitées par de nombreux candidats, elles nécessitaient de prendre du recul sur les modélisations RdM et EF pour observer leur divergence : le modèle Rdm est technologique et assimile les articulations à des rotules tandis que le modèle EF respectent les géométries au contact et conservent des pivots d'axes contenus dans le plan médian de la biellette : donc les modèles différent et les résultats aussi.

L'étude au flambage (question 26 à 28) a été correctement traitée et les résultats des approches analytique et EF sont en bonne adéquation du fait que le flambage se produit dans un plan orthogonal au plan de la déformée statique. Ceci implique que les liaisons pivots se comportent comme des rotules. Relevons que le facteur de chargement présent sur la figure du résultat du flambage qui donne la marge de sécurité vis-à-vis du flambage n'a pas été reconnu par certains candidats.

La question 28 devait permettre de conclure grâce aux études menées précédemment sur le mode de ruine de la biellette : ici la ruine plastique. Le terme ruine convient mieux que le terme rupture qui ne survient pas immédiatement à la sortie du domaine élastique.

Les questions 29 à 33 relatives au choix de matériau pour la biellette, ont été abordées par la majorité des candidats. Peu d'entre eux ont intégré l'hypothèse paroi mince pour linéariser les expressions des grandeurs globales et amener aux indices adéquats.

Enfin les questions 34 à 37 ont été correctement traités par une majorité de candidats.

Partie 6 : Étude de préindustrialisation

La question 38 relative à une spécification a montré qu'une partie importante de candidats ne maîtrisaient pas les normes en vigueur. La gamme de contrôle de la spécification a été bien traitée par les candidats.

La question 39 relative à une gamme de fabrication a été traitée par un grand nombre de candidats. Le positionnement isostatique et un choix d'outils était attendu par le jury.

Partie 7 : Étude de conception

La question 40 était une étude simple de conception. Certains candidats ont proposé des solutions irréalistes, complexes et non adaptées au produit étudié. Le tracé doit permettre de définir les solutions sans ambiguïtés.

Partie 8 : Synthèse

Cette partie a été peu traitée alors qu'elle ne demandait que de synthétiser l'étude globale du sujet.

4 Conseils aux futurs candidats

Le jury encourage fortement les candidats à traiter toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble des domaines de la spécialité Ingénierie Mécanique. Cette épreuve permet de faire des choix technologiques. Ceux-ci s'appuient sur des critères scientifiques issus de modèles et ne peuvent s'appuyer uniquement sur des savoirs faire. Certains candidats ont choisi de ne traiter que les parties scientifiques, d'autres uniquement les questions technologiques sans faire de lien avec les résultats de modélisation. La note finale se trouve alors fortement limitée.

Le jury constate parfois un manque de rigueur, notamment dans l'écriture des expressions littérales, et de précision dans la présentation des copies et la rédaction. La présentation doit être irréprochable, les notations imposées dans le sujet doivent être scrupuleusement respectées. Les résultats doivent être clairement mis en évidence. Les argumentations des choix technologiques doivent s'appuyer sur des performances chiffrées, en accord avec le cahier des charges du système étudié. Les normes en vigueur ne sont pas toujours connues. Certaines copies ont été exemplaires avec des argumentations claires et concises.

Réussir cette épreuve demande :

- Une lecture attentive du sujet dans son ensemble ;
- Une maîtrise des outils de modélisation de l'ingénierie système ;
- Une maîtrise des modèles de connaissance de tous les domaines de l'ingénierie mécanique ;
- Une culture technologique riche et une connaissance des normes en vigueur.

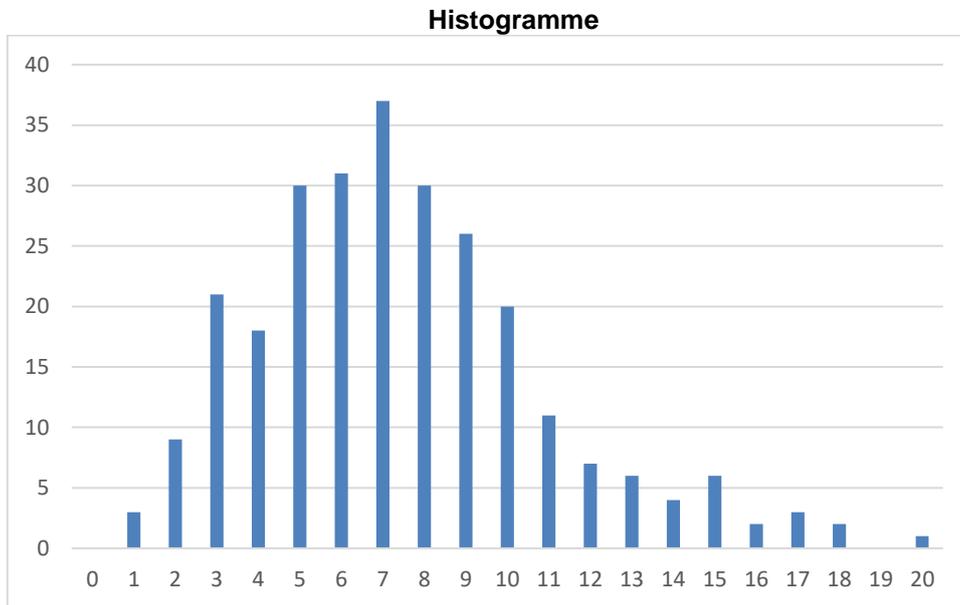
5 Conclusion

Le sujet a été conçu pour permettre aux candidats d'exprimer au mieux leurs compétences dans différents champs d'application d'un système pluritechnologique correspondant au cadre de cette épreuve de conception en ingénierie mécanique. Le choix d'un système industriel innovant, conçu et industrialisé par un grand constructeur, a permis aux candidats de composer sur une problématique industrielle réelle. Le jury rappelle qu'un produit industriel fait appel à des connaissances transversales et que les candidats ne peuvent se limiter à des connaissances mono disciplinaires.

5. Résultats

267 copies ont été évaluées. La moyenne des notes obtenues est de 8/20 et l'écart-type 3,5/20 avec :

- 20/20 comme meilleure note ;
- 1,8/20 comme note la plus basse.



Exemple de sujet pour l'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnologique

Étude d'une monture de télescope

Phase 1 – Conception et organisation d'une séquence de formation à un niveau imposé (durée : 4h00)

Partie 1.1 – Conception de l'architecture de la séquence de formation imposée (0h45)

Objectifs : s'approprier le besoin pédagogique imposé par le jury et concevoir l'architecture de la séquence de formation.

Contexte pédagogique de la séquence de formation imposée

La séquence pédagogique à construire est associée à un des deux contextes pédagogiques suivants, à choisir par le candidat :

	Choix 1	Choix 2
Titre de la séquence	Analyser, modéliser et expérimenter le comportement des systèmes linéaires continus invariants	Modéliser et résoudre pour vérifier les performances statiques des mécanismes
Niveau de formation visé	CPGE – filière scientifique – voie PCSI	
Supports pédagogiques	Les supports suivants sont disponibles dans le laboratoire de Sciences de l'Ingénieur. Ils sont choisis judicieusement pour répondre au besoin pédagogique de la séquence imposée : - télescope asservi Astrolab ; - robot cueilleur de fruits (MaxPid) ; - cordeuse de raquettes ; - drone didactique D2C ; - pilote hydraulique de bateau ; - projecteur de scène motorisé ; - robot holonome ; - gyropode ; - robot humanoïde Darwin.	
Effectif	classe de 48 élèves, groupe à effectif réduit de 24 élèves	
Volume horaire	4 heures hebdomadaires (1 h cours + 1 h TD + 2h TP)	

Les documents suivants sont fournis et accessibles dans le dossier « contexte pédagogique » :

- le programme du niveau de formation visé (fichier *Programme PCSI.pdf*) ;
- une proposition de séquences adaptées au niveau de formation visé (fichier *Progression didactique PCSI-PSI.xlsx*).

Production attendue

Une architecture de séquence pédagogique doit être proposée en s'assurant de la cohérence, de la faisabilité et de la pertinence des choix effectués après avoir :

- contextualisé la séquence pédagogique dans une grande thématique ;
- recensé les compétences à développer et les savoir-faire et savoirs à faire acquérir aux élèves ;
- identifié les prérequis et le positionnement temporel de la séquence dans une progression pédagogique (vis-à-vis de la proposition de liste de séquences fournie) ;
- spécifié les modalités pédagogique et didactique (TP, TD, cours, projet, évaluation, remédiation, ...), leurs coordinations et leurs organisations.

Partie 1.2 – prise en main du support didactisé (durée : 0h30)

Objectif : s'approprier l'environnement et la structure du support didactisé du laboratoire.

Le candidat dispose des éléments suivants :

- un télescope MEADE ETX-90 instrumenté ;
- une carte de commande externe programmable par le logiciel Matlab R2021a permettant de substituer la carte de commande équipant le télescope MEADE ETX-90 ;
- un chronomètre.

Le système présent dans le laboratoire est un télescope instrumenté, pilotable et configurable.

Un dossier technique est fourni sous forme papier et numérique. Il comprend notamment :

- la définition du contexte d'utilisation du télescope ;
- la présentation documentée des principaux constituants du produit (documents constructeurs, ...).

Un logiciel de commande et d'acquisition en mode Autostar (Matlab-Simulink R2021a) installé sur le poste informatique permet, entre autres :

- de piloter le télescope sur les axes d'azimut et d'élévation ;
- de réaliser des simulations numériques de modèles ;
- de réaliser des mesures à l'aide de la carte d'acquisition installée dans le télescope.

L'annexe « Les télescopes optiques terrestres géants » du dossier ressource doit être consultée.

Activité 1 Identifier et caractériser quelques contraintes liées à la phase de construction des infrastructures du télescope E-ELT et à sa phase d'utilisation.

Prendre connaissance de l'annexe « Analyse structurelle partielle du télescope du laboratoire » du dossier technique et du protocole expérimental n°1 fourni dans le dossier ressource.

On se place, pour l'activité suivante, dans le cadre de la phase préliminaire de prépositionnement du tube optique dans l'axe de l'astre à observer.

Activité 2 Mettre en œuvre le protocole expérimental n°1 pour évaluer la vitesse de rotation (en °/s) de l'axe d'azimut du télescope, pour une commande en vitesse maximale. L'écart de vitesse observé est-il compatible vis-à-vis des performances attendues dans cette phase préliminaire de prépositionnement ?

Prendre connaissance de l'annexe « Chaînes d'énergie partielles du télescope » du dossier technique.

Activité 3 À partir de la documentation technique pages 5 et 8, compléter et présenter la chaîne fonctionnelle de l'axe d'azimut du télescope sous forme de chaîne d'énergie et de chaîne d'informations sur le document réponse DR1.

Partie 1.3 – expérimentations pour répondre à la problématique technique et scientifique (durée : 2h00)

Problématique technique et scientifique :

Optimisation de la consommation énergétique d'un télescope et analyse du suivi d'un astre

1.3.1 Étude de la consommation énergétique d'un télescope

1.3.1.1 Mesure de l'énergie consommée par le télescope du laboratoire

Activité 4 Proposer un schéma cinématique du télescope, incluant uniquement les classes d'équivalence cinématique : l'embase (bâti), la fourche et le tube optique.

Prendre connaissance du protocole expérimental n°2 fourni dans le dossier ressource.

Activité 5 Analyser les fonctions des blocs multiplieurs et intégrateurs numériques présents dans le fichier *Astrolab_Acquisition_Energie.slx*.

Activité 6 Piloter le télescope avec la raquette et relever les énergies électriques consommées par les 2 actionneurs ainsi que l'énergie totale consommée par le télescope du laboratoire. Présenter les résultats sous la forme du tableau ci-dessous et conclure quant à la partie la plus énergivore du télescope du laboratoire.

	Consommation globale	Consommation de l'axe d'élévation	Consommation axe de l'azimut
Télescope au repos			
Mouvement axe élévation à vitesse maximale			
Mouvement axe azimut à vitesse maximale			

1.3.1.2 Mise en place d'un modèle énergétique de l'axe d'élévation d'un télescope

La suite de l'étude énergétique se concentre sur l'axe d'élévation (l'axe d'azimut est donc considéré comme fixe). Une modélisation partielle de la chaîne d'énergie de l'axe d'élévation d'un télescope est proposée ci-dessous sous la forme du schéma cinématique fourni figure 1.

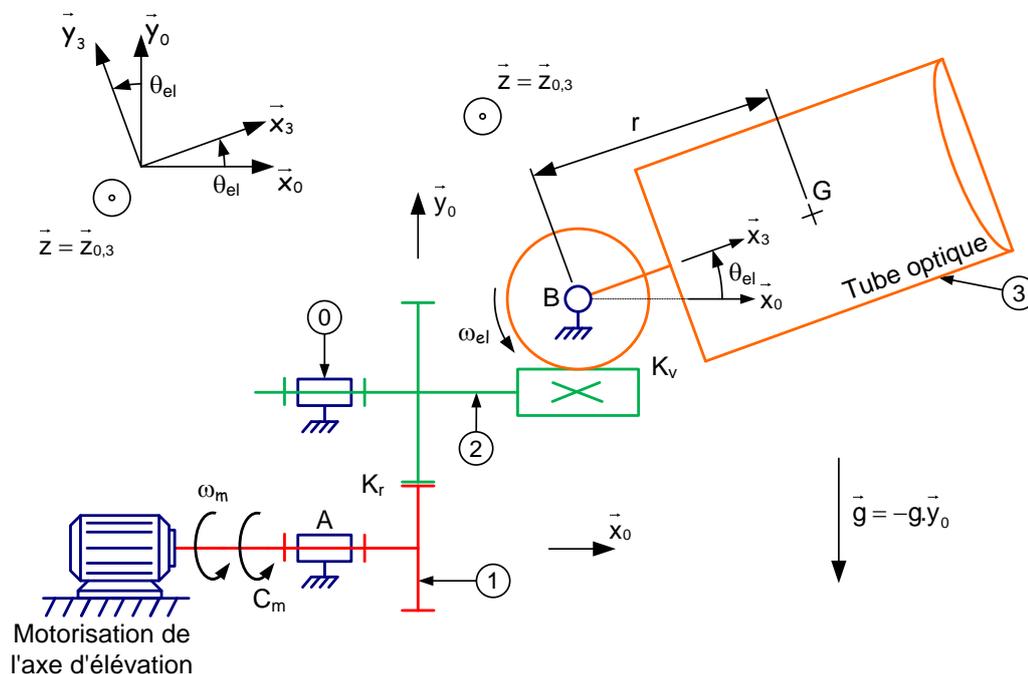


Figure 1 - Schéma cinématique de l'axe d'élévation

Le modèle de connaissance associé à la chaîne d'énergie de l'axe d'élévation est fourni ci-dessous :

$$P_m = C_m \times \omega_m = \left[J_{eq} \times \dot{\omega}_m + C_s + f \times \omega_m + \frac{M \times g \times r}{K_r \times K_v} \times \cos \Theta_{el} \right] \times \omega_m \quad (1)$$

avec :

- $J_{eq} = J_m + J_r + \frac{J_p}{K_r^2 \times K_v^2}$, moment d'inertie équivalent de l'ensemble des pièces en mouvement de l'axe d'élévation ramené sur l'arbre du moteur ;
 - J_m , moment d'inertie de l'arbre de l'actionneur d'élévation ;
 - J_r , moment d'inertie de l'ensemble des engrenages rapporté sur l'arbre moteur ;
 - J_p , moment d'inertie de l'ensemble des pièces en mouvement en sortie du système roue et vis sans fin, rapporté sur l'arbre de sortie du système roue et vis sans fin ;
- r , distance entre le centre de gravité du tube optique dans la direction du tube optique et l'axe de rotation de l'axe d'élévation ;
- K_r , rapport de transmission du train d'engrenages simple ($K_r > 1$) ;
- K_v , rapport de transmission du réducteur à roue et vis sans fin ($K_v > 1$) ;
- M , masse du tube optique ;
- g , accélération de la pesanteur ;
- Θ_{el} , position angulaire du tube optique par rapport à l'horizontale ;
- f , coefficient de frottement visqueux équivalent de l'ensemble des pièces en mouvement de l'axe d'élévation ramené sur l'arbre du moteur ;
- C_s , couple de frottement sec équivalent de l'ensemble des pièces en mouvement de l'axe d'élévation ramené sur l'arbre du moteur.

Activité 7 Présenter la démarche ayant permis d'obtenir l'équation (1).

Les équations du modèle de connaissance de l'actionneur de l'axe d'élévation (machine à courant continu à aimants permanents) sont rappelées ci-dessous :

$$u_m(t) = e(t) + R_m \times i(t) + L \times \frac{di(t)}{dt} ; e(t) = K_m \times \omega_m(t) ; C_m(t) = K_m \times i(t)$$

Activité 8 Analyser les différentes puissances mises en jeu en régime permanent et préciser les différents paramètres du modèle de la chaîne d'énergie de l'axe d'élévation à minimiser vis-à-vis de la consommation d'énergie globale.

1.3.2 Analyse et mise en œuvre du suivi automatique d'un astre par asservissement de position

On se place désormais dans le cadre d'une phase de suivi automatique d'un astre par asservissement de position. L'astre à suivre est modélisé à l'aide de la boule en matière plastique fournie. Le télescope est muni d'une webcam permettant de photographier et filmer l'astre à suivre et doit permettre son suivi automatique.

1.3.2.1 Mise en œuvre du suivi automatique d'un astre

Pour les activités suivantes, il est nécessaire de débrancher la raquette Autostar. Pour cela, suivre strictement la procédure ci-dessous :

- placer le commutateur ON/OFF sur le télescope sur la position OFF (LED rouge éteinte) ;
- débrancher la raquette Autostar ;
- placer les 2 commutateurs sur la position Manuel (carte et télescope).

Appeler l'examineur avant le début de l'expérimentation pour vérifier le branchement.

Prendre connaissance du protocole expérimental n°3 fourni dans le dossier ressource.

Activité 9 Observer les mouvements des 2 axes du télescope lorsque la boule est déplacée dans l'espace et discuter du type d'asservissement (poursuite ou régulation) mis en œuvre.

Activité 10 Compléter le schéma-blocs fonctionnel des 2 chaînes d'asservissement du Document Réponse DR2 en faisant apparaître les noms des constituants intervenant dans ces 2 chaînes.

1.3.2.2 Analyse et mise en œuvre du modèle de commande des actionneurs d'un télescope

Prendre connaissance des annexes « Qu'est-ce qu'une image couleur ? » et « Syntaxe Matlab » du dossier ressource.

Activité 11 Ouvrir le fichier Matlab-Simulink *commande_suivi_astre.slx* (situé dans le dossier *FichiersMatlab*), et en double-cliquant sur le bloc *Analyse Images* du fichier *commande_suivi_astre.slx*. Analyser les zones correspondantes aux lignes 29 à 42.

Activité 12 Compléter la zone % Détermination des coordonnées de l'astre (à partir de la ligne 44) pour déterminer les coordonnées centreAstreAzimut et centreAstreElevation correspondant au barycentre de l'astre observé dans l'image fournie par la webcam.

Prendre connaissance du protocole expérimental n°4 du dossier ressource.

Activité 13 Tester le comportement du télescope en mode suivi automatique d'un astre en changeant les valeurs des gains des 2 correcteurs des boucles d'asservissement, en prenant des valeurs de 0.01, puis 0.02 et enfin 0.05.

Activité 14 Conclure quant à la possibilité de suivre un astre avec un télescope motorisé et une webcam tout en minimisant la consommation d'énergie électrique.

Partie 1.4 – élaboration du scénario d'une séance à caractère expérimental (durée : 0h45)

Objectif : développer une séance à caractère expérimental s'intégrant dans la séquence pédagogique proposée dans la partie 1.1.

Production attendue

Une séance à caractère expérimental pertinente doit être proposée après avoir :

- situé cette séance dans la séquence pédagogique (objectifs et prérequis) ;
- décrit l'organisation matérielle et pédagogique de la séance (nombre d'élèves, systèmes utilisés, travail en îlots ou autres) ;
- décrit et justifié la (ou les) démarche(s) pédagogique(s) retenue(s) (démarche d'investigation, de résolution de problème technique, de projet ...) ;
- détaillé le scénario des activités que doivent réaliser les élèves sur le support didactisé à l'aide des documents fournis ci-après ;
- réalisé concrètement au moins une des activités expérimentales proposées dans la séance développée. Cette activité doit être nouvelle et différente de celles réalisées dans la partie 1.3. Préciser l'objectif de la manipulation entreprise, proposer et mettre en œuvre son protocole expérimental comme le feraient les élèves et analyser les résultats obtenus ;
- explicité clairement l'apport de la séance proposée dans le développement des savoir-faire et compétences des élèves.

Les éléments suivants sont fournis pour mener cette partie :

- un fichier de simulation *ModeleMultiphysique.slx* est disponible dans le dossier 1.4 Fichiers Matlab. Les paramètres R_m , K_m et f de ce modèle sont erronés volontairement ;
- l'ensemble des fichiers Matlab-Simulink de commandes et de mesures utilisés précédemment ;
- les diagrammes des chaînes fonctionnelles d'énergie et d'information pour les deux commandes mises en œuvre dans le sujet ;
- un jeu de masses ;
- un dynamomètre.

Nota : les éléments ci-dessus ne constituent que des propositions pour le candidat qui ne doit pas se sentir dans l'obligation de les utiliser s'il les juge non pertinent pédagogiquement.

Phase 2 – préparation de l'exposé (durée : 1h00)

Objectif : finaliser le support de présentation pour l'exposé devant le jury.

Production attendue

Un document numérique doit être réalisé afin de :

- présenter la séquence pédagogique ;
- présenter la pertinence du support didactisé par rapport au besoin pédagogique ;
- présenter la séance à caractère expérimental.

Phase 3 – exposé oral et entretien avec le jury en salle (durée : 1h00)

Rapport du jury de l'épreuve d'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnologique

1. Présentation de l'épreuve

L'épreuve « exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnologique » permet au jury d'évaluer l'aptitude des candidats à :

- mettre en œuvre et conduire une expérimentation, une analyse de comportement d'un système réel ou d'un équipement, notamment à l'aide d'outils informatiques tels que des logiciels de traitement de données, de simulation, de représentation ;
- analyser et vérifier ou comparer les performances de tout ou partie de ce système pluritechnologique obtenues par des mesures ou issues de modèles de comportement et de connaissance ;
- justifier ou critiquer les solutions constructives retenues et les choix relatifs à la réalisation (hypothèses, comparaison multicritère des choix techniques et des organisations, évaluations économiques, etc.) en regard du cahier des charges ;
- élaborer, justifier, conduire et exploiter un protocole expérimental ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- concevoir et organiser le plan d'une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné. Elle prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par les candidats au cours des activités pratiques.

L'exploitation pédagogique à développer comporte une séance expérimentale qui s'appuie obligatoirement sur le système utilisé pour les activités pratiques. Elle est relative aux enseignements non spécifiques de la spécialité ingénierie, innovation et développement durable du cycle terminal « sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D) » et/ou de l'enseignement des sciences de l'ingénieur du lycée général et des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE).

Déroulement de l'épreuve

Cette épreuve, de coefficient 2, dure 6 heures et comporte trois phases.

Phase 1 – Conception et organisation d'une séquence de formation à un niveau imposé (durée 4h00)

Cette première phase d'une durée totale de 4h00 se déroule en quatre temps.

Elle se déroule dans un laboratoire où sont mis à disposition des candidats un support d'étude, un environnement numérique de travail relié à l'Internet, des moyens de mesure et/ou de simulation et si besoin des logiciels spécifiques d'acquisition.

Premier temps (durée 0h45)

Au cours de ce premier temps, les candidats doivent réfléchir et concevoir une séquence de formation dont le contexte pédagogique imposé est composé :

- du titre de la séquence ;
- du niveau de formation visé ;

-
- des caractéristiques d'une classe (nombre d'élèves, volume horaire en classe entière et en groupe à effectif réduit) ;
- d'une proposition de progression pédagogique adaptée au niveau de formation ;
- de la situation temporelle de la séquence dans la progression pédagogique annuelle ;
- du référentiel du niveau de formation visé ;
- d'un document d'accompagnement (ressource) pour faire la classe ;
- d'une liste non exhaustive de systèmes didactiques d'un laboratoire de Sciences de l'Ingénieur.

Pour cette session, les candidats ont eu le choix entre deux séquences abordant des champs très différents des sciences de l'ingénieur. Les deux séquences sont situées dans le même cycle de formation. Pour le jury, il n'y a pas de distinction de valeur entre ces deux choix potentiels ; il s'agit de permettre au candidat de se situer dans un champ dans lequel il peut valoriser au mieux ses compétences, et travailler en toute confiance dès le début de sa préparation.

Les candidats doivent repérer les objectifs de formation du niveau imposé et s'approprier les compétences à faire acquérir liées à la séquence retenue. Puis ils doivent identifier les savoir-faire et savoirs du programme correspondant dans le but d'élaborer une trame détaillée de la séquence en décrivant son organisation pédagogique, temporelle, matérielle et humaine. Les prérequis de la séquence doivent être identifiés et analysés en cohérence avec la progression didactique annuelle proposée. Les candidats doivent justifier tous leurs choix sur les modalités pédagogique et didactique (TP, TD, cours, projet ...). L'ensemble de ces éléments doit être rédigé sur un support de présentation numérique.

Deuxième temps (durée 0h30)

Durant ce deuxième temps, les manipulations proposées ont pour objectif de faciliter l'appropriation et la compréhension du fonctionnement global du système. À la fin de cette partie, l'examineur s'assure que les candidats se sont bien approprié le système didactique, support des expérimentations qui suivent et de la séance à caractère expérimentale à concevoir. L'objectif de cette partie est de faire émerger une problématique technique et scientifique à résoudre.

Troisième temps (durée 2h00)

Pour ce troisième temps, les candidats doivent répondre aux activités à caractère expérimental proposées. Cette partie permet aux candidats, par la mobilisation de connaissances et de compétences caractéristiques du niveau de l'agrégation, de résoudre la problématique scientifique et technique identifiée, en exploitant les résultats obtenus. Pour cela il est nécessaire d'analyser les hypothèses, les modèles, les résultats expérimentaux, les valeurs numériques, et de mettre en évidence les écarts entre les performances souhaitées, les performances mesurées et les performances simulées puis de proposer des solutions pour les réduire afin d'apporter une réponse à la problématique technique et scientifique à résoudre.

Quatrième temps (durée 0h45)

Au cours de ce quatrième temps, les candidats doivent décrire une séance à caractère expérimental s'insérant dans la séquence pédagogique :

- en situant la séance à caractère expérimental dans la proposition de séquence pédagogique ;
- en précisant l'organisation matérielle et pédagogique de la séance (nombre d'élèves, systèmes utilisés, travail en ilots) ;
- en décrivant la (ou les) démarche(s) pédagogique(s) retenue(s) (démarche d'investigation, de résolution de problème technique, de projet ...) ;
- en détaillant le scénario des activités que doivent réaliser les élèves ;

- en proposant et en mettant en œuvre au moins un protocole expérimental différent de ceux proposés au cours du troisième temps ;
- en illustrant les différentes analyses que devront effectuer les élèves ;
- en explicitant clairement l'apport de la séance proposée dans le développement des compétences des élèves.

Pendant toute la durée de cette phase, les candidats ont accès aux logiciels de simulation, au système et aux matériels de travaux pratiques. Les candidats doivent donc entreprendre de réaliser de nouvelles simulations et/ou expérimentations utiles et adaptées au niveau de formation visée par la séquence pour alimenter et étayer la trame de la séance qu'ils ont choisie de développer.

Phase 2 – préparation de la présentation orale (durée 1 h).

Les candidats préparent et terminent la présentation qu'ils effectueront devant le jury. Durant cette phase de préparation de l'exposé, les candidats n'ont plus accès au système utilisé tout au long de la phase précédente. Les candidats conservent cependant à leur disposition l'ensemble des ressources associées au sujet. Ils disposent toujours d'un poste informatique relié à l'Internet, des logiciels courants de bureautique et de simulation ainsi que des résultats obtenus lors de la phase 1.

Phase 3 – présentation des travaux devant le jury (durée 1 h).

L'exposé oral, d'une durée maximale de 30 minutes, doit comporter :

- la description de la séquence de formation dont le contexte pédagogique est imposé (durée indicative de 0h15) ;
- la justification de la pertinence du système didactique par rapport à la séquence pédagogique imposée (0h05) ;
- la présentation de la séance à caractère expérimentale envisagée dans le cadre de la séquence pédagogique exposée (0h10).

L'entretien avec le jury est d'une durée maximale de 30 minutes.

Il est à noter que durant la présentation des travaux devant le jury, il n'est absolument pas attendu des candidats qu'ils présentent à nouveau les résultats aux activités menées dans le cadre des deuxième et troisième temps de la phase 1. En effet, ceux-ci ont déjà conduit à une évaluation par le jury en salle de TP. Seule est attendue la présentation des activités envisagées de faire réaliser aux élèves lors de la séance à caractère expérimentale incluse dans la séquence pédagogique exposée.

Les candidats sont amenés au cours de la présentation orale à :

- définir les objectifs de formation ;
- positionner la séquence dans la progression pédagogique annuelle ;
- présenter et justifier la structure de la séquence pédagogique, en précisant sa durée, la répartition des séances et leurs objectifs pédagogiques, etc. ;
- identifier les prérequis et les conditions matérielles nécessaires pour la séance ;
- mettre en évidence les informations, les données et les résultats issus de leurs propres investigations dans la perspective de la séquence pédagogique imposée et de la séance à caractère expérimentale développée.

Les candidats doivent également s'attacher à :

- définir précisément les compétences abordées lors de la séance détaillée ;
- mettre en adéquation les objectifs visés de la séance et de la séquence ;

- exploiter et adapter au niveau de formation demandé (STI2D, S-SI et CPGE) les informations, les données et les résultats issus des activités ou des investigations conduites au cours de l'activité pratique ;
- détailler les activités proposées aux élèves lors de la séance ;
- présenter les résultats attendus des élèves ;
- présenter une synthèse ou une structuration des connaissances ;
- définir les stratégies d'évaluation des acquis des élèves (évaluation sommative, évaluation formative...) et leur lien avec d'éventuelles remédiations.

Le jury est amené à interroger les candidats, afin d'apprécier leur connaissance des principes fondamentaux du système éducatif et du cadre réglementaire de l'école, sur la manière dont ils envisagent d'accompagner les élèves dans leur parcours de formation, ou bien sur leur positionnement vis-à-vis d'une équipe pédagogique.

Au cours de l'entretien, les candidats sont amenés à :

- préciser certains points de leurs présentations ;
- expliciter et justifier les choix de nature didactique et/ou pédagogique qu'ils ont opérés.

Le jury a apprécié les candidats qui ont su positionner leur réflexion par rapport au contexte des réformes en cours et à venir.

Lors de la présentation devant le jury, les candidats disposent d'un vidéoprojecteur, d'un tableau et d'un poste informatique relié à l'Internet, doté des logiciels courants de bureautique. Les candidats accèdent à toutes leurs productions numériques réalisées pendant l'épreuve.

Les supports retenus lors de la session 2021 sont les suivants :

- imprimante 3D ;
- monture de télescope ;
- système de travelling ;
- robot à câbles ;
- ventilation mécanique contrôlée double flux ;
- robot haptique ;
- volet roulant ;
- robot d'assistance à la chirurgie laparoscopique.

Ces supports ont permis aux candidats de mettre en œuvre leurs compétences à haut niveau scientifique sur les activités suivantes :

- élaboration et mise en œuvre d'un protocole expérimental ;
- identification des comportements de constituants ou d'un système ;
- mesure de comportement de constituants ou d'un système ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne de mesure ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne d'information ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne d'énergie ;
- détermination des paramètres significatifs d'une modélisation ;
- analyse d'algorithmes simples ou de quelques lignes de programmes simples (en langage python, arduino, etc) ;
- recalage d'un modèle multiphysique ou non ;
- choix des modèles de comportement ou de connaissance ;
- validation de modèles ;
- simulation et prédiction de performance ;
- évaluation des écarts.

2. Analyse des résultats

Une majorité des candidats est bien préparée à la conduite des expérimentations et à l'exploitation des résultats au plus haut niveau d'expertise. L'évolution opérée depuis la session 2018 dans le déroulement de l'épreuve a bien été prise en compte par les candidats. Les résultats s'en trouvent ainsi sensiblement améliorés. Le jury a particulièrement apprécié certaines prestations qui traduisent à la fois un haut niveau scientifique et une très bonne maîtrise des compétences d'ingénierie pédagogique attendues d'un futur agrégé.

Par ailleurs, les candidats se sont bien emparés du choix de séquence pédagogique qui leur était proposé. Cette possibilité laissée au candidat a été bien appréhendée. Pour la majorité des sujets, l'une et l'autre des propositions ont été traitées.

À l'inverse, quelques rares candidats proposent une prestation qui n'est pas au niveau requis par le concours de l'agrégation.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Compréhension du système pluritechnologique support des activités pratiques

Pour cette partie, les manipulations ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système, de s'approprier le support du travail pratique et de la problématique proposée. Les candidats disposent d'un dossier technique, d'un dossier ressource, ainsi que de diverses ressources numériques. Les supports proposés aux candidats sont des systèmes didactisés enrichis parfois d'un sous-système type maquette instrumentée et commandée.

Pour cette phase, le jury tient à porter à l'attention des candidats les points suivants :

- l'extraction des informations pertinentes dans les ressources mises à disposition constitue un préalable indispensable à l'appropriation du système et de la problématique ;
- la contextualisation des activités et supports proposés est trop souvent omise. Elle permet pourtant d'appréhender correctement le fil conducteur des activités et manipulations proposées dans le sujet ;
- les analyses externes et internes des systèmes gagnent en pertinence lorsqu'elles sont appuyées sur des outils formalisés (architecture fonctionnelle des chaînes d'énergie et d'information, diagrammes SysML, etc) ;
- une culture technologique des constituants des chaînes fonctionnelles usuels des systèmes contemporains facilite l'appropriation du système.

Résolution des problèmes posés et exploitation des résultats

Pour cette partie de l'épreuve, les candidats sont amenés à :

- choisir, mettre en place et utiliser une instrumentation spécifique dédiée à la mesure de grandeurs physiques sur les systèmes instrumentés ;
- mettre en œuvre différents outils numériques (logiciels de pilotage et/ou d'acquisition dédiés aux supports, logiciels de simulation, modéleur, logiciel de calculs par éléments finis, tableurs, traitements de textes, logiciels de calcul ou de visualisation, logiciels de programmation, etc.).

Afin de réaliser correctement le dernier point cité, le jury tient à préciser qu'il est impératif de lire et respecter scrupuleusement les protocoles expérimentaux permettant de traiter correctement les activités pratiques concernées. Une part non négligeable de candidats perd malheureusement du temps dans l'analyse des résultats expérimentaux faute de suivre rigoureusement les protocoles expérimentaux fournis.

Le jury assiste les candidats en cas de difficultés matérielles ou de mise en œuvre des différents outils informatiques. La maîtrise de ces logiciels n'est pas exigée.

Lors de l'activité pratique, le jury souhaite que les candidats s'attachent à :

- lire et analyser l'ensemble du sujet proposé ;
- maîtriser la durée consacrée à chaque activité ;
- maîtriser les outils d'analyse courants (structurels et fonctionnels) ;
- exploiter et interpréter l'ensemble des résultats des expérimentations et des mesures dans leur totalité et de façon rigoureuse ;
- corréliser les résultats des simulations et des expérimentations en les associant à des phénomènes physiques et à des solutions technologiques ;
- effectuer une analyse critique des résultats expérimentaux ;
- vérifier la cohérence et la pertinence des résultats expérimentaux ;
- mettre en œuvre une démarche de résolution du problème technique posé ;
- proposer aux examinateurs une présentation et/ou justification des protocoles ;
- présenter les résultats de façon claire et précise.

Le jury précise que les supports de travaux pratiques sont principalement issus des laboratoires de sciences de l'ingénieur, dans les voies générales et technologiques du lycée, et de CPGE. Ils couvrent l'ensemble des champs disciplinaires transversaux des sciences de l'ingénieur.

Les candidats pertinents mobilisent à bon escient leurs compétences pour mener la démarche de résolution de problème suggérée par l'énoncé. Ces candidats font preuve de capacités d'une part à mettre en œuvre un protocole expérimental ou/et une simulation fournis de manière autonome et d'autre part à proposer un protocole expérimental complet qui répond à un objectif précis puis à le mettre en œuvre. Ils montrent également des capacités à relier le système réel et ses constituants aux modèles mobilisés pour répondre à la problématique scientifique et technique posée. En s'appuyant sur une approche pluritechnologique et multiphysique, ils s'approprient suffisamment le système didactisé pour être alors dans la capacité de l'investir dans leur future exploitation pédagogique et d'en proposer une manipulation en cohérence avec les compétences visées par la séance de la séquence à présenter.

Conception d'une activité pédagogique à caractère expérimental

Un contexte pédagogique est imposé. Les candidats doivent préparer la trame détaillée d'une séquence pédagogique dans laquelle ils devront décrire plus particulièrement une séance pédagogique à caractère expérimental. Ils doivent préciser les manipulations et les protocoles expérimentaux que devront réaliser les élèves en cohérence avec le niveau de formation imposé et qui permettent éventuellement de répondre à une problématique judicieusement choisie.

Ces manipulations et protocoles expérimentaux insérés dans la séance pédagogique doivent impérativement être adaptés au niveau requis. De ce fait, il est attendu que les candidats proposent des protocoles qui ne soient pas la copie conforme de ceux effectués durant la phase d'activités pratiques (deuxième et troisième temps de la phase 1). Certains candidats n'ont pas su intégrer la consigne qui excluait la reprise des résultats obtenus au cours des manipulations lors de la présentation orale des travaux devant le jury (phase 3). Ces candidats n'ont pas su mettre en perspective le ou les liens entre les possibilités du système didactisé identifiables au cours des manipulations menées lors des activités pratiques et la séquence pédagogique imposée visée. Les candidats mettent difficilement en œuvre des manipulations qui leur sont propres pour alimenter la séance à caractère expérimental élaborée.

Un nombre très restreint de candidats ne réalise que quelques rares manipulations. Cette insuffisance est liée généralement à une connaissance parcellaire des champs scientifiques et techniques à mobiliser. Certains manifestent une qualité de raisonnement et une rigueur qui ne sont pas au niveau attendu des candidats à l'agrégation. La conséquence est souvent dans ce cas une exploitation pédagogique décevante.

Le jury attire l'attention des candidats sur l'importance première à accorder à la préparation de l'exploitation pédagogique. La phase de conception de la séquence pédagogique d'une heure et trente minutes dans sa globalité, en prenant en compte les quarante-cinq minutes de la partie 1.1 et les quarante-cinq minutes de la partie 1.4, est suivie d'une phase de préparation de l'exposé d'une heure pour aboutir à une présentation d'une durée de trente minutes (maximum). Passer outre les recommandations portant sur les différents temps consacrés aux phases 1 et 2 est rarement pertinent et obère souvent la qualité de la présentation orale et de l'exploitation pédagogique.

De façon surprenante, un nombre non négligeable de candidats expose une séquence pédagogique différente de celle initialement imposée. Dans cette situation, le jury sanctionne le hors-sujet.

Le jury invite les candidats, lors de la conception de la séquence pédagogique, à :

- présenter la situation de la séquence dans la progression pédagogique proposée ;
- dégager et formaliser les objectifs pédagogiques (compétences à faire acquérir et les connaissances à transmettre) ;
- décrire la séquence en justifiant les choix opérés et expliquant le cheminement de l'élève pour aboutir à l'acquisition de l'ensemble des compétences visées ;
- préciser de façon argumentée la place de la séance à caractère expérimental dans la séquence ;
- expliciter le choix des modalités organisationnelles et pédagogiques de la séance en cohérence avec le contexte ;
- proposer et décrire précisément au moins un protocole expérimental réalisé par les élèves ;
- connaître les différents modes d'évaluation et leur finalité pédagogique ;
- respecter la durée de préparation de l'exploitation pédagogique.

Le jury conseille aux futurs candidats d'étudier préalablement et attentivement les programmes et les objectifs de formation de la spécialité sciences de l'ingénieur de la voie générale, de la voie technologique STI2D, et des CPGE, ainsi que les commentaires associés. L'étude précédente associée à la lecture des différents documents ressources nationaux, leur permettra de pouvoir proposer une exploitation pédagogique en adéquation avec le niveau imposé. Une réflexion pédagogique sur les objectifs de formation de ces séries et classes post bac est indispensable pour réussir cette partie de l'épreuve.

Le jury invite les candidats à clairement indiquer la ou les démarches pédagogiques qui structureront leur enseignement (démarche d'investigation, démarche de résolution de problème, ou encore démarche de projet).

Présentation orale devant un jury

L'exposé oral est centré sur la problématique pédagogique proposée, les manipulations visant à répondre à la problématique scientifique et technique ayant déjà été évaluées. Cette évolution de l'exposé oral, introduite à la session 2018, permet de mettre en valeur les qualités d'ingénierie pédagogique des candidats.

Quelques rares candidats ne la prennent pas en compte malgré les différents rappels sur les attendus de cette présentation orale, tant dans le sujet que dans les consignes données par les interrogateurs. Ces candidats perdent alors du temps qui leur serait nécessaire pour avoir une réflexion pédagogique plus aboutie.

Le jury attend, lors de cette phase de présentation de la séquence pédagogique, que les candidats soient capables :

- de situer la séquence dans la progression pédagogique proposée ;
- d'expliciter les compétences, et les connaissances associées, visées par la séquence, puis par la séance, et de s'assurer du respect des textes officiels en vigueur ;
- de définir des modalités d'évaluation des niveaux de maîtrise des compétences des élèves ;
- de situer l'activité expérimentale dans la séquence pédagogique ;
- de décrire le système en présentant sa pertinence par rapport à la séquence pédagogique demandée ;
- de proposer, de justifier et de valider des protocoles expérimentaux mis en place par les élèves en cohérence avec la séquence pédagogique demandée ;
- de définir l'enchaînement des activités réalisées par les élèves dans la séance ;
- de fournir les résultats attendus correspondant à ces activités ;
- de proposer et justifier les modalités d'évaluation.

Le jury attend également des candidats qu'ils mettent en œuvre des compétences professionnelles telles que :

- produire un discours clair, précis et rigoureux en sachant attirer l'attention du jury ;
- être pertinent et réactif aux questions posées ;
- être capable de dégager l'essentiel, de donner du sens aux connaissances développées et de captiver l'auditoire.

La majorité des candidats n'utilise pas le temps imparti pour la présentation, soit 30 minutes. L'utilisation de la durée prévue leur permettrait de présenter leurs réflexions pédagogiques de manière plus précise.

Le jury apprécie les candidats faisant preuve d'humilité et d'honnêteté dans leurs réponses lors de l'entretien.

Les candidats ayant réussi cette épreuve se sont attachés à répondre et à mettre en œuvre les conseils et attendus du jury.

Comportement des candidats

Les candidats doivent être méthodiques et rigoureux pour appréhender un système pluritechnologique dans sa globalité et sa complexité. L'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale et transversale d'un système pluritechnologique ne s'improvise pas. Elle doit se préparer tout au long des formations conduisant à l'agrégation. Les candidats doivent éviter les présentations stéréotypées ne permettant pas de montrer leur capacité propre à mener une réflexion personnelle.

Les candidats se présentant au concours de l'agrégation se destinent à être de futurs cadres de l'éducation nationale. Ils se doivent d'avoir un vocabulaire, un comportement et une tenue en adéquation avec le métier d'enseignant. Dans quelques cas, heureusement très rares, certains candidats cherchent à initier une forme de complicité avec les interrogateurs, ce qui ne peut en aucun cas être la posture à adopter dans un concours de recrutement d'enseignants. À l'inverse, si critiquer des solutions technologiques fait partie intégrante de la démarche en sciences de l'ingénieur, remettre totalement en cause le support proposé est une attitude parfaitement inappropriée.

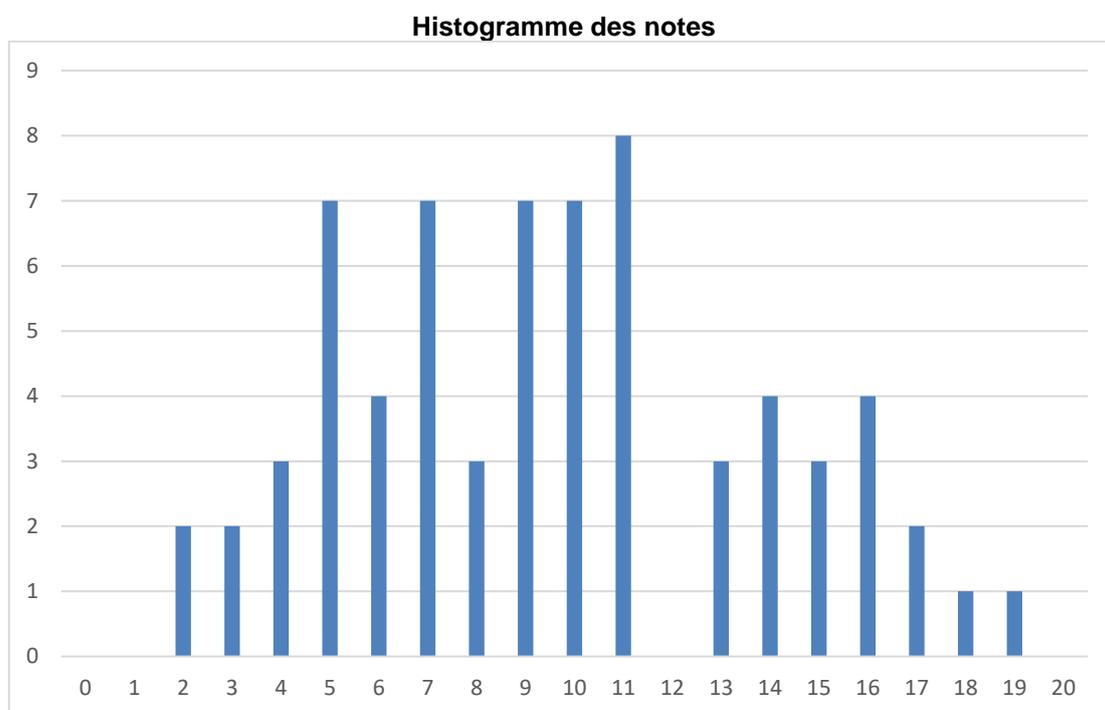
4. Conclusion

Cette session du concours de l'agrégation externe de sciences industrielles de l'ingénieur confirme les évolutions engagées lors des années précédentes. Le laboratoire unique composé de systèmes pluritechnologiques communs aux quatre options de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur impose aux candidats une appropriation de tous les champs disciplinaires transversaux liés au triptyque matière, énergie et information. L'ingénierie pédagogique à mettre en œuvre implique une bonne connaissance des différents programmes de formation et des objectifs de formation associés.

5. Résultats

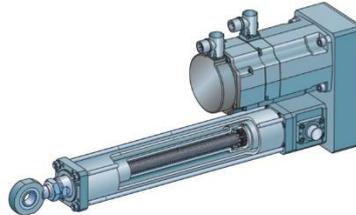
68 candidats ont été évalués lors de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est 10,1/ 20 et l'écart-type 4,3 avec :

- 19,2 comme meilleure note ;
- 2,3 comme note la plus basse.



Exemple de sujet pour l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnologique

SUPPORT ETUDIÉ :
Vérin électrique équipant une plateforme hexapode d'antenne de communication



<p><u>Thème pédagogique :</u></p> <p>Recherche de solutions constructives</p>	<p>ÉTUDES PROPOSÉES</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Étude 1 : Effets du jeu axial▪ Étude 2 : Résistance due aux frottements
---	---

OBJECTIFS DE L'ÉPREUVE

L'épreuve a pour but de valider tout ou partie des compétences professionnelles attendues du métier de professeur, et principalement :

- maîtriser les savoirs disciplinaires et leur didactique ;
- maîtriser la langue française dans le cadre de son enseignement ;
- construire, mettre en œuvre et animer des situations d'enseignement et d'apprentissage prenant en compte la diversité des élèves ;
- organiser et assurer un mode de fonctionnement du groupe favorisant l'apprentissage et la socialisation des élèves ;
- évaluer les progrès et les acquisitions des élèves.

L'évaluation porte sur la capacité à développer les aptitudes suivantes :

- s'approprier un matériel ou équipement et son environnement associé si besoin à des systèmes informatiques de pilotage, de traitement, de simulation, de représentation ;
- conduire une expérimentation, une analyse de fonctionnement d'une solution, d'un procédé, d'un processus ;
- analyser le comportement d'une solution, d'un procédé, ou d'un processus à partir d'un modèle ;
- maîtriser, conduire et exploiter une simulation numérique ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- mener des démarches avec rigueur et évoluer avec autonomie (savoir être) ;

-
- concevoir et organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé (compétences visées et savoirs associés) à un niveau de classe donné ;
- savoir communiquer.

Cette épreuve, de coefficient 2, dure 6 heures et comporte trois phases :

- **phase 1 - activités pratiques de laboratoire (durée 4 h) ;**
- **phase 2 - préparation de l'exposé (durée 1 h) ;**
- **phase 3 - exposé oral et entretien avec le jury en salle (durée 1h00).**

L'utilisation d'une calculatrice est autorisée (conformément à la circulaire n°99-186).

Libellé de la séquence pédagogique

Pour cette exploitation pédagogique, les contraintes de travail sont les suivantes :

Niveau : Brevet de Technicien Supérieur « Conception de Produits industriels »

Compétence(s) : C9 : Dimensionner tout ou partie d'une chaîne d'énergie en autonomie et/ou en collaboration avec un spécialiste.

La compétence C9 se détaille de la façon suivante :

- C9.1** Mobiliser les connaissances de mécanique dans l'objectif d'établir des relations d'entrées-sorties de mécanismes plans ou spatiaux se prêtant à une modélisation simple.
- C9.2** Pré dimensionner les éléments de structure et/ou les actionneurs essentiels au projet.
- C9.3** Améliorer par itération une géométrie ou une architecture, par simulation informatique des comportements mécaniques.
- C9.4** Dimensionner et choisir un composant standard en exploitant une base de données industrielle, mécanique ou électrique.

Savoirs associés : Les savoirs associés à la compétence C9 sont définis dans le référentiel : S2.2, S3, S4.1 et S5. Mais dans ce sujet, les savoirs de technologie des mécanismes sont particulièrement mobilisés :

S5 – TECHNOLOGIE DES MECANISMES

Les savoirs et connaissances relatifs à ces solutions constructives seront traités en liaison avec l'étude des chaînes d'énergie (voir S3.1 – Chaîne d'énergie), l'objectif étant d'apporter une culture des constituants de transmission de puissance.

Lorsque la complexité le permet, on pourra s'intéresser aux :

- *Conditions d'installation et de bon fonctionnement.*
- *Pré dimensionnement et/ou validation du choix à l'aide de bases de données de constructeurs ou de logiciels spécialisés.*
- *Données technico-économiques comparatives (prix du composant, coûts d'installation, de maintenance, etc...).*

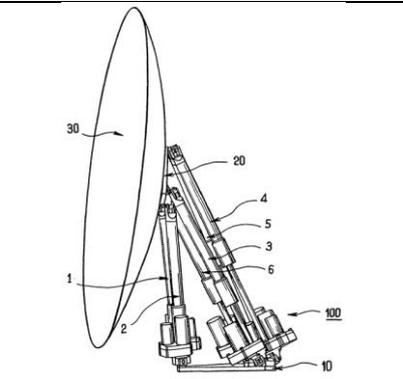
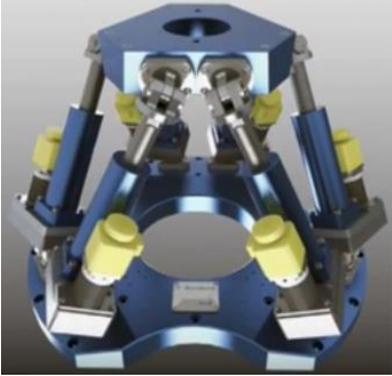
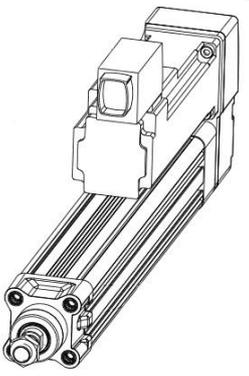
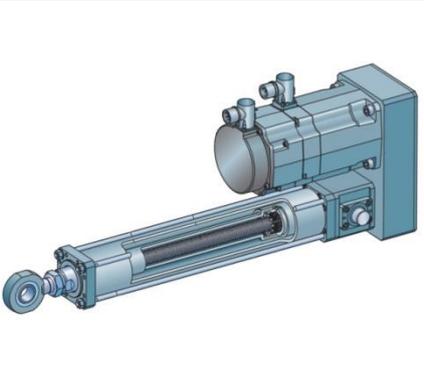
Les savoirs liés aux solutions constructives associés aux liaisons qui sont convoqués dans ce sujet sont centrés sur la liaison hélicoïdale et sur ces conditions d'emploi :

S5.1 – Solutions constructives associées aux liaisons					
Savoirs, Connaissances (concepts, notions, méthodes)	Niveaux taxo- nomiques				Limites de connaissances
	1	2	3	4	
<ul style="list-style-type: none"> - Nature des liaisons obtenues. - Solutions classiques avec éléments standard éventuels. - Conditions et surfaces fonctionnelles (mise en position, maintien en position), influence sur la précision, la tenue aux efforts, la rigidité, ... - Lubrification éventuelle. - Étanchéité éventuelle. - Pré dimensionnement et/ou validation du choix à l'aide de bases de données de constructeurs et de logiciels spécialisés. - Données technico-économiques comparatives (prix du composant, coûts d'installation, de maintenance, etc...) 					Pour les solutions constructives suivantes : <ul style="list-style-type: none"> - assemblage démontable, - assemblage permanent, - guidage en rotation par glissement, - guidage en rotation par éléments roulants, - guidage en translation par glissement, - guidage en translation par éléments roulants, - liaison rotule, - liaison hélicoïdale

La séquence pédagogique de ce sujet pour des étudiants de STS CPI prend appui sur le support étudié ainsi que sur les activités pratiques ou expérimentales menées durant la première phase. Ces manipulations expérimentales pourront être modifiées et/ou adaptées au niveau visé.

Mise en situation

L'objet de cette étude concerne le positionnement et l'orientation d'une antenne de communication par satellite. L'environnement d'utilisation d'une antenne peut être agressif : engin porteur mobile, bourrasques de vent, obstacle fixe ou mobile coupant le faisceau de communication... Le positionnement et l'orientation de l'antenne sont engendrés par une structure comprenant 6 vérins électriques. Ce sont les longueurs de sortie de tige de chacun des 6 vérins qui orientent et/ou positionnent l'antenne. Cette architecture de système est appelée hexapode dans lequel les 6 vérins sont montés en parallèle entre un socle et une plateforme ayant une très grande mobilité.

		
Bateau équipé d'antennes de communication par satellite	Antenne installée au sol sur une plateforme hexapode	Schéma d'un hexapode
		
Mobilité de la plateforme hexapode	Vérin électrique	Vérin électrique en coupe

Le déplacement et l'orientation de la plateforme supérieure qui supporte l'antenne sont donnés par les six longueurs de vérin. Le fonctionnement de chaque vérin est basé sur le principe d'une transformation d'un mouvement de rotation en translation par une liaison hélicoïdale. Cette dernière est matérialisée par une vis, un écrou et des éléments roulants interposés entre la vis et l'écrou. Les éléments roulants sont le plus souvent des billes ; mais dans certains cas les billes peuvent être remplacées par des rouleaux, striés ou filetés.

Chaque vérin peut être équipé d'un capteur de position, linéaire ou angulaire pour mesurer la longueur de sortie de la tige du vérin.

Les performances de communication entre l'antenne et le satellite dépendent de la qualité des asservissements de la commande des vérins motorisés et de la précision des systèmes mécaniques. Donc la précision d'orientation de l'antenne est donnée en partie par la qualité de la liaison hélicoïdale.

Le mécanisme vis-écrou avec des éléments roulants de type rouleau satellite est l'objet d'étude du sujet qui suit.

L'objectif de l'étude consiste donc à évaluer les effets de ces défauts mécaniques et de proposer des solutions constructives pour réduire les écarts.

Après avoir pris en main le matériel expérimental à disposition (1^{ère} phase – 1^{ère} partie), deux études successives vont être réalisées pour résoudre cette problématique (1^{ère} phase – 2^{ème} partie) :

- Étude 1 : Effets du jeu axial
- Étude 2 : Résistance due aux frottements

PREMIÈRE PHASE : PREMIÈRE PARTIE (environ 0h30)

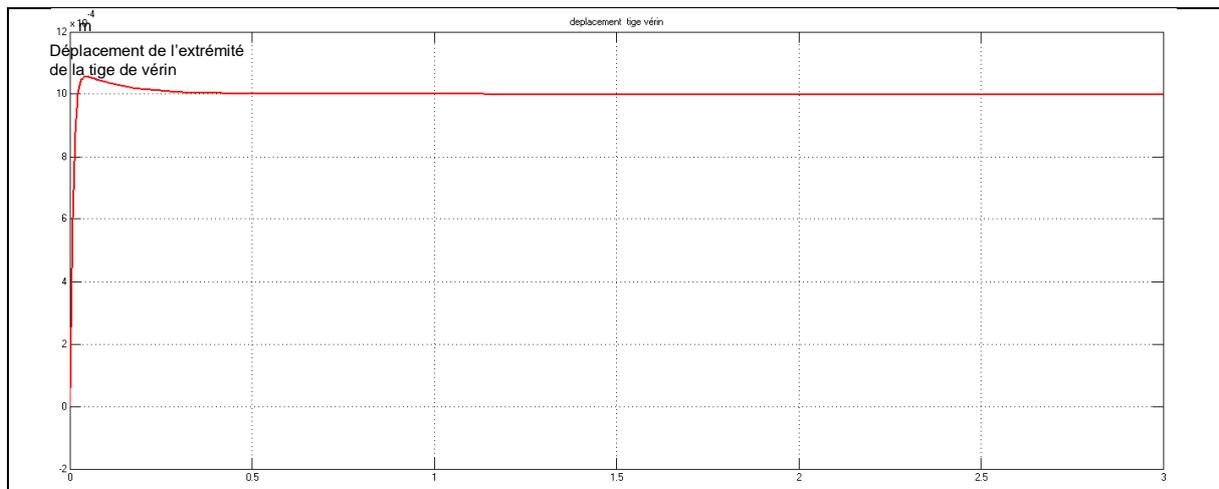
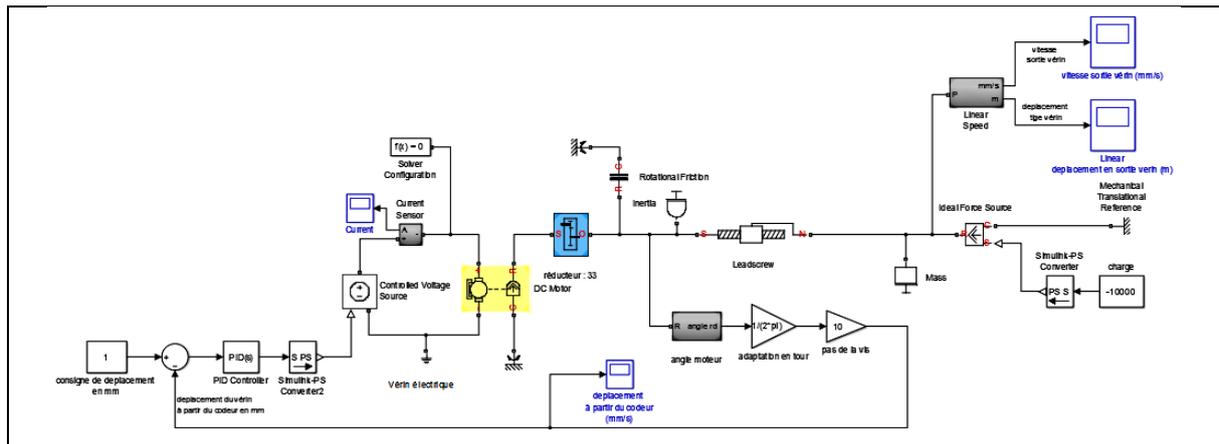
Remarque : Cette partie propose des manipulations guidées dont la seule fin est de prendre en main le support. Toutes les questions relatives à la prise en main peuvent être posées aux membres du jury durant cette première demi-heure de façon à être autonome par la suite.

Les objectifs de cette première partie sont de :

- prendre connaissance du support de l'épreuve et de la problématique associée au fonctionnement du système ;
- manipuler le support d'étude pour comprendre le fonctionnement global du système ;
- prendre en main les différents dispositifs expérimentaux et de simulation.

Présentation

Les performances de communication entre l'antenne et le satellite dépendent de la qualité des asservissements de la commande des vérins motorisés et de la précision des systèmes mécaniques. La commande de chaque vérin est asservie avec un réglage du correcteur PID approprié, mais l'implantation du capteur qui donne l'image du déplacement ne garantit pas la précision du déplacement de la tige d'un vérin (voir ci-après le modèle de simulation multiphysique ou ouvrir le fichier vis1.slx). Le modèle ainsi défini ne tient pas compte des défauts de tous les organes mécaniques dans la chaîne d'énergie.



Temps en s

La précision de l'orientation de l'antenne dépend donc de la qualité de la liaison hélicoïdale.

L'objectif de l'étude consiste donc à évaluer les effets de ces défauts mécaniques du mécanisme vis-écrou qui provoque le déplacement de la tige du vérin et de proposer des solutions constructives pour réduire les écarts.

Moyens

- échantillons commerciaux de démonstration ;
- écrou démonté et rouleaux satellites filetés ;
- logiciel permettant d'effectuer la simulation numérique ;
- appareillage nécessaire à l'expérimentation et à la mesure ;
- banc de mesure instrumenté muni de son système d'acquisition (pont d'extensomètre).

Activités à réaliser

Activité 1 : Observation de l'architecture du système.

- Réaliser un schéma technologique d'un actionneur linéaire réalisé avec un système vis-écrou tel qu'il est installé sur la plateforme hexapode qui se trouve sur le poste de travail ;
- Décrire la chaîne d'énergie et représenter le flux d'énergie mécanique ;

- Commenter le choix de la position du capteur potentiométrique dans la chaîne d'énergie, vis à vis de l'objectif de l'étude ;

Activité 2 : Observation du comportement du système.

- Faire varier, en utilisant le modèle géométrique Solidworks de l'hexapode, la longueur des différents vérins pour observer les variations de positions angulaires de la plateforme ;

Nota : utiliser le fichier « plateformeconfig1.SLDASM » avec le logiciel Solidworks pour imposer un petit déplacement d'une tige et mesurer la position angulaire de la plateforme. Pour cela, consulter le document de prise en main « Solidworks ».

- Identifier les différents éléments du modèle multiphysique en utilisant le fichier « vis1.slx ». Réaliser une simulation de commande de sortie de tige de 1mm et commenter la qualité de l'asservissement.

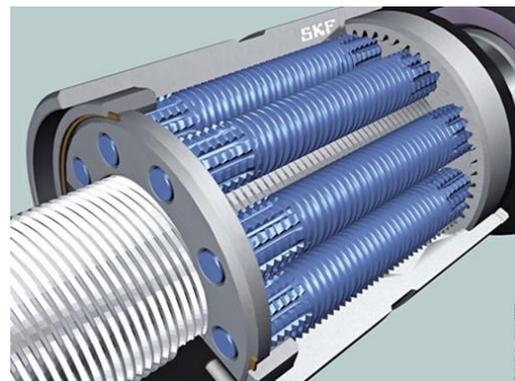
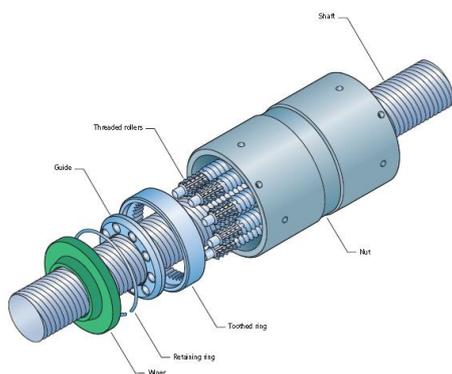
Nota : la boîte « Perturbation cyclique » est en place mais la perturbation est nulle dans un premier temps. Un document réponse est mis à disposition pour faciliter la restitution des résultats.

Activité 3 : Compréhension du principe technologique de la vis à rouleaux satellites.

Le marché des composants industriels propose une gamme de mécanismes vis-écrou qui comporte :

- écrou lisse à filet trapézoïdal ;
- à billes à filet roulé ;
- à billes à filet rectifié ;
- à recirculation de rouleaux striés ;
- à rouleaux satellites filetés.

La liaison hélicoïdale dans le vérin électrique est réalisée à l'aide d'une vis à rouleaux satellites. Un matériel de démonstration ainsi qu'une vidéo et une maquette numérique sont mis à disposition pour en comprendre le fonctionnement.



- Expliciter le principe de fonctionnement d'une vis équipée d'un écrou avec des rouleaux satellites en vous appuyant sur les composants principaux (écrou, rouleau et vis) et justifier l'utilité des éléments constituants (couronne dentée et guide porte satellites) ;
- Lister les points positifs et négatifs d'une vis équipée d'un écrou avec des rouleaux satellites par rapport aux autres types de composant vis-écrou.

Nota : Un document réponse est mis à disposition pour faciliter la restitution des résultats.

PREMIÈRE PHASE : DEUXIÈME PARTIE (≈ 2h00)

Remarque : Cette partie propose un certain nombre de sujets de réflexion permettant d'élaborer une démarche d'analyse scientifique et technique. Lors de la présentation orale, les réponses apportées ne doivent pas (nécessairement) se faire suivant l'ordre indiqué dans le sujet mais suivant un plan personnel.

Étude 1 : Étude du jeu axial

Objectif

L'objectif de cette étude est d'étudier l'influence du jeu axial dans le mécanisme vis-écrou utilisé sur le positionnement et de l'orientation d'une antenne de communication par satellite.

Présentation

Considérant le défaut majeur dû au jeu axial, il s'agit de vérifier qu'il entraîne un écart de position de l'écrou et donc d'orientation de la plateforme de l'hexapode.

Moyens

- logiciel permettant d'effectuer la simulation numérique ;
- appareillage nécessaire à l'expérimentation et à la mesure.

Activités à réaliser

Activité 4 : Caractérisation du jeu axial dans le mécanisme vis-écrou

Le système vis-écrou proposé pour l'expérimentation est une vis à rouleaux satellites dont la référence est **SRC 21 x 10 R 530 x 450 G5** (cf. catalogue page 52).

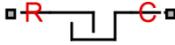
- Proposer un protocole expérimental permettant de mesurer le jeu axial d'une vis.

Nota : pour faciliter la prise de mesure du jeu, considérer que les flancs de filets sont inclinés de 45°. Par voie de conséquence, la valeur du jeu axial est égale à la valeur du jeu radial.

- Comparer la valeur mesurée au jeu axial maximal donné par le constructeur $S_{ap} = 0,04$ mm (cf. catalogue page 52).

Activité 5 : Étude de l'influence du jeu axial sur le positionnement de l'antenne

- Montrer, sans faire de calculs, que plusieurs situations de charge (violentes rafales de vents) peuvent provoquer une inversion de la charge exercée à l'extrémité d'un vérin.
- Introduire dans le modèle multiphysique de la chaîne d'énergie le jeu axial par le bloc « arrêt en translation », simuler le comportement du vérin avec un jeu axial et commenter le résultat ;

 <p>Translational Hard Stop</p>	<p>Ce bloc représente un arrêt mécanique de translation qui restreint le mouvement d'un corps entre les limites supérieure et inférieure. La butée est mise en œuvre comme un ressort et un amortisseur (un arrêt dur est caractérisé par une butée avec une grande rigidité et un amortissement aux limites.</p>
--	---

Pour modéliser ce phénomène, on propose d'introduire dans le modèle multiphysique de la chaîne d'énergie une perturbation cyclique en agissant sur la boîte « Perturbation cyclique ».

- Modifier la boîte « Perturbation cyclique » pour introduire une perturbation cyclique pour prendre en compte des rafales de vent.
- Réaliser une simulation de comportement lors d'un déplacement et commenter le résultat.

Activité 6 : Proposition de compensation du jeu axial

- Décrire les solutions de suppression du jeu axial et les conséquences de cette suppression.

Nota : le constructeur propose à ses clients deux solutions de suppression du jeu axial (cf. catalogue pages 36 à 39)

Étude 2 : Étude des frottements internes

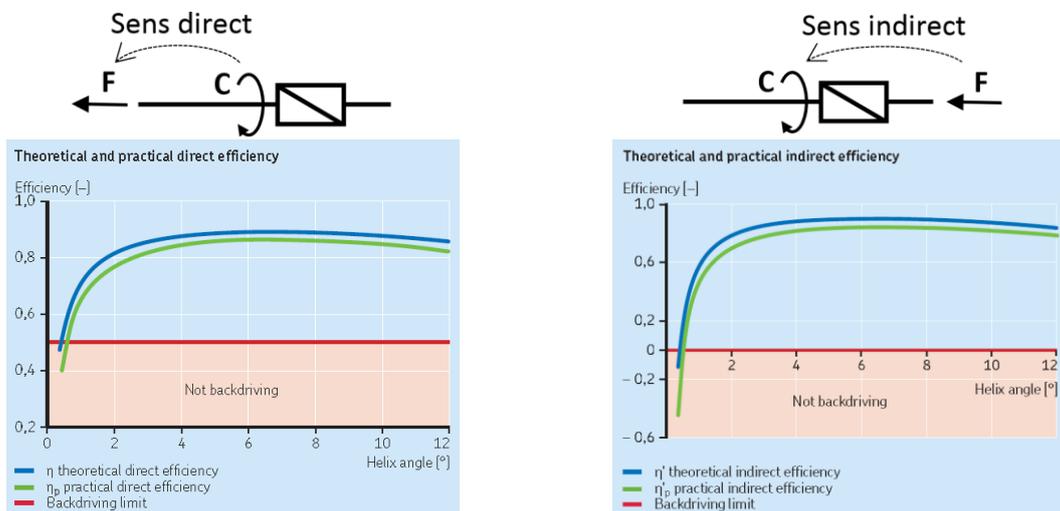
Objectif

L'objectif de cette étude est d'étudier l'influence des frottements internes dans le mécanisme vis-écrou utilisé sur le positionnement et de l'orientation d'une antenne de communication par satellite.

Présentation

D'après le constructeur (cf. catalogue page 22), « la performance de la vis dépend principalement de la géométrie des surfaces de contact, de leur finition et de l'angle d'hélice du filet. Cela dépend également des conditions de travail (charge, vitesse, lubrification, précharge, alignement, etc.).

L'efficacité directe η est utilisée pour définir le couple d'entrée nécessaire pour transformer la rotation en translation. À l'inverse, l'efficacité indirecte η' est utilisée pour définir la charge axiale nécessaire pour transformer la translation en rotation... »



Il s'agit donc d'expliquer l'apparition du phénomène de frottement « sec » entre les constituants du mécanisme vis-écrou et de cibler les sources de ce frottement sous charge, sans ou avec précharge.

Moyens

- Banc de mesure effort axial – couple transmis équipé d'un pont d'extensométrie

Documents ressources

- Notice constructeur (papier ou PDF) et notices de prise en main du pont d'extensométrie.

Activités à réaliser

Activité 7 : Observation et quantification des frottements internes

Pour cette activité, on pourra s'appuyer sur le montage expérimental proposé. Seuls les frottements secs de contact vis-rouleau et rouleau-écrou seront examinés dans cette étude.

- Proposer et mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de vérifier que le mécanisme vis-écrou est le siège de résistances dues au frottement.
- Mesurer la valeur du couple de frottement à l'aide de l'appareil prévu à cet effet.

Activité 8 : Analyse des contacts dans le mécanisme vis-écrou

- Etablir, à partir du document réponse, une relation entre les angles d'hélice du rouleau α_r et de la vis α_v .

Nota : La démonstration peut être abordée par la géométrie des composants en exprimant le fait que l'angle d'hélice du filet du rouleau est identique à celui d'un filet de l'écrou et la relation liant les diamètres.

Activité 9 : sources de frottement (glissement, pivotement roulement)

- Expliquer qu'au contact entre le rouleau et l'écrou, il n'y a pas de glissement ; mais du roulement et surtout du pivotement.

Nota : pour justifier la présence de pivotement entre le rouleau et l'écrou, utiliser le croquis ci-après :



- Justifier alors que le phénomène de frottements génère une résistance au déplacement.

Activité 10 : Prise en compte des frottements dans le modèle multiphysique.

- Vérifier dans le modèle multiphysique que le frottement interne du mécanisme vis-écrou est bien pris en compte et conclure quant à la fidélité du modèle Simulink au vérin électrique réel.

Activité 11 : conclusion.

- Proposer une solution constructive de vérin prenant en compte les études faites auparavant et garantissant les meilleures performances d'orientation de l'hexapode

PREMIÈRE PHASE : TROISIÈME PARTIE (≈ 1h30)

Pour cette troisième partie, le but est de concevoir et d'organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné. Cette séquence prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable et-au cours des activités pratiques.

Il est demandé, au cours de la présentation orale, d'expliciter la démarche méthodologique, de mettre en évidence les informations, données et résultats issus des investigations conduites au cours des activités pratiques qui ont permis de construire la séquence de formation, de décrire et situer la séquence élaborée.

L'exposé devant le jury a une durée maximale de 30 minutes. Il est suivi d'un entretien avec le jury (durée maximale 30 minutes). Le jury n'intervient pas au cours de l'exposé qui doit comporter :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- la synthèse des activités menées dans la deuxième partie de la première phase du TP (durée maximale 5 minutes) ;
- l'exploitation pédagogique (durée maximale 20 minutes).

Au cours de l'entretien, certains points de la présentation peuvent faire l'objet d'une demande de précisions de la part du jury. Il peut être demandé notamment d'expliquer et de justifier les choix de nature didactique et pédagogique qui ont été opérés dans la construction de la séquence de formation présentée. De plus, des échanges peuvent porter sur les compétences communes aux métiers de l'Éducation.

Pour la présentation devant jury, les candidats ont à leur disposition un tableau, un ordinateur et un vidéoprojecteur. Ils disposent d'un poste informatique connecté à Internet et doté des logiciels courants de bureautique. Les éventuels résultats obtenus lors des phases 1 et 2 sont stockés dans un espace qui leur est dédié sur un serveur.

Moyens et documents ressources techniques

- des catalogues du constructeur ;
- des images numériques et des vidéos ;
- des objets de démonstration ;
- des modèles réduits de mécanisme (écorché, 2 demis écrous) ;
- des modèles 3D d'un mécanisme vis-écrou et de la plateforme hexapode ;
- des modèles multiphysiques de comportement d'un vérin ;
- l'appareil de mesure du couple ;
- ...

Moyens et documents ressources pédagogiques

- les référentiels des activités professionnelles et de formation de CPI ;
- les « ressources pour faire la classe » et les guides d'équipement (source Éduscol) ;
- les 4 grands modèles d'apprentissage : transmissif, behaviorisme, constructivisme, socio-constructivisme ;
- les 4 grandes démarches pédagogiques : déductive, inductive, d'investigation, de résolution de problème technique, d'étude de cas, de projet ;
- les notions de séquence et de séance pédagogique ;
- les types d'évaluation des acquis (connaissances et compétences) : diagnostic, formative, sommative ;
- les activités d'apprentissage : cours en classe entière, TD et TP en groupe réduit, co-enseignement... ;
- les environnements et espaces de travail : îlots et travail en équipe d'élèves, supports didactisés et systèmes pluritechnologiques pour l'enseignement, ...

Rapport du jury de l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnologique

1. Présentation de l'épreuve

L'épreuve « Activité pratique et exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnologique » permet au jury d'évaluer l'aptitude des candidats à :

- mettre en œuvre des matériels ou équipements, associés si besoin à des systèmes informatiques de pilotage, de traitement, de simulation, de représentation ;
- conduire une expérimentation, une analyse de fonctionnement d'une solution, d'un procédé, d'un processus, dans la spécialité du concours ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- concevoir et organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné et présenter de manière détaillée un ou plusieurs points-clefs des séances de formation constitutives. Elle prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par les candidats au cours d'activités pratiques relatives à un système technique.

Déroulement de l'épreuve

Cette épreuve, de coefficient 2, dure 6 heures et comporte trois phases.

L'utilisation d'une calculatrice est autorisée (conformément à la circulaire n°99-186).

La phase 1 – Manipulation expérimentale au laboratoire (durée 4 h)

Cette phase, d'une durée totale de 4 h, se déroule en trois parties dans le laboratoire où sont mis à disposition des candidats les différents supports^[1] qui leurs permettent de proposer une séquence pédagogique. Cette dernière est liée aux activités pratiques réalisées.

Première partie (durée ≈ 0h30)

Pour cette partie, les manipulations ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système, support de l'épreuve. À la fin de cette première partie, les examinateurs s'assurent que le support de TP, ses performances dans l'optique de l'épreuve ainsi que la problématique proposée ont bien été assimilés.

Deuxième partie (durée ≈ 2h00)

Pour cette partie, après la présentation du système aux examinateurs, les candidats doivent suivre le questionnement proposé afin de répondre à la problématique proposée dans le TP. Cette partie permet aux candidats, par la mobilisation de compétences caractéristiques du niveau de l'agrégation, de résoudre et analyser les problèmes posés puis d'exploiter les résultats obtenus (hypothèses, modèles, expérimentations, mesures, résultats numériques, etc.) pour justifier les solutions.

Troisième partie (durée ≈ 1h30)

Les candidats doivent préparer la trame détaillée de leur séquence, en s'aidant des manipulations, investigations et analyses effectuées. Le jury attend d'eux qu'ils proposent et mettent éventuellement en œuvre d'autres expérimentations, en précisant un ou plusieurs protocoles de simulation et/ou de mesure permettant de répondre à la problématique afin d'enrichir leur exploitation pédagogique.

Cette phase 1 se déroule dans le laboratoire dans lequel se trouve le support utilisé.

Les candidats disposent de l'ensemble des moyens nécessaires à l'expérimentation et d'un poste informatique, relié à Internet, doté des logiciels courants de bureautique et des logiciels plus spécifiques liés au sujet qui leur est proposé. Ils peuvent stocker les résultats obtenus dans l'espace numérique qui leur est alloué pour l'épreuve.

La phase 2 – Préparation de la présentation (durée 1 h)

Durant cette phase d'une heure, les candidats s'appuient sur la trame de la séquence qu'ils ont construite dans la troisième partie de la phase 1 et préparent l'intervention qu'ils feront devant le jury. Ils disposent d'un poste informatique relié à Internet doté des logiciels courants de bureautique et de tous les résultats de mesures, analyses ou investigations issus de la phase 1. En revanche, ils n'ont plus accès au matériel expérimental et logiciels spécifiques liés au support qui leur ont été proposés d'étudier

La phase 3 – Présentation des travaux devant le jury (durée 1 h)

L'exposé oral est d'une durée maximale de 30 minutes. Le jury n'intervient pas pendant leur exposé. L'entretien avec le jury est d'une durée maximale de 30 minutes.

Les candidats sont amenés au cours de la présentation orale à :

- présenter le système (durée maximale 5 minutes) ;
- présenter une synthèse des activités menées dans la première phase de l'épreuve (durée maximale 5 minutes) ;
- présenter leur exploitation pédagogique (durée maximale 20 minutes).

Au cours de l'entretien, les candidats sont amenés à :

- préciser certains points de leur présentation ;
- expliquer et justifier les choix de nature didactique et pédagogique qu'ils ont opérés.

Pour la présentation devant le jury, les candidats ont à leur disposition un tableau, un ordinateur et un vidéoprojecteur. L'ordinateur est connecté à Internet, les candidats disposent des logiciels courants de bureautique et des résultats obtenus lors des phases 1 et 2 qu'ils ont stockés dans l'espace qui leur est dédié.

Thèmes d'études retenus lors de la session 2021 :

- vérification de performances techniques ;
- validation de procédés et de matériaux ;
- identification et analyse de comportement de structure ;
- qualification d'un processus de réalisation de pièces usinées ;
- validation et choix de solution constructive ;
- étude d'un avant projet industriel

Ces études permettent aux candidats de mettre en œuvre leurs compétences à haut niveau scientifique sur les activités suivantes :

- modélisation comportementale de systèmes ;
- détermination de paramètres significatifs dans une modélisation ;
- analyse critique de modèles et proposition de modifications ;
- validation de modèles ;
- caractérisation d'une chaîne de mesure ;
- simulation et prédiction de performances ;
- mesure de paramètres du comportement de systèmes ;
- identification du comportement de composants, choix ou caractérisation d'un matériau ;
- respect des normes ;
- optimisation de solutions constructives industrielles ;
- industrialisation de produits.

Compétences attendues par le jury

Lors de cette épreuve d'activités pratiques, le jury évalue chez les candidats les compétences professionnelles de l'enseignant suivantes :

- faire preuve d'aptitudes liées à l'ingénierie pédagogique en élaborant une séance d'activités pratiques dans une séquence cohérente, inscrite dans une progression didactique ;
- proposer des activités pratiques ou des modélisations nouvelles, adaptées au niveau imposé et aux objectifs de formation ;
- s'approprier un support technique ;
- s'approprier la problématique associée ou le problème technique posé ;
- élaborer, conduire, justifier un protocole expérimental ;
- exploiter et analyser des résultats expérimentaux ;
- élaborer, justifier, analyser de manière critique un modèle ;
- caractériser les différents écarts (spécifiés, simulés, réalisés) ;
- faire une synthèse au regard de la problématique proposée en s'appuyant sur les expériences menées et les modèles utilisés ;
- évoluer en autonomie en mobilisant toutes ses connaissances et ses compétences ;
- présenter oralement ses travaux avec clarté, précision et rigueur.

2. Analyse globale des résultats

Les résultats pour cette session sont encourageants du point de vue de la préparation des candidats. Ils avaient connaissance des modalités de cette épreuve, certains y étaient bien préparés. Il semble indispensable que les futurs candidats s'imprègnent de l'idée que les activités pratiques peuvent constituer de véritables activités d'apprentissage. Le jury note que certains candidats méconnaissent totalement les référentiels des BTS de la spécialité et le programme pédagogique national du DUT. Les modalités pédagogiques propres à ces filières sont mal maîtrisées.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Concernant la compréhension du système (phase 1 – première partie)

Pour cette première partie, le questionnement est conçu pour permettre une compréhension globale du système et de son fonctionnement, quelles que soient les connaissances préalables des candidats. Cette partie leur permet de montrer leur capacité à aborder le système de façon globale en identifiant sa structure, ses caractéristiques et son fonctionnement. Il est conseillé de s'engager dans l'épreuve de façon ordonnée. Un dossier technique et des ressources documentaires numériques sont à disposition. Cette première phase d'appropriation est fondamentale pour permettre de comprendre la problématique proposée dans la suite des activités (deuxième et troisième partie de la phase 1). Le système proposé peut être le système réel ou un système didactisé. Il est important que les candidats prennent en compte les différences entre ces deux cas de figure. Cette première partie est conçue pour s'approprier rapidement le sujet par une présentation concise du support et du contexte et par une prise en main des logiciels à utiliser. Pour cela, elle est assortie de questions pour permettre aux candidats d'être autonomes pour utiliser le matériel et les logiciels.

Pour cette partie, le jury recommande :

- de lire attentivement l'énoncé fourni ;
- d'analyser et d'identifier les informations pertinentes pour s'approprier le support ;
- d'associer les observations du système à la consultation des ressources documentaires ;
- d'utiliser des outils d'analyse externe et interne pour décrire le fonctionnement et/ou la structure du système ;
- de restituer le système réel dans son contexte.

Concernant les travaux pratiques de résolution des problèmes posés et d'exploitation des résultats (phase 1 – deuxième partie)

Pour cette partie de l'épreuve, les candidats peuvent être amenés à utiliser une instrumentation spécifique dédiée à la mesure de grandeurs physiques sur les systèmes instrumentés. Une aide dans l'utilisation de ces instruments est fournie et le jury assiste les candidats en cas de difficultés matérielles. Les moyens de mesure peuvent être conventionnels ou numériques, isolés ou reliés à un système d'acquisition. L'usage des moyens numériques est de plus en plus développé : lors de cette session, l'exploitation du comportement réel s'est quelquefois opérée par digitalisation du réel, à partir d'un programme de corrélation d'image, cela n'implique cependant pas de négliger les moyens de mesure conventionnels.

Le jury prend en compte le soin et les précautions apportés par les candidats pour réaliser des mesures.

Les candidats peuvent également être amenés à mettre en œuvre différents outils informatiques (logiciels de pilotage et/ou d'acquisition dédiés aux supports, modeleurs volumiques, logiciels de simulation, de choix de matériaux...). La maîtrise de ces logiciels n'est pas exigée, les membres du jury sont présents pour apporter une aide éventuelle à leur utilisation. Ces logiciels proposés peuvent, par leur possibilité de simulation, faciliter la compréhension des phénomènes et permettent d'éviter tout calcul analytique long et complexe. Ils ne dispensent pas les candidats de formuler l'ensemble des hypothèses et des justifications nécessaires. Les modèles numériques et analytiques peuvent également être utilisés pour de l'identification et/ou de la prédiction.

La maîtrise des connaissances fondamentales dans les domaines de la mécanique, de l'automatique, de la conception, de la pré-industrialisation, de l'industrialisation, du contrôle et de la maintenance des produits est indispensable pour mettre en œuvre les différents équipements proposés et pour résoudre les problématiques auxquelles ils sont confrontés.

Les candidats ayant bien réussi la présentation de l'activité expérimentale se sont attachés à :

- analyser le sujet proposé ;
- exploiter la problématique ;
- s'approprier le matériel mis à disposition et identifier les paramètres modifiables ;
- interpréter les résultats obtenus ;
- présenter de manière synthétique le système proposé, la problématique posée, les données et l'environnement matériel ;
- structurer l'exposé à partir d'un plan ;
- présenter la démarche de résolution du problème technique posé ;
- confronter le modèle et le réel ;
- présenter et justifier les protocoles ;
- mettre en œuvre une expérimentation avec les instruments mis à disposition et selon le protocole proposé ;
- corréler les phénomènes physiques observables et les mesures effectuées par des logiciels d'acquisition ou des appareils de mesure ;
- présenter les résultats de façon claire et précise ;
- faire une analyse critique, organisée et pertinente de ces résultats ;
- tirer les conclusions vis-à-vis du problème posé;

La durée de présentation des activités expérimentales n'étant que de dix minutes, l'exposé des points ci-dessus nécessite un effort pour synthétiser les résultats et prendre du recul quant à la problématique posée.

Concernant la réalisation d'une activité pédagogique à caractère expérimental (phase 1 – partie 3)

Un contexte pédagogique et des activités expérimentales étant proposés par le jury, les candidats doivent préparer la trame détaillée de leur séquence pédagogique. Ils devront décrire plus particulièrement une séance pédagogique à caractère expérimental en s'appuyant sur des manipulations pertinentes, partiellement issues des parties 1 et 2.

Le jury recommande aux candidats de :

- préciser les compétences visées et savoirs associés ;
- dégager les objectifs pédagogiques, les connaissances à transmettre et les points-clés de la séquence ;
- définir et justifier la place de la séquence dans la progression didactique du niveau proposé ;
- consulter les programmes, référentiels et documents d'accompagnement fournis ;
- respecter les horaires officiels du niveau d'enseignement demandé ;
- définir les hypothèses de mise en œuvre (nombre d'élèves, de groupes, liste des systèmes présents dans le laboratoire ou l'atelier, etc.) ;
- décrire et justifier la structure de la séquence (cours, travaux dirigés, activités pratiques, projets, synthèse, etc.) ;
- définir les prérequis nécessaires à la mise en place de cette séquence ;
- développer le contenu d'au moins une séance de façon argumentée ;
- structurer la démarche pédagogique permettant le développement de compétences nouvelles au niveau imposé ;
- proposer et justifier les protocoles expérimentaux et/ou de simulation à mettre en œuvre avec les élèves ;
- définir les modalités d'évaluation des compétences visées.

Il est conseillé de ne pas opérer un transfert direct des activités réalisées dans l'épreuve dans la séquence pédagogique.

Le jury conseille aux futurs candidats d'étudier préalablement et attentivement les programmes et les objectifs de formation des baccalauréats STI2D (enseignement spécifique de spécialité ITEC), des BTS et des DUT du champ de la spécialité et leurs évolutions ainsi que les modalités de certification (les programmes ou référentiels sont fournis en annexe aux candidats) et les documents d'accompagnement : ressources pour le lycée général et technologique et guides d'équipement (cf. Éduscol). Il rappelle également que seulement à partir de cette phase, le candidat doit s'attacher à la préparation séquence, en effet une proportion croissante de candidats abordent la préparation lors de la partie précédente au détriment de celle-ci.

Concernant la présentation orale devant un jury

Lors de cette phase de présentation d'une séquence pédagogique à caractère expérimental, les candidats doivent être capables :

- d'expliciter les compétences visées par la séquence en lien avec le programme ou référentiel;
- de situer la séquence dans une progression pédagogique cohérente ;
- d'identifier les savoirs nouveaux ainsi que les points clés de la séquence ;
- de situer la séance à caractère expérimental dans la séquence pédagogique en s'appuyant sur une problématique clairement identifiée ;
- de décrire le ou les systèmes retenus dont le support utilisé en phase 1 et 2 ;
- de proposer des organisations temporelles, matérielles et spatiales de la séquence et de la séance en indiquant l'effectif d'élèves ou d'étudiants dans chacune des activités ;
- de proposer, justifier et valider un ou des protocoles ;
- de décrire les mesures que devront réaliser les élèves ou étudiants ;
- de commenter la démarche pédagogique mise en œuvre ;
- de définir l'enchaînement des activités réalisées par les élèves dans la séance ;

- de définir les documents qui seront proposés aux élèves ;
- de définir les modalités d'évaluation retenues et les critères associés.

Le jury attend également que soient mises en œuvre des compétences professionnelles en matière de communication :

- produire un discours clair, précis et rigoureux en sachant capter l'attention de son auditoire ;
- utiliser un ou des supports adaptés à une présentation orale ;
- être pertinent et réactif dans les réponses aux questions posées ;
- être capable de dégager l'essentiel et de donner du sens aux connaissances développées.

Il constate que de nombreux candidats ne savent pas mettre à profit tout le temps qui leur est imparti pour présenter et justifier leur proposition pédagogique.

Lors de la phase de présentation de l'activité pédagogique, il est important d'aller à l'essentiel et de replacer la séquence proposée dans son contexte. Il n'est pas nécessaire que les candidats présentent de façon exhaustive l'organisation pédagogique générale de l'année de formation correspondante. On ne doit pas se contenter, dans la séquence pédagogique, de réutiliser *in extenso* les expérimentations menées et les résultats obtenus dans la première partie de l'épreuve. La présentation doit permettre d'appréhender rapidement les objectifs de la formation, de comprendre de manière détaillée la séquence et d'explicitier finement la ou les séances en exposant les activités de l'élève ou de l'étudiant.

Concernant le comportement des candidats

Le jury attend des candidats un savoir-être compatible avec les exigences d'un concours de recrutement de cadres A de la fonction publique. Il a constaté que de nombreux candidats manquent de méthode et de rigueur pour appréhender un système dans sa complexité. L'exploitation pédagogique relative à l'approche spécialisée d'un système pluritechnologique ne s'improvise pas, elle doit se préparer.

Certains candidats font une confiance aveugle aux modèles numériques et ont en revanche beaucoup de méfiance vis-à-vis des résultats expérimentaux. Même si c'est une évidence, il n'est pas inutile de rappeler ici qu'une épreuve d'activités pratiques est avant tout une épreuve expérimentale.

Au-delà de la structuration nécessaire à un discours cohérent, les candidats doivent éviter les présentations stéréotypées qui ne permettent pas de mettre en valeur la qualité de leur réflexion personnelle. Le jury apprécie une présentation qui montre la logique de choix des objectifs pédagogiques de chaque séance et la cohérence de leur enchaînement au cours de la séquence proposée. Il recommande aux candidats — dans le cadre d'un recrutement au métier d'enseignant — de s'approprier le référentiel de compétences professionnelles du professeur (BOEN n°30 du 25 juillet 2013 et n°13 du 26 mars 2015). Il conseille de porter une attention particulière sur la maîtrise de la communication et d'éviter les fautes d'orthographe et les expressions maladroites.

4. Conclusion

Le jury est conscient de la difficulté de cette épreuve exigeante mais fondamentale en sciences industrielles de l'ingénieur. Pour cette session de l'agrégation, les résultats de la deuxième épreuve d'admission sont très encourageants. Les candidats des prochaines sessions de cette épreuve trouveront dans le rapport de cette épreuve les éléments relatifs à leur préparation.

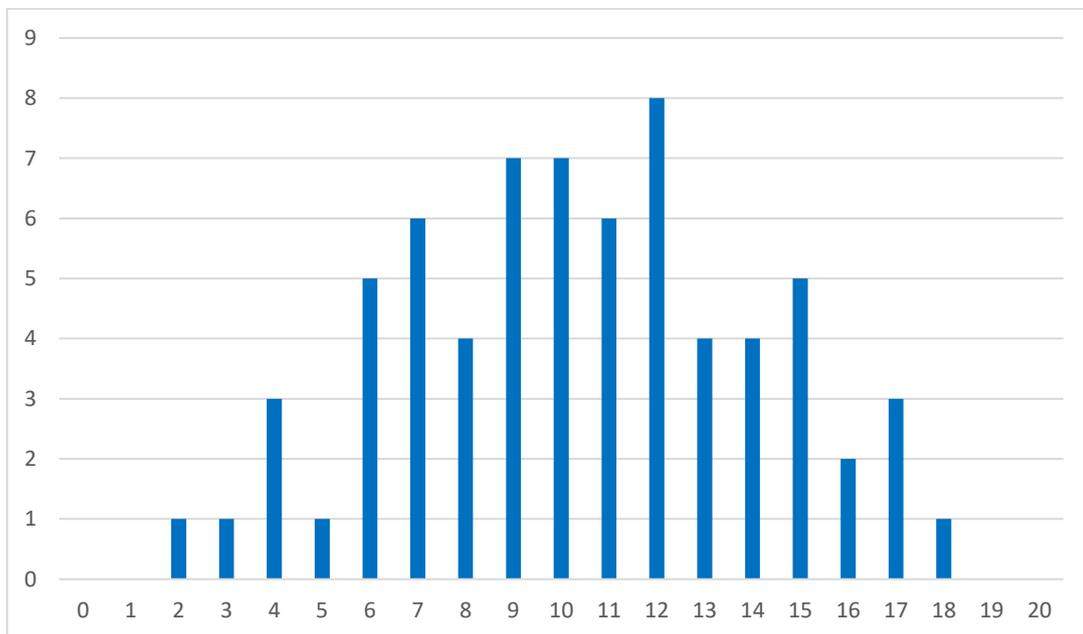
Le jury conseille de préparer cette épreuve en s'appropriant concrètement les différentes évolutions pédagogiques et didactiques proposées dans les référentiels et les documents d'accompagnement qui les complètent, ainsi que par la lecture des articles pédagogiques qui sont publiés régulièrement. La connaissance et l'appropriation de ces réflexions dans l'enseignement quotidien permettront de mieux maîtriser ces concepts et d'éviter de faire des propositions didactiques irréalistes et inappropriées dans le cadre habituel de fonctionnement des établissements scolaires.

5. Résultats

68 candidats ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 11,0/20, et l'écart-type 3,7 avec :

- 18,2 comme meilleure note ;
- 2,9 comme note la plus basse.

Histogramme des notes



[1] Systèmes réels distants ou non avec éventuellement sous-ensembles et composants industriels ; systèmes réels instrumentés ; systèmes didactisés ; systèmes sous forme de maquette et systèmes simulés.

Rapport du jury de l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel

1. Présentation de l'épreuve

Le descriptif de cette épreuve (mise à jour : arrêté du 24 juin 2019) précise :

« L'épreuve consiste en la soutenance devant le jury d'un dossier technique et scientifique réalisé par le candidat dans un des domaines de l'option préparée, suivie d'un entretien.

L'épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de rechercher les supports de son enseignement dans le milieu économique et d'en extraire des exploitations pertinentes pour son enseignement en cycle terminal du lycée, en classes préparatoires aux grandes écoles, en sections de techniciens supérieurs et instituts universitaires de technologie. »

« Durée totale de l'épreuve : 1 heure (présentation : 30 minutes maximum ; entretien avec le jury : 30 minutes) ».

Le jury cherche également à apprécier la capacité du candidat, en qualité de futur agent du service public d'éducation, à se représenter la diversité des conditions d'exercice du métier et les valeurs qui le portent, dont celles de la République.

2. Analyse globale des résultats

De très bons résultats témoignent de la qualité de la préparation et de la prestation de certains candidats. Les dossiers et exposés insuffisamment préparés et/ou inadaptés aux exigences de l'épreuve n'ont pas permis à d'autres candidats de faire preuve de leurs compétences.

Le jury rappelle à tous les futurs candidats que cette seule épreuve ne représente pas un entretien d'embauche.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Le dossier industriel

Le choix du support, produit ou système technologique représentatif des technologies actuelles et en lien avec l'option présentée du concours, est déterminant pour permettre un transfert pertinent vers l'enseignement. Au-delà du choix du support en lui-même, l'identification d'une problématique claire et réelle nécessitant la mise en place d'une démarche d'ingénieur permet de présenter des développements cohérents. La problématique choisie ne doit pas se limiter à une simple vérification des performances indiquées dans le cahier des charges du support.

Le choix de la ou des formations considérées pour l'application pédagogique doit être en adéquation avec la nature du support et la problématique traitée.

Les développements scientifiques et technologiques, du niveau de l'agrégation, doivent être justifiés au regard de la problématique.

Le dossier industriel doit aborder plusieurs dimensions :

- socio-culturelle pour mettre en contexte le problème traité vis-à-vis d'une question sociétale, dont le développement durable ;
- scientifique pour appliquer des démarches, pour conduire et analyser des expérimentations, des modélisations, des simulations ;

- ingénierie pour analyser les résultats des développements scientifiques et apporter des réponses technologiques concrètes aux problématiques.

Ce dossier doit comporter une exploitation pédagogique qui s'appuie sur le support et les problématiques retenus, les investigations scientifiques et technologiques proposées. Elle doit être en cohérence avec le niveau d'enseignement choisi et les programmes ou référentiels associés.

L'exploitation pédagogique doit préférentiellement concerner l'enseignement du second degré : cycle terminal du baccalauréat général spécialité SI, cycle terminal du baccalauréat STI2D, l'enseignement supérieur : STS, CPGE.

Les candidats qui ont fait le choix de présenter une exploitation pédagogique en DUT, ont souvent été en difficulté car ils n'ont pas fait la preuve d'une réelle connaissance de ce cycle de formation, des élèves qui y sont accueillis et des évolutions à venir.

Le dossier présenté doit résulter d'un travail personnel du candidat, les références scientifiques et pédagogiques doivent être citées explicitement dans le texte en lien avec une bibliographie (le jury utilise des moyens de détection de plagiat).

Le niveau de confidentialité ne doit pas nuire à la constitution du dossier et au dialogue avec le jury.

Les fichiers numériques joints (sur clef USB) ne doivent pas se limiter au dossier au format pdf. L'ensemble des fichiers pertinents issus des « outils numériques métiers » doivent être joints. Ces derniers doivent cependant se limiter à ceux qui éclaireront le jury dans les développements proposés par le candidat. Ils ne doivent être un prétexte pour alourdir l'ensemble du dossier : documentations techniques trop complètes et inutiles, cours complet abordant un sujet traité par le candidat...

Le jury apprécie particulièrement :

- les dossiers élaborés autour d'une véritable problématique, clairement définie, résultant d'une relation authentique avec l'entreprise ;
- les dossiers clairement structurés comportant des schémas, graphes et autres images s'appuyant sur une documentation technique authentique et sur une maquette numérique... ;
- les dossiers n'excédant pas 40 pages (annexes comprises), rédigés dans une langue française soignée ;
- les dossiers rédigés de façon très lisible ;
- des démarches scientifiques et technologiques rigoureuses, adaptées, formalisées et étayées par des expérimentations et dont l'analyse critique permet de répondre à la problématique traitée ;
- les « outils métiers » adaptés aux développements scientifiques entrepris et utilisés avec pertinence ;
- un regard critique sur les résultats obtenus ;
- des exploitations pédagogiques cohérentes avec les considérations scientifiques et technologiques développées ;
- des exploitations pédagogiques précises (niveau d'enseignement, contexte, matériel choisi, position de la séquence dans la progression des apprentissages, contenu et déroulement de la séquence, modalités d'évaluation, détail d'une séance, documents pour le professeur, documents pour les élèves...);
- Des rédactions explicatives pour les développements scientifiques et les exploitations pédagogiques claires et concises : inutile de rédiger 2 pages descriptives pour dire ce qui est observable dans un tableau proposé à la suite.
- la capacité à se projeter sur différents niveaux de formation (second degré et enseignement supérieur) ;

- la connaissance et la prise en compte de la diversité de publics que peut rencontrer le professeur au sein d'une même formation ou au gré de ses affectations ;
- les propositions d'exploitations pédagogiques justifiées, mises en perspective dans un cadre interdisciplinaire.

Les dossiers, dans leur majorité, sont bien présentés et construits de manière cohérente. Cependant, le jury regrette que leur structure soit parfois stéréotypée notamment pour la partie pédagogique.

L'exposé et les échanges avec le jury

Durant les 30 minutes de l'exposé, les candidats doivent mettre en valeur leurs qualités de didacticien et de pédagogue pour expliquer leurs choix, leurs démarches et leurs analyses.

Certains candidats profitent de leur convocation plus tardive aux épreuves d'admission pour présenter au jury une exploitation pédagogique plus complète que celle présente dans le dossier transmis. Certains dossiers n'ont d'ailleurs pas d'exploitation pédagogique.

Le jury rappelle qu'il veille à traiter tous les candidats de façon équitable et qu'il évalue donc tous les dossiers de façon équivalente, puisque tous transmis à une date unique et précisée à tous les admissibles.

Les 30 minutes d'échange avec le jury permettent d'approfondir certains points présentés dans le dossier ou durant l'exposé. Ces échanges portent autant sur les développements scientifiques et technologiques engagés que sur les propositions d'exploitations pédagogiques qui en découlent. Le jury élargit son questionnement pour vérifier que les candidats ont entrepris une réflexion sur :

- les finalités de l'enseignement technologique et ses interactions avec d'autres disciplines ;
- les démarches d'apprentissage utilisées pour l'enseignement des sciences industrielles de l'ingénieur ;
- les missions à assurer par un enseignant au sein du système éducatif ;
- la connaissance du contexte d'exercice et le fonctionnement d'un établissement dans son ensemble ;
- les situations au cours desquelles il est en position de faire partager les valeurs de la République en tant qu'agent du service public d'éducation.

Le jury apprécie particulièrement :

- les exposés clairement structurés ;
- une expression maîtrisée, un vocabulaire technique adapté, une fluidité des propos ;
- les supports visuels, notamment les schémas, lisibles et judicieusement utilisés ;
- la bonne écoute des questions, les réponses argumentées et concises ;
- les réponses démontrant la connaissance du contexte d'exercice et du fonctionnement d'un établissement dans son ensemble ;
- les échanges démontrant un vif intérêt pour les évolutions du système éducatif dans son ensemble et de la discipline en particulier.

Il est inutile, lors de l'exposé, de présenter les filières d'enseignement choisies.

Les présentations orales ont été, pour une grande majorité de candidats, préparées soigneusement avec un temps d'exposé maîtrisé.

Afin d'assurer une équité entre tous, quel que soit le support choisi, les candidats ne sont pas autorisés à apporter et présenter des supports physiques (produits, échantillons, maquettes didactiques...). S'ils existent, ces éléments pourront être mis en valeur à travers les documents présentés.

4. Conclusion

Les candidats qui se sont distingués montrent en même temps une solide expertise scientifique et technologique, un esprit d'analyse et de synthèse couplé à une maîtrise pédagogique et didactique de leur discipline.

Le jury a constaté avec satisfaction que, pour la grande majorité des candidats, la dimension éducative du métier de professeur est correctement appréhendée et qu'une réelle réflexion a été menée sur la transmission des valeurs de la République.

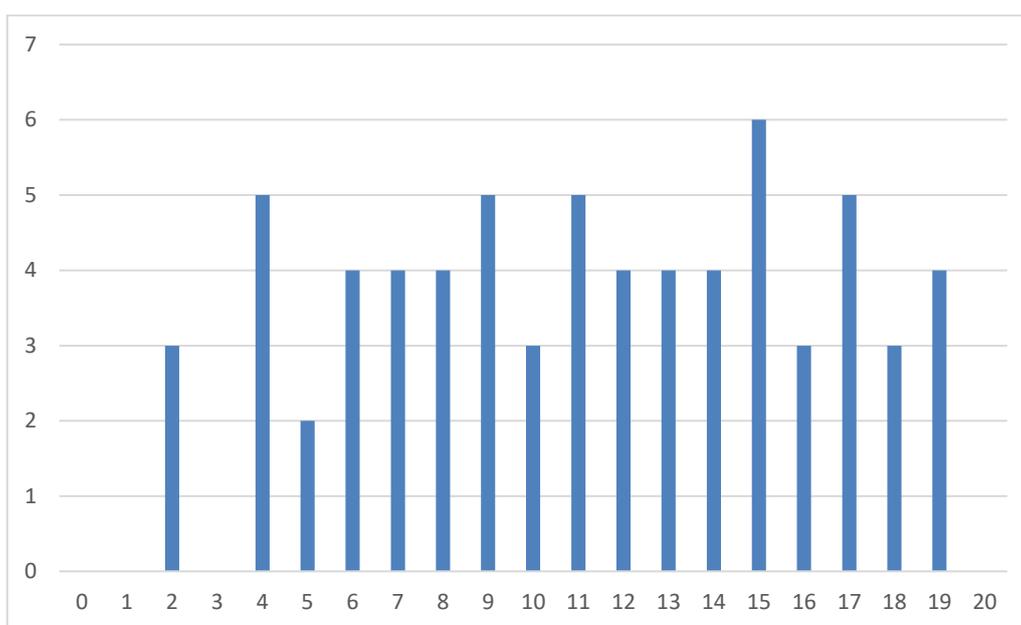
Le présent texte réactualise les recommandations émises dans des rapports de jurys antérieurs, il pourra servir utilement d'appui à la préparation des futurs candidats.

5. Résultats

68 candidats ont été évalués. La moyenne des notes obtenues est de 11,7 et l'écart-type 4,8 avec :

- 19,6 comme meilleure note ;
- 2,2 comme note la plus basse.

Histogramme des notes



Rapport sur la transmission des valeurs et principes de la République

Lors des épreuves d'admission, le jury évalue la capacité des candidats à agir en agent du service public d'éducation, en vérifiant qu'ils intègrent dans l'organisation de leur enseignement :

- la conception des apprentissages des élèves en fonction de leurs besoins personnels ;
- la prise en compte de la diversité des conditions d'exercice du métier et la connaissance réfléchie des contextes associés ;
- le fonctionnement des différentes entités éducatives existant au sein de la société et d'un EPLE (institution scolaire, établissement, classe, équipe éducative...) ;
- les valeurs portées par l'Éducation nationale, dont celles de la République.

Les candidats doivent prendre en compte ces exigences dans la conception des séquences pédagogiques présentées au jury. Il s'agit de faire acquérir, à l'élève, des compétences alliant des connaissances scientifiques et technologiques et des savoir-faire associés, mais également d'installer des comportements responsables et respectueux des valeurs républicaines.

Cet objectif exigeant induit une posture réflexive des candidats lors de la préparation et de la présentation d'une séquence pédagogique. En particulier, les stratégies pédagogiques proposées devront permettre d'atteindre l'objectif de formation visé dans le cadre de « l'école inclusive ». Il est indispensable de donner du sens aux enseignements en ne les déconnectant pas d'un contexte sociétal identifiable. Cela doit contribuer à convaincre les élèves du bien-fondé des valeurs républicaines et à se les approprier.

L'éducation aux valeurs républicaines doit conduire à adopter des démarches pédagogiques spécifiques, variées et adaptées. Il s'agit en particulier de doter chaque futur citoyen d'une culture faisant de lui un acteur éclairé et responsable de l'usage des technologies et des enjeux éthiques associés. À dessein, il est nécessaire de lui faire acquérir des comportements fondateurs de sa réussite personnelle et le conduire à penser et construire son rapport au monde. Les modalités pédagogiques, déployées en sciences industrielles de l'ingénieur, sont nombreuses et sont autant d'opportunités offertes à l'enseignant pour apprendre aux élèves :

- à travailler en équipe et coopérer à la réussite d'un projet ;
- à assumer une responsabilité individuelle et collective ;
- à travailler en groupe à l'émergence et à la sélection d'idées issues d'un débat et donc favoriser le respect de l'altérité ;
- à développer des compétences relationnelles en lui permettant de savoir communiquer une idée personnelle ou porter la parole d'un groupe ;
- à comprendre les références et besoins divers qui ont conduit à la création d'objets ou de systèmes à partir de l'analyse des « modes », des normes, des lois... ;
- à différencier, par le déploiement de démarches rigoureuses, ce qui relève des sciences et de la connaissance de ce qui relève des opinions et des croyances. L'observation de systèmes réels, l'analyse de leur comportement, de la construction ou de l'utilisation de modèles multiphysiques participent à cet objectif ;
- à observer les faits et situations divers suivant une approche systémique et rationnelle ;
- à adopter un positionnement citoyen assumé au sein de la société en ayant une connaissance approfondie de ses enjeux au sens du développement durable.

L'impact environnemental, les coûts énergétiques, de transformation et de transport, la durée de vie des produits et leur recyclage, sont des marqueurs associés à privilégier ;

- à réfléchir collectivement à son environnement, aux usages sociaux des objets et aux conséquences induites ;
- à comprendre les enjeux sociétaux liés au respect de l'égalité républicaine entre hommes et femmes ;
- ...

Ces différentes approches permettent d'évaluer la posture du candidat par rapport au besoin de transmettre les valeurs et les principes de la République à l'école. La dimension civique de l'enseignement doit être explicite.

Pour prendre en compte cette dimension du métier d'enseignant dans la conception de séquences pédagogiques, les candidats peuvent s'appuyer sur différents textes réglementaires et ressources pédagogiques disponibles :

- les programmes d'enseignement moral et civique ;
- le socle commun de connaissances, de compétences et de culture ;
- l'instruction relative au déploiement de l'éducation au développement durable dans l'ensemble des écoles et établissements scolaires pour la période 2015-2018 (NOR : MENE1501684C, circulaire n° 2015-018 du 4-2-2015, MENESR – DGESCO) ;
- le parcours Avenir ;
- la banque de ressources « Pour une pédagogie de la laïcité à l'école » - Abdenour BIDAR - la documentation française 2012 ;
- les ressources numériques en ligne du réseau de création et d'accompagnement pédagogiques CANOPÉ – éducation et société ;
- les ressources du portail national des professionnels de l'éducation – Éduscol – établissements et vie scolaire ;
- référentiel de compétences des métiers du professorat et de l'éducation – education.gouv.org.