



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

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Rapport du jury

Concours : agrégation externe

Section : sciences industrielles de l'ingénieur

Option : ingénierie mécanique

Session 2020

Rapport de jury présenté par : Laurent CHAMPANEY, président du jury

Sommaire

Remerciements	3
Résultats statistiques de la session 2020	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	18
Éléments de correction de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	21
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	36
Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	45
Rapport du jury de l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel	49

Remerciements

Le lycée La Martinière-Monplaisir à Lyon a accueilli les épreuves d'admission de cette session 2020 de l'agrégation externe section de sciences industrielles de l'ingénieur, option sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique, qui se sont déroulées dans d'excellentes conditions du 17 juin au 20 juin 2020 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 ainsi que pour le support technique sans faille qui leur a été fourni dans un contexte sanitaire complexe.

Ces remerciements s'adressent aussi à monsieur le Proviseur du Lycée Raspail à Paris qui a accueilli les membres du jury pour la réunion préparatoire du 11 octobre 2019.

Résultats statistiques de la session 2020

Inscrits	Nombre de postes	Présents aux trois épreuves d'admissibilité	Admissibles	Admis
466*	35	241	95**	35

*dont 85 candidats à l'agrégation marocaine
** dont 17 candidats à l'agrégation marocaine

Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le premier candidat admissible	19,1
Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le dernier candidat admissible	8,4
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le premier candidat admis	19,5
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le dernier candidat admis	10,8

Avant-propos

La session 2020 de l'agrégation de Sciences Industrielles de l'Ingénieur a été organisée en situation de pandémie de Covid-19. Si les épreuves d'admissibilité ont pu être réalisées dans les mêmes conditions que celles des sessions précédentes, le format de la phase d'admission a dû être adapté. Pour des raisons sanitaires évidentes et conformément aux dispositions de l'arrêté du 27 mai 2020 portant adaptation des épreuves de certaines sections du concours externe et du concours externe spécial de recrutement de professeurs agrégés de l'enseignement du second degré ouverts au titre de l'année 2020 en raison de la crise sanitaire née de l'épidémie de covid-19, les deux épreuves d'admission « Exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnologique » et « Activité pratique et exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnologique » ont été supprimées. Seule l'épreuve orale de dossier industriel a été conservée. Ce rapport ayant aussi pour but d'aider les préparateurs des sessions suivantes, les deux épreuves d'admission de travaux pratiques qui n'ont pas été réalisées cette année sont tout de même citées dans cet avant-propos. Malgré ces adaptations du concours, l'évaluation des candidats a pu être menée dans des conditions conformes aux exigences des jurys expérimentés de chacune des quatre options de l'agrégation externe de Sciences Industrielles de l'Ingénieur.

La mutualisation d'épreuves entre les différentes options est un marqueur fort de la transversalité attendue chez un agrégé de Sciences Industrielles de l'Ingénieur. En particulier, le partage de connaissances et de compétences des agrégés de l'option Ingénierie Mécanique avec ceux de l'option Ingénierie Informatique est un signe important du besoin croissant de compétences numériques en ingénierie mécanique. D'ailleurs, la maîtrise des techniques numériques d'acquisition, d'exploitation et de digitalisation est maintenant attendue chez un agrégé de ce domaine.

Dans cet avant-propos, je souhaite surtout insister 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 »*. Les coefficients doubles des épreuves d'admission et leur définition mettent clairement en évidence la nécessité d'axer la préparation sur l'élaboration de séquences pédagogiques. Les compétences acquises en ingénierie pédagogique via cette préparation seront ré-exploitable dans les futures activités de formation des candidats.

Les deux travaux pratiques sont des épreuves exigeantes qui imposent une préparation importante. Ceux qui enseignent déjà au collège ou au lycée ne peuvent se reposer sur les acquis de leur expérience professionnelle pour réussir ces deux épreuves. La troisième épreuve d'admission mérite une attention particulière. Constituer un dossier demande du temps et impose de commencer à l'élaborer dès l'inscription au concours. L'objectif du dossier est **de vérifier que le candidat est capable de réaliser un transfert de technologie du milieu de l'entreprise vers l'Éducation Nationale, afin d'enrichir son enseignement par des exploitations pertinentes de supports techniques modernes et innovants. Il n'est pas demandé aux candidats de concevoir ou de reconcevoir un système ou un sous-système pluri-technologique**. Il est regrettable de voir que certains dossiers restent éloignés de problématiques technologiques ou que certaines exploitations pédagogiques sont peu pertinentes, malgré la qualité du support.

Il est conseillé aux futurs candidats et à leurs formateurs de lire attentivement la définition des épreuves, décrite dans les arrêtés et les commentaires du jury qui figurent dans le présent rapport. Le programme de la prochaine session de l'agrégation peut être consulté ici :

https://media.devenirensignant.gouv.fr/file/agregation_extern_e_21/46/4/p2021_agreg_ext_sii_1328464.pdf

La description de chaque épreuve des concours prévoit 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* ». Il est demandé à tous les présidents des concours de recrutement « *de veiller à ce que dans ce cadre, les thématiques de la laïcité et de la citoyenneté trouvent toute leur place* » afin « *que l'École soit en mesure, par la formation et le recrutement de nos futurs enseignants, de valider la mission première que lui fixe la Nation, à savoir de transmettre et de faire partager aux élèves les valeurs et principes de la République ainsi que l'ensemble des dispositions de la Charte de la laïcité, portant notamment égale dignité de tous les êtres humains et liberté de conscience de chacun* ». Globalement, les candidats ont réagi correctement aux questions posées à l'oral.

Les candidats ont à leur disposition des ordinateurs reliés à Internet. Les sites consultés par les candidats sont surveillés. Internet doit être utilisé comme une base documentaire pour l'élaboration d'une séquence pédagogique, comme c'est le cas pour un professeur en fonction, et non pas comme une possibilité d'optimiser une épreuve d'agrégation par le téléchargement de documents prêts à l'emploi. **Seuls les sites ne nécessitant pas d'identification, indexés et accessibles par tous, sont autorisés.**

Cette session 2020 est dans la continuité des précédentes puisque 35 candidats ont été déclarés admis alors que 241 ont participé aux trois épreuves d'admissibilité. Le nombre de femmes candidates est toujours faible mais elles ont mieux réussi que les hommes cette année : 11 ont été déclarées admissibles et 9 sont admises, ce qui représente près de 25% des reçus.

Cette session s'est encore révélée être d'un excellent niveau, les candidats admis ayant quasiment tous plus de 10,5/20 et cinquante candidats admissibles ayant obtenu une moyenne supérieure à 09/20. Le jury félicite les candidats et leurs formateurs. Cette année et malgré l'absence des épreuves de travaux pratiques, le classement à l'issue des épreuves d'admissibilité a été encore bousculé après les épreuves d'admission. Cela prouve que celles-ci doivent être préparées dès l'inscription au concours.

L'agrégation est un concours prestigieux qui impose de la part des candidats un comportement et une présentation irréprochables. Le jury reste vigilant sur ce dernier aspect et invite les candidats à avoir une tenue et une posture adaptées aux circonstances particulières d'un concours de recrutement de cadres de catégorie A de la fonction publique qui, lorsqu'ils seront en poste, seront porteurs de l'image de leur discipline et de celle de l'institution. Au moment où les valeurs de la République sont mises en avant jusque dans les questions posées aux candidats lors des épreuves d'admission, il est heureux de voir que les candidats ont adapté leur posture, en particulier lors des échanges avec le jury.

Pour conclure cet avant-propos, je conseille fortement une lecture détaillée de ce rapport aux futurs candidats de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur ainsi qu'à leurs formateurs.

Laurent CHAMPANEY, Président du jury

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

Présentation de l'épreuve

Arrêté du 19 avril 2016

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

L'épreuve est commune à toutes les options. Les candidats composent sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie.

Elle 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 pluritechnique automatique.

Sujet

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

https://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/agregation_externer/95/6/s2020_agreg_externer_sii_1_125_9956.pdf



Éléments de correction

Question 1

En considérant la consommation $E_{\text{annuelle consommée en Bretagne}} = 11,27 \text{ TW}\cdot\text{h}$ (particuliers et professionnels) pour toute la Bretagne, la consommation énergétique annuelle de l'île d'Ouessant est par un modèle proportionnel :

$$E_{\text{annuelle consommée sur l'île Ouessant}} = E_{\text{annuelle consommée en Bretagne}} \times \frac{\text{Nbre habitants sur l'île Ouessant}}{\text{Nbre habitants total en Bretagne}}$$
$$E_{\text{annuelle consommée sur l'île Ouessant}} = 11,27 \cdot 10^{12} \times \frac{1000}{3,2 \cdot 10^6} = 3,5 \cdot 10^9 \text{ W}\cdot\text{h} = 3,5 \text{ GW}\cdot\text{h}$$

En considérant la consommation $E_{\text{annuelle consommée en Bretagne}} = 22,29 \text{ TW}\cdot\text{h}$ le même modèle de proportionnalité donne comme résultat $E_{\text{annuelle consommée sur l'île Ouessant}} = 7 \text{ GW}\cdot\text{h}$ mais le résultat est surestimé car il n'y a pas de grande industrie sur l'île.

Question 2

L'électricité de l'île d'Ouessant est produite actuellement à partir de fioul :

$$M_{\text{CO}_2 \text{ produite sur l'île Ouessant}} = E_{\text{annuelle consommée sur l'île Ouessant}} \cdot M_{\text{CO}_2 \text{ par MW de fioul}}$$

$$M_{\text{CO}_2 \text{ produite sur l'île Ouessant}} = 3,5 \cdot 10^3 \times 0,67 = 2\,345 \text{ tonnes de CO}_2$$

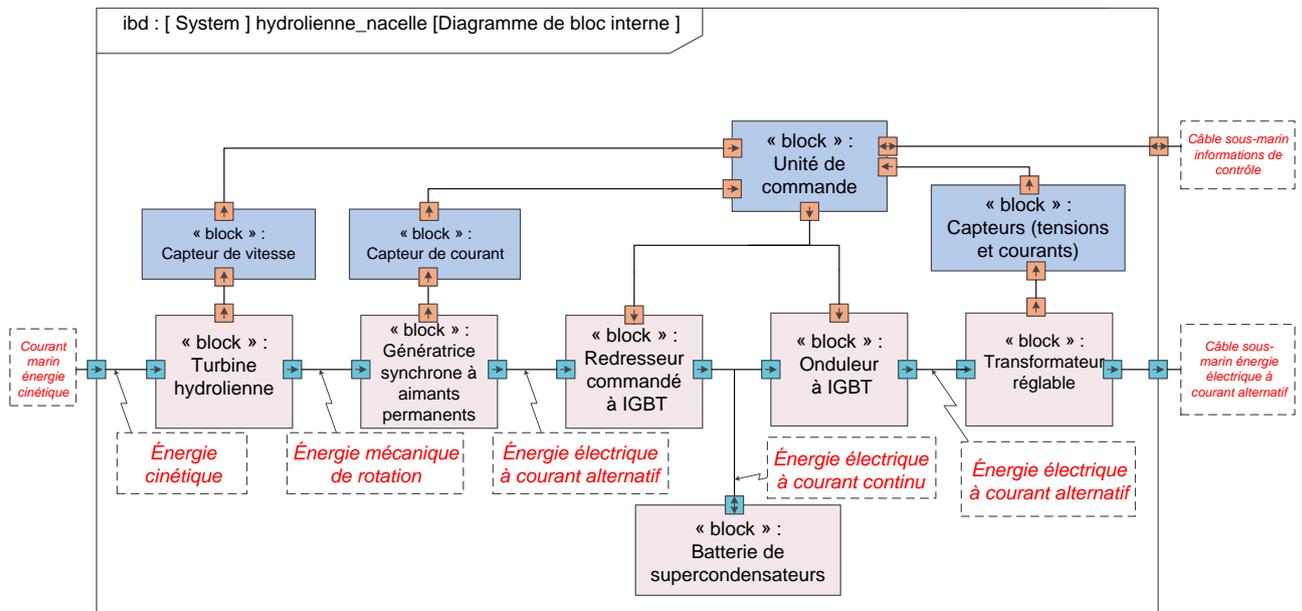
Question 3

Il faut comparer $M_{\text{CO}_2 \text{ par kWh de fioul}}$ et $M_{\text{CO}_2 \text{ par kWh moyen en métropole}}$

$$0,67 \text{ tCO}_2 \cdot \text{MWh}^{-1} = 670 \text{ gCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1} \text{ et } 90 \text{ gCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$$

Les émissions de CO_2 de l'île d'Ouessant sont donc 7,5 fois supérieures à la moyenne. Il est donc nécessaire de décarboner la production électrique de l'île.

Question 4



Question 5

Composant	Nature de la puissance sortante	Grandeur de flux		Grandeur d'effort	
		Nom de la grandeur physique	Alternative / continue	Nom de la grandeur physique	Alternative / continue
Turbine	mécanique	Fréquence de rotation	Continue $N \in [5 ; 15] \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$	Couple de forces	continue
Génératrice	électrique	Courant électrique	Alternative $F = pN/60$ $F \in [10 ; 30] \text{ Hz}$	Tension électrique	Alternative $F = pN/60$ $F \in [10 ; 30] \text{ Hz}$
Onduleur	électrique	Courant électrique	Alternative $F = 50 \text{ Hz}$	Tension électrique	Alternative $F = 50 \text{ Hz}$

Question 6

La génératrice fournit un courant alternatif et une tension alternative qui ne répondent pas à l'exigence Id 1.6 du diagramme des exigences « puissance électrique sous tension triphasée 50 Hz ».

Question 7

Valeur1 : I valeur efficace de $i(t)$ en Ampère (A) ;

Valeur2 : P puissance active = $\langle 3v(t).i(t) \rangle$ valeur moyenne des puissances instantanées en Watt (W) ;

Valeur3 : F_p facteur de puissance, nombre sans unité.

Question 8

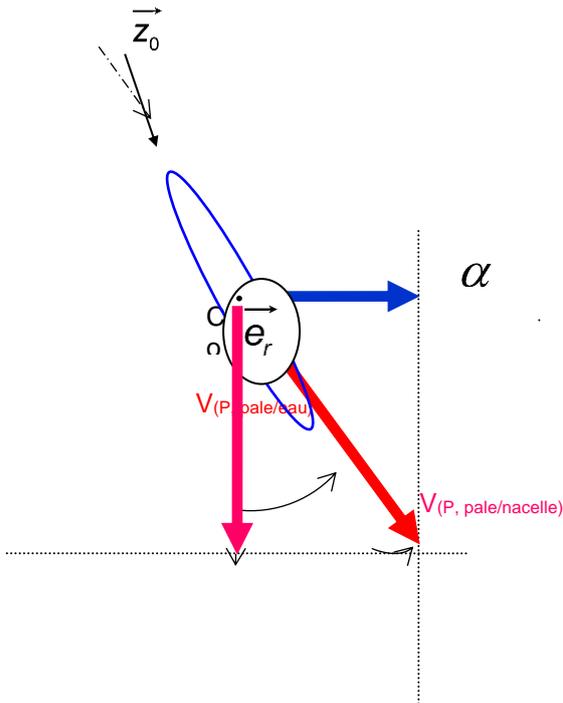
Composition des vitesses : $\overrightarrow{V_{(P \in \text{pale/eau})}} = \overrightarrow{V_{(P \in \text{pale/nacelle})}} + \overrightarrow{V_{(P \in \text{nacelle/eau})}}$

$$\overrightarrow{V_{(P \in \text{nacelle/eau})}} = -\overrightarrow{V_{(P \in \text{eau/nacelle})}} = V_C \cdot \vec{z}_0$$

$$\overrightarrow{V_{(P \in \text{pale/nacelle})}} = \overrightarrow{PO} \wedge \overrightarrow{\Omega_{(\text{turbine/nacelle})}} = -r \cdot \vec{e}_r \wedge \Omega \vec{z}_0 = r \cdot \Omega \cdot \vec{e}_\theta$$

Finalement :

$$\overrightarrow{V_{(P \in \text{pale/eau})}} = r \cdot \Omega \cdot \vec{e}_\theta + V_C \cdot \vec{z}_0$$



Question 9

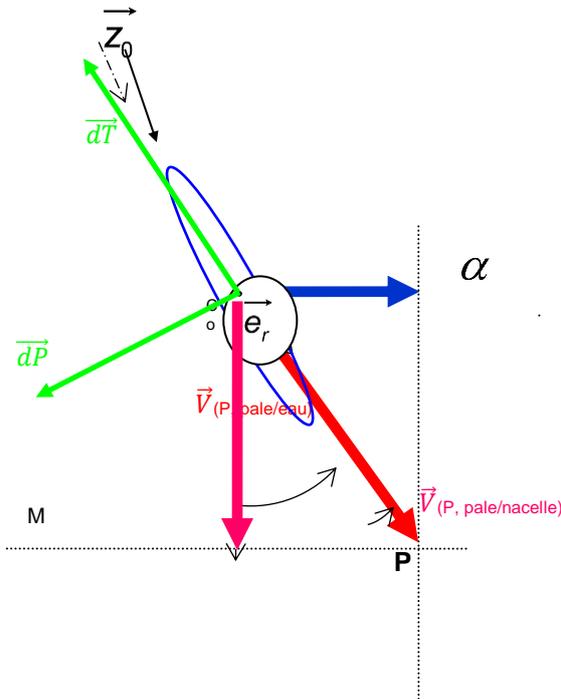
$$\begin{cases} V_{(P \in \text{pale/eau})} \cos(i + \alpha) = r\Omega \\ V_{(P \in \text{pale/eau})} \sin(i + \alpha) = V_C \end{cases} \Rightarrow \tan(i + \alpha) = \frac{V_C}{r\Omega} \Rightarrow i = \arctan\left(\frac{V_C}{r\Omega}\right) - \alpha$$

Autre méthode : $\|\vec{V}_{(P \in \text{pale/eau})}\| = \sqrt{(r\Omega)^2 + V_C^2}$ d'où $i = \arccos\left(\frac{r\Omega \cos\alpha + V_C \sin\alpha}{\sqrt{(r\Omega)^2 + V_C^2}}\right)$

Question 10

$$\left\{ \begin{aligned} \|\overrightarrow{dT}\| &= \frac{1}{2} \rho \cdot dS \cdot C_x \cdot V_C^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot dr \cdot \sin(i) \cdot C_x \cdot (r^2 \Omega^2 + V_C^2) \\ \|\overrightarrow{dP}\| &= \frac{1}{2} \rho \cdot dS \cdot C_z \cdot V_C^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot dr \cdot \sin(i) \cdot C_z \cdot (r^2 \Omega^2 + V_C^2) \end{aligned} \right.$$

Question 11



Question 12

$$d\Gamma = (\overrightarrow{OM} \wedge \overrightarrow{F}(\text{eau} \rightarrow \text{pale})) \cdot \overrightarrow{Z_0} = (\overrightarrow{z_0} \wedge \overrightarrow{OP}) \cdot \overrightarrow{F}(\text{eau} \rightarrow \text{pale}) = r \cdot \overrightarrow{e_\theta} \cdot \overrightarrow{F}(\text{eau} \rightarrow \text{pale})$$

$$d\Gamma = r \cdot \overrightarrow{e_\theta} \cdot (\overrightarrow{dT}(\text{eau} \rightarrow \text{pale}) + \overrightarrow{dP}(\text{eau} \rightarrow \text{pale}))$$

$$= r \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot dr \cdot \sin(i) \cdot (r^2 \Omega^2 + V_C^2) \left(C_x \cdot \cos(\pi - (\alpha + i)) + C_z \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha + i)\right) \right)$$

$$\Rightarrow \|\overrightarrow{d\Gamma}\| = r \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot dr \cdot \sin(i) \cdot (r^2 \Omega^2 + V_C^2) (-C_x \cdot \cos(\alpha + i) + C_z \cdot \sin(\alpha + i))$$

Autre solution

$$\overrightarrow{d\Gamma} = \overrightarrow{OP} \wedge (\overrightarrow{dP} + \overrightarrow{dT})$$

$$\overrightarrow{d\Gamma} = r \cdot \overrightarrow{e_r} \wedge \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot dr \cdot \sin(i) \cdot (r^2 \Omega^2 + V_C^2) \cdot \left[C_z \cdot (-\cos(\alpha + i) \overrightarrow{z_0} + \sin(\alpha + i) \overrightarrow{e_\theta}) + C_x \cdot (\cos(\alpha + i) \overrightarrow{e_\theta} - \sin(\alpha + i) \overrightarrow{z_0}) \right]$$

$$\overrightarrow{d\Gamma} \cdot \overrightarrow{z_0} = r \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot L \cdot dr \cdot \sin(i) \cdot (r^2 \Omega^2 + V_C^2) \cdot [C_z \cdot \sin(\alpha + i) - C_x \cdot \cos(\alpha + i)]$$

Question 13

Le cahier des charges impose de convertir l'énergie cinétique à marée montante et à marée descendante. Donc l'hydrolienne va tourner dans les deux sens de rotation, il est indispensable de choisir une forme elliptique ou en amande.

Question 14

La finesse est définie par le rapport $f = \frac{c_z}{c_x}$.

Soit un point M appartenant à la polaire d'Eiffel. Soit α l'angle entre la droite \overline{OM} (passant par l'origine et tangente au point M à la polaire d'Eiffel) et l'horizontale. Dans ce cas la finesse peut être définie par le rapport $f = \tan \alpha$. La finesse est bien maximale si la tangente à la polaire d'Eiffel passant par l'origine possède un angle α maximal.

La comparaison des différents profils montre que pour :

- les profils en amande de toutes les épaisseurs, la finesse est inférieure à celle des autres profils ;
- le profil en ellipse d'épaisseur 15% permet d'augmenter le coefficient de portance entre 3 et 4 % par rapport à celui de l'ellipse d'épaisseur 10% mais avec un coefficient de trainée supérieur.

D'où la nécessité de regarder la polaire d'Eiffel qui montre que le coefficient directeur de la tangente passant par l'origine du profil ellipse 10% est supérieur à celui de la tangente à l'ellipse 15%, donc que la finesse du profil à 10% est supérieure à la finesse du profil à 15%.

Conclusion : le choix de profil de pale est elliptique d'épaisseur 10%.

Question 15

Pour chaque valeur il existe une valeur optimale de l'angle α (optimale dans le sens où bien évidemment, le but est de rendre le couple maximal). Cette valeur optimale de α dépend de la distance radiale r le long de la pale. Pour optimiser le rendement de la pale, la solution constructive est d'avoir une pale « vrillée », avec un angle α plus important près de l'axe de rotation. Par ailleurs le couple élémentaire sur chaque élément est plus important loin de l'axe, ce qui est normal car la vitesse $r\Omega$ est supérieure d'une part, et parce que l'on est plus loin de l'axe d'autre part (« bras de levier » plus important).

Il est également possible d'accepter un angle de calage constant à condition de caler pour la zone la plus productive, c'est à dire loin du moyeu, mais cette solution est moins satisfaisante.

Question 16

Il y a 6 pales, il faut donc additionner les 6 moments créés par chaque pale.

Et chaque moment créé par chaque pale est calculé par l'intégrale du moment élémentaire en fonction de l'abscisse radiale r : $\Gamma = \sum_{i=1}^6 \int_2^5 d\Gamma_i$ ou $6 \times \int_2^5 d\Gamma_i$

Question 17

Pour une vitesse de courants marins $V_C = 4,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ une puissance de $P = 1 \text{ MW}$ pour une vitesse de rotation de la turbine d'environ $13 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

Pour obtenir le couple, $P = \Gamma \cdot \Omega$ ou une lecture sur le DR3.

Le couple Γ est de l'ordre de $734 \text{ k} \cdot \text{N} \cdot \text{m}$, et $\lambda_{opt} = \frac{R \cdot \Omega}{V_C} = \frac{5 \times 13 \times 2\pi}{4,2 \times 60} = 1,62$

Question 18

Le cas le plus "défavorable" (worst case) pour l'apparition du phénomène de cavitation est lorsque :

- la pression de vapeur saturante est la plus élevée (c'est-à-dire à température élevée ici 15°C). La lecture permet de définir une pression de vapeur saturante de 2100 Pa ;
- pour une température donnée la pression locale est minimale, P_{atm} faible 990 h · Pa ;
- la pression hydrostatique est faible : $h_{minimal} = 15 \text{ m}$, avec un creux de houle important de (-8 m). $h = 15 - 8 = 7 \text{ m}$;
- la pression hydrodynamique est faible : $C_{p_{minimum}} = -19,8$ et une vitesse spécifique faible $\lambda = 1,16$.

Question 19

La vitesse amont à partir de laquelle il peut y avoir un risque de cavitation vérifie : $P_{locale} \leq P_{vap_sat}$

$$P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{p_{min}} \cdot V^2 \leq P_{sat} \Rightarrow \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{p_{min}} \cdot V^2}_{\leq 0} \geq \underbrace{P_{sat} - P_{atm} - \rho \cdot g \cdot h}_{\leq 0}$$

$$V \geq \sqrt{\frac{P_{vap_sat} - P_{atm} - \rho g h}{\frac{1}{2} \rho C_{p_{min}}}} \Rightarrow V_{min} = \sqrt{\frac{P_{vap_sat} - P_{atm} - \rho g h}{\frac{1}{2} \rho C_{p_{min}}}}$$

Dans le pire des cas, il y a risque de cavitation pour une vitesse de courant de marée supérieure à :

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2100 - 99000 - 1025 \times 9,81 \times (15 - 8)}{\frac{1}{2} \times 1025 \times (-19,86)}} = 4,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Question 20

La Sabella D10 est placée à 40 mètres de fond. La profondeur d'immersion de l'hydrolienne écarte le risque de cavitation. Le calcul pour $h = 40 - 8 = 32 \text{ m}$ et $\rho = 1035 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ la masse volumique de l'eau moyenne entre 1 et 4 bars : $V_{cmin} = 6,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \gg 4,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Cette vitesse n'est jamais atteinte au fond du Fromveur donc il n'y a aucun risque de cavitation.

Question 21

La cavitation peut être éliminée en augmentant C_p (diminution en valeur absolue), ce qui est obtenu en augmentant la vitesse spécifique λ , donc en augmentant la vitesse de rotation de la turbine.

Le moyen mis en œuvre pour sécuriser l'hydrolienne est de mettre la turbine à l'arrêt avec des freins mécaniques si les courants marins excèdent $4,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Question 22

Exigence 1 : développer la puissance maximale possible pour le courant de marée amont à un instant donné ;

Exigence 2 : éviter l'apparition de phénomènes contraignants, comme la cavitation ;

Pour cela l'étude a montré qu'il fallait maintenir une vitesse spécifique de fonctionnement $\lambda_{opt} = 1,6$.

La grandeur d'entrée est la vitesse amont du courant de marée V_c imposée par les phénomènes extérieurs ;

La grandeur de sortie à commander est la vitesse de rotation de la turbine Ω .

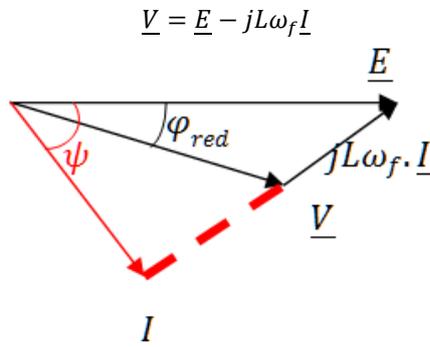
Question 23

$$\omega_{gen_13} = p \Omega = 120 \times 13 \times 2 \times \frac{\pi}{60} = 163,4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Question 24

La génératrice est synchrone, la pulsation des forces électromotrices générées $\omega_{gen} = p \Omega$ doit être égale à la pulsation imposée par le redresseur ω_{red} afin que le couple ait une valeur moyenne non nulle et ne contienne pas de termes de pulsation.

Question 25



Question 26

$$P_{gen} = 3EI \cos(\psi)$$

$$Q_{gen} = 3EI \sin(\psi)$$

$$\psi = 0 \text{ maximise } P \text{ (à } I \text{ constant et donc } \Omega \text{ constant)}$$

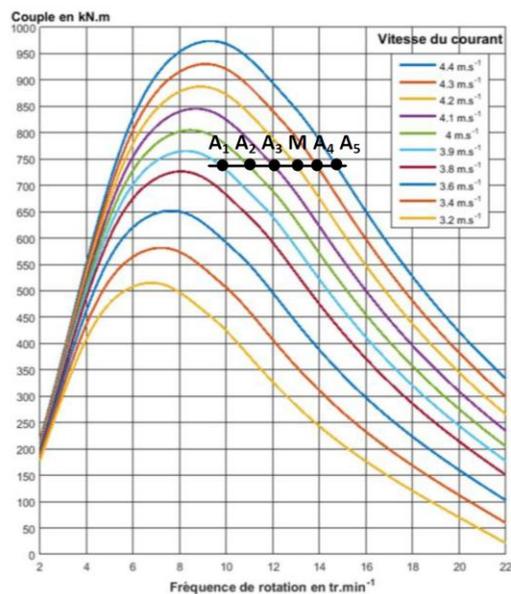
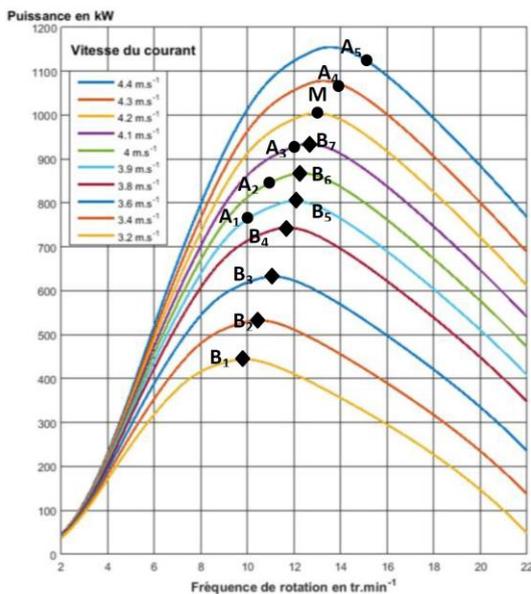
Question 27

Il faut augmenter le couple Γ_T appliqué à la turbine pour diminuer la vitesse Ω , donc augmenter le courant I . Ceci est obtenu en augmentant $\underline{E}-\underline{V}$, donc en diminuant \underline{V} . Il faut donc diminuer S_{amp} pour ralentir la turbine.
Il n'y a pas d'autre moyen de réglage, car les pales ne sont pas orientables, le flux incident n'est pas contrôlable.

Question 28

$$P_M = 1 \text{ MW}, N_M = 13 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1} \Rightarrow \Gamma_M = 734 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Question 29



Tracé d'une droite horizontale à $740 \text{ kN} \cdot \text{m}$, il existe 2 points d'intersection avec chaque caractéristique de la turbine. Il faut retenir les points de droite pour le point de fonctionnement car c'est celui qui est stable. $[A_1, \dots, A_5]$.

Point de fonctionnement à $V_C = 3,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($9,5 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$)

Point de fonctionnement à $V_C = 4,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($15,5 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$)

$V_C \in [3,9 ; 4,4]$

Pour des courants inférieurs à $3,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, le couple résistant est supérieur au couple que la turbine peut fournir, l'équilibre des couples est impossible, pas de point de fonctionnement, la turbine cale.

Question 30

Positionner les points $[A_1, \dots, A_5]$ et lire la puissance $P \in [750 \text{ kW}; 1150 \text{ kW}]$

Question 31

Les points ne sont pas optimaux car ils ne sont pas au maximum des courbes de puissance alors que l'installation est conçue pour fournir de la puissance, et non pas du couple. Une stratégie de recherche du maximum de puissance serait meilleure.

Pour $V_C > 4,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ il y a dépassement des 1000 kW ainsi que de la fréquence maximale. Cela peut être acceptable sur un temps limité mais pas en fonctionnement permanent.

Cette stratégie de commande à couple constant n'est pas optimale car elle ne permet pas d'extraire le maximum de puissance quand les vitesses de courants diminuent.

Question 32

$[B_1, \dots, B_7]$ (cf figure question 29).

Question 33

Au delà d'une vitesse de courant de $4,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, le MPPT donne des puissances qui dépassent 1000 kW . Ce n'est pas acceptable de manière permanente.

Aménagements acceptés :

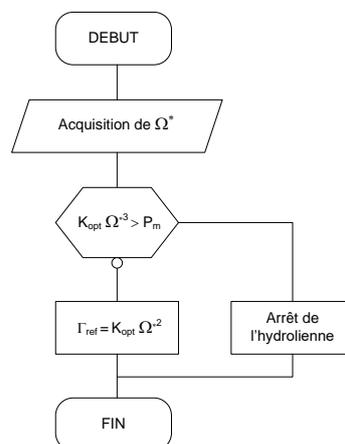
- limiter la puissance à $P = P_{max}$, en acceptant une survitesse (diminution du couple) ;
- stopper la génératrice quand les courants sont supérieurs à $4,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Question 34

Il faut extraire le maximum de puissance jusqu'à 1000 kW puis écrêter la puissance à 1000 kW . Il s'agit de la solution habituelle mise en œuvre sur les éoliennes ("rated-output speed" = vitesse à laquelle on cesse de suivre le MPPT pour travailler à puissance constante, au prix d'un écrêtage)

Question 35

Algorithme MPPT connaissant Ω



Question 36

```

// Initialisation
Lire P // puissance reçue par l'hydrolienne
P1 ← P
P2 ← P

// P & O : « Perturb and observe »
Boucle
  Lire P
  P2 ← P
  SI P2 > P1 alors
    Cref = Cref + δ
  SINON
    Cref = Cref - δ
  FIN_SI
  P1 ← P2
  Attendre 1s
  Aller à Boucle

```

Question 37

$$P = 3 E \cdot I \cdot \cos(\psi) \quad ; \quad \Gamma_{resist} = 3 E \cdot I \cdot \frac{\cos(\psi)}{\Omega} \quad \text{maximal pour } \psi = 0.$$

Question 38

$$\Gamma_{resist} = 3 E \cdot I \cdot \frac{\cos(\psi)}{\Omega} = 3 K_e \cdot I \cdot \cos(\psi) = K_I \cdot I$$

$$K_I = 3 K_e$$

Question 39

$$C(p) = \frac{S(p)}{\varepsilon(p)} \Leftrightarrow \left(K \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p} \right) = \frac{S(p)}{\varepsilon(p)} \Leftrightarrow S(p) T_i \cdot p = K (1 + T_i \cdot p) \varepsilon(p)$$

$$T_i \cdot \frac{ds(t)}{dt} = K \cdot \varepsilon(t) + K \cdot T_i \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Question 40

Approximation du nombre dérivé par le taux d'accroissement :

$$T_i \cdot \frac{ds(t)}{dt} = K \cdot \varepsilon(t) + K \cdot T_i \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \Leftrightarrow \frac{ds(t)}{dt} = \frac{K}{T_i} \cdot \varepsilon(t) + K \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

$$\frac{s_k - s_{k-1}}{T_e} = \frac{K}{T_i} \cdot \varepsilon_k + K \cdot \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}}{T_e} \Leftrightarrow s_k = s_{k-1} + \frac{K \cdot T_e}{T_i} \cdot \varepsilon_k + K (\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1})$$

$$s_k = s_{k-1} + K \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right) \cdot \varepsilon_k - K \cdot \varepsilon_{k-1}$$

$$A = 1, B = K \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right), C = -K$$

Question 41

La solution MPPT sans capteur est plus robuste car pas besoin d'un capteur de vitesse.

Le maximum mesuré ne dépend plus d'une courbe théorique obtenue avec un certain nombre d'hypothèses.

C'est une boucle fermée avec asservissement de puissance, ce qui garantit une maximisation effective de celle-ci en s'affranchissant des possibles erreurs de modèle.

Question 42

Le bilan thermique entre la nacelle à plein régime et les serpentins remplis d'eau de mer s'écrit, pour une température nominale de l'eau d'entrée de 15°C et une température de sortie n'excédant pas $T_{\text{entrée}}$ de plus de 10°C :

$$Q_m = \frac{P_{\text{évacuée}}}{C_{p,\text{eau}}(T_{\text{entrée}} - T_{\text{sortie}})} = \frac{61000}{3875(15 - 25)} = 1,57 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Question 43

Flux perdu à travers un élément d'échangeur dS : $d\Phi = \theta \cdot (T_{\text{eau de mer}} - T_{\text{nacelle}}) \cdot dS$

Flux gagné par l'eau de mer : $d\Phi = -(Q_m \cdot C_{p,\text{eau}}) \cdot dT_{\text{eau de mer}}$

Question 44

$$\theta \cdot (T_{\text{eau de mer}} - T_{\text{nacelle}}) \cdot dS = -Q_m \cdot C_{p,\text{eau}} \cdot dT_{\text{eau de mer}}$$

$$\frac{dT_{\text{eau de mer}}}{T_{\text{eau de mer}} - T_{\text{nacelle}}} = -\frac{\theta \cdot dS}{Q_m \cdot C_{p,\text{eau}}}$$

Question 45

De l'expression précédente on déduit : $T_{\text{eau de mer}} - T_{\text{nacelle}} = A \cdot e^{-\frac{\theta \cdot S}{Q_m \cdot C_{p,\text{eau}}}}$

À $x = 0$, $S = 0$ et $T_{\text{eau de mer}} = T_{\text{entrée}}$ donc $T_{\text{entrée}} - T_{\text{nacelle}} = A$

Au bout du serpentins après toute la surface d'échange $S = \Sigma$:

$$T_{\text{eau de mer}} = T_{\text{sortie}}$$

$$T_{\text{sortie}} - T_{\text{nacelle}} = A \cdot e^{-\frac{\theta \cdot \Sigma}{Q_m \cdot C_{p,\text{eau}}}}$$

$$T_{\text{sortie}} = T_{\text{nacelle}} + (T_{\text{entrée}} - T_{\text{nacelle}}) \cdot e^{-\frac{\theta \cdot \Sigma}{Q_m \cdot C_{p,\text{eau}}}}$$

d'où :

$$\alpha = T_{\text{nacelle}} \quad ; \quad \beta = T_{\text{entrée}} - T_{\text{nacelle}} \quad ; \quad \gamma = \frac{\theta \cdot \Sigma}{Q_m \cdot C_{p,\text{eau}}}$$

Question 46

$$\alpha = T_{\text{nacelle}} = 35^{\circ}\text{C} \quad ; \quad \beta = T_{\text{entrée}} - T_{\text{nacelle}} = -25^{\circ}\text{C} \quad ; \quad \gamma = \frac{\theta \cdot \Sigma}{Q_m \cdot C_{p,\text{eau}}} = \frac{500 \cdot 20}{1,57 \cdot 3875} = 1,64$$

$$T_{\text{sortie}} = 35 - 25 \cdot e^{-1,64} = 30^{\circ}\text{C}$$

30°C est supérieur à $10^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}$ donc l'exigence « respecter le milieu marin » n'est pas validée.

Une solution est d'augmenter le débit de la pompe

Avec un débit = $1,57 \times 4 = 6,28 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ et une température de sortie $T_{\text{sortie}} = 18,4^{\circ}\text{C}$, le cahier des charges est alors validé même dans ces conditions extrêmes.

Question 47

$$1,5 \cdot F_H \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma)\right) \cdot Y_K < m_C \cdot g \cdot d_{KC}$$

$$1,5 \cdot F_H \cdot \sin(\alpha + \gamma) \cdot Y_K < m_C \cdot g \cdot d_{KC}$$

avec

$$d_{KC} = \sin(2\gamma) \cdot \sqrt{x_C^2 + z_C^2}$$

$$m_C > \frac{1,5 \cdot F_H \cdot \sin(\alpha + \gamma) \cdot Y_K}{g \cdot \sin(2\gamma) \cdot \sqrt{x_C^2 + z_C^2}} = 49 \text{ tonnes}$$

Question 48

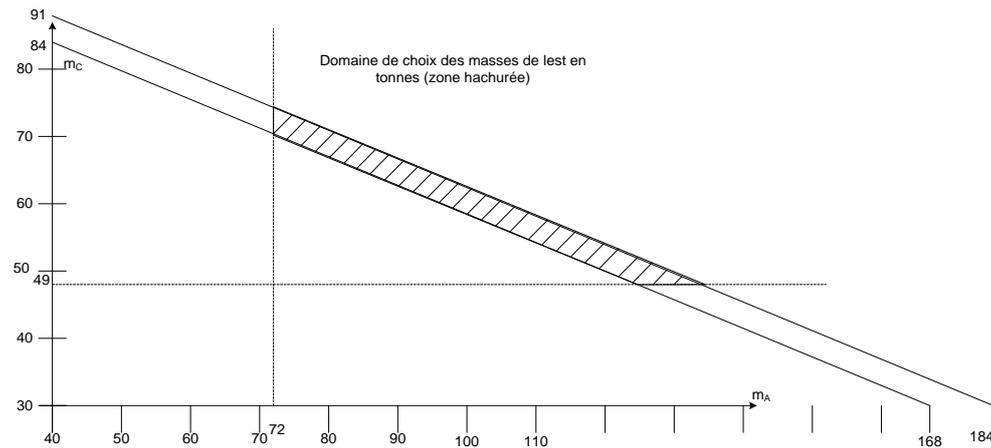
$$(m_A + m_B + m_C) \cdot 9,81 > 660 \cdot 2,5 = 1650 \text{ kN et } m_B = m_C$$

$$(m_A + 2 m_C) > 168 \text{ tonnes (1650 kN)}$$

Question 49

Le système d'inéquations est le suivant (en tonnes) :

$$m_C > 49 ; m_A > 72 ; (m_A + 2 m_C) > 168 ; (m_A + 2 m_C) + 66,238 < 250$$



Question 50

1. L'exploitation du document 4 conduit à trouver un besoin en puissance sur l'île compris entre 1360 kW et 1100 kW.
2. Les hydroliennes, éoliennes et solaire photovoltaïque ne produisent pas 24 h/24 h.
3. Exemple d'une capacité installée supérieure à la puissance maximale nécessaire comprenant par exemple 2 hydroliennes (1 MW mécanique : probablement 700 kW électrique), une éolienne 3 MW, une installation photovoltaïque pour 1 MW)
Un mix énergétique entre les 3 augmente la disponibilité d'une énergie verte tout au long de la journée sans pour autant la garantir à 100%.
4. Il convient donc d'envisager un stockage de cette énergie verte sous forme par exemple de batteries ou/et de conserver un groupe électrogène pour assurer la disponibilité de l'électricité aux habitants (ce qui revient à stocker de l'énergie sous forme fossile).
5. Si les énergies renouvelables rentrent à hauteur de 80% dans la production électrique de l'île les émissions de CO_2 passeront de $670 \text{ gCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$ à $134 \text{ gCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$.

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

Partie 1 Consommation de l'île (Q1 à Q3) et partie 2 Analyse de l'architecture de l'hydrolienne (Q4 à Q7)

Ces questions permettaient de justifier l'intérêt de décarboner la production électrique sur l'île d'OUESSANT. Beaucoup de candidats ont réussi cette partie. Cependant les notions d'énergie, de puissance et les unités correspondantes ne sont pas maîtrisées par environ 30% des candidats, et les ordres de grandeur du domaine de l'énergie sont souvent méconnus.

Q4 : Le diagramme des blocs interne IBD a été bien réussi. Les candidats n'ayant pas bien traité cette question ont souvent éprouvé beaucoup de mal aux autres questions liées à l'architecture de la machine.

Q5 : On rappelle que chaque puissance est le produit d'une variable de flux et d'une variable d'effort, or cette notion n'est pas suffisamment acquise par les candidats. On trouve aussi des confusions entre "grandeur" et "unité".

Q6 : Il s'agissait d'expliquer les choix portant sur l'organisation générale du système :

- la double conversion AC/DC - DC/AC justifiée par l'inconstance de la fréquence en sortie de la génératrice (exigence d'une fréquence égale à 50 Hz) ;

- le stockage par batterie de (super)-condensateurs destiné au maintien de la tension sur le bus continu (sur une échelle de temps de quelques secondes au maximum, une technologie de stockage par condensateurs n'étant pas appropriée pour le stockage longue durée ; un stockage palliant les périodes où le courant de marée est trop faible pour produire, qui relève de la question de synthèse Q50, serait installé à terre de préférence) ;

- la transformation de tension BT/HT-A justifiée par la distance à parcourir (intensité dans la ligne d'évacuation HT plus faible que dans le circuit BT, cas classique à connaître).

Q7 : les définitions de base d'une grandeur efficace, de la puissance active, apparente et du facteur de puissance doivent être connues par l'ensemble des candidats à l'agrégation. Cette question n'a été malheureusement que très partiellement réussie.

La grande majorité des candidats (93%) a abordé les questions Q1 à Q7, ils obtiennent en moyenne la moitié des points.

Partie 3 Extraire une puissance mécanique de 1MW (Q8 à Q22)

Q8 à Q13 : un nombre satisfaisant de candidats fait une bonne analyse géométrique de la turbine et réussit à exprimer les relations donnant le couple moteur en fonction des angles d'incidence et de calage. La nécessité de la réversibilité du profil (deux sens de courant) est le plus souvent bien exprimée.

Q14 : Etude de la finesse du profil : on rencontre assez souvent une confusion d'ordre mathématique entre la notion de tangente passant par l'origine (extremum de l'angle polaire) et celle de tangente horizontale (extremum de la fonction).

Q15 : la torsion des pales, visible sur les illustrations - et très observable sur les pales d'éoliennes - résulte de l'observation que le couple n'est pas maximal pour le même angle de calage pour des distances à l'axe de rotation différentes.

Ce point a été mal compris par un nombre assez important de candidats, ce qui semble révéler une fracture entre les capacités d'analyse géométrique et d'interprétation fonctionnelle.

Q16 : la formule du couple total est souvent assez bien abordée, mais on rencontre souvent une confusion entre la notion de "calcul numérique" et celle de "simulation" : celle-ci est l'application algorithmique d'un principe physique par une méthode de discrétisation spatiale ou temporelle et non la simple application d'une formule analytique, fût-elle compliquée. La simulation permet en effet de résoudre un problème sans passer par la solution analytique. Les candidats au professorat se doivent de faire nettement la distinction entre ces deux approches (complémentaires) utilisant des calculateurs, car elles établissent une importante distinction entre les diverses classes de logiciels techniques.

Q18 à Q22 : Cette partie étudiait les divers cas menant à une dépression excessive sur la pale de la turbine. Si l'influence des divers paramètres a été en général bien abordée, l'exigence concernant la

cavitation ne doit pas faire oublier l'exigence de production de puissance, et la question 22 a parfois donné lieu à des conclusions parcellaires.

Les candidats (48%) ayant abordé les questions Q8 à Q17 (hydrodynamique) obtiennent 33% des points.

Les candidats (66%) ayant abordé les questions Q18 à Q22 (cavitation) obtiennent 34% des points.

Partie 4 Optimiser la production (Q23 à Q41)

Q23 à Q26 : les principes de base de la production et du transport de l'énergie électrique (loi des mailles et diagramme de Fresnel, grandeurs complexes ou grandeurs temporelles) sont souvent méconnus (par exemple, quelle est la signification du terme $\sqrt{3}$ dans les expressions des puissances). Ces principes font pourtant partie des enseignements transversaux indispensables à la compréhension des structures des systèmes pluri-techniques.

Q27 : la description des relations de cause à effet décrites dans le schéma-bloc n'a pas toujours été comprise.

Les questions 23 à 27 (machine synchrone) ont été traitées par 8% des candidats, et ceux qui les ont traitées n'obtiennent que 12% des points.

Q28 à Q34 : l'étude des fonctionnements à couple imposé et à puissance maximale a été assez bien traitée par de nombreux candidats. Au niveau de l'exploitation et de la synthèse, on trouve parfois des confusions liées à la prise en compte des objectifs : il ne peut être exigé de l'hydrolienne qu'elle produise 1MW en toutes circonstances, mais seulement qu'elle puisse le faire quand les conditions le permettent, et que la puissance produite soit maximisée quand on ne peut atteindre P_{nom} (c'est à dire : se rapprocher au mieux de la puissance disponible).

Les questions 28 à 34 (stratégie de pilotage) ont été traitées par 51% des candidats, qui obtiennent la moitié des points.

Q35 et Q36 : un nombre assez satisfaisant de candidats exprime correctement les principes de pilotage MPPT, en utilisant presque correctement les algorigrammes et les pseudo-codes. Le bilan est moins bon pour les questions qui suivent.

Q37 et Q38 : il s'agissait d'exploiter le schéma bloc pour faire un lien avec les caractéristiques énergétiques de la machine. Cela a été bien abordé par quelques candidats seulement, traduisant à nouveau une méconnaissance des principes de fonctionnement des convertisseurs d'énergie.

Q39-Q40 : ces deux questions mettent à nouveau en évidence le besoin de préparation des candidats sur l'application des outils mathématiques incontournables que sont les équations différentielles et les fonctions de transfert. Les candidats bien préparés ont bien réussi ces questions.

Q41 : Il fallait, pour pouvoir comparer les deux solutions, avec et sans capteur, prendre du recul sur les attendus d'un système asservi embarqué dans des conditions contraignantes, afin d'éviter certaines confusions sur le rôle exact d'un capteur.

Les questions Q35 à Q41 (système de commande) ont été abordées par 20% des candidats, qui n'obtiennent que 15% des points.

Partie 5 Fonctionner en toute sécurité

Q42 à Q46 : un nombre appréciable de candidats réalisent correctement l'analyse thermique, ce qui leur permet de conclure utilement sur le dimensionnement du circuit de refroidissement.

Les questions Q42 à Q46 (étude thermique) ont été abordées par 37% des candidats, qui obtiennent en moyenne 26% des points.

Q47 à Q49 : les éléments essentiels de statique sont correctement mis en oeuvre par la plupart des candidats, mais la question Q49 n'a pas été correctement traitée, le "domaine de validité" (défini par un système d'inéquations algébriques) n'est presque jamais présenté.

Les questions Q47 à Q49 (étude statique) ont été abordées par 42% des candidats, qui obtiennent en moyenne 18% des points.

Partie 6 Synthèse et perspectives Q50

Pour ces questions traitant de généralités, il est recommandé de s'en tenir dans un premier temps aux données du problème fournies dans le sujet, puis d'utiliser ses connaissances personnelles, faute de quoi les réponses sont souvent très convenues.

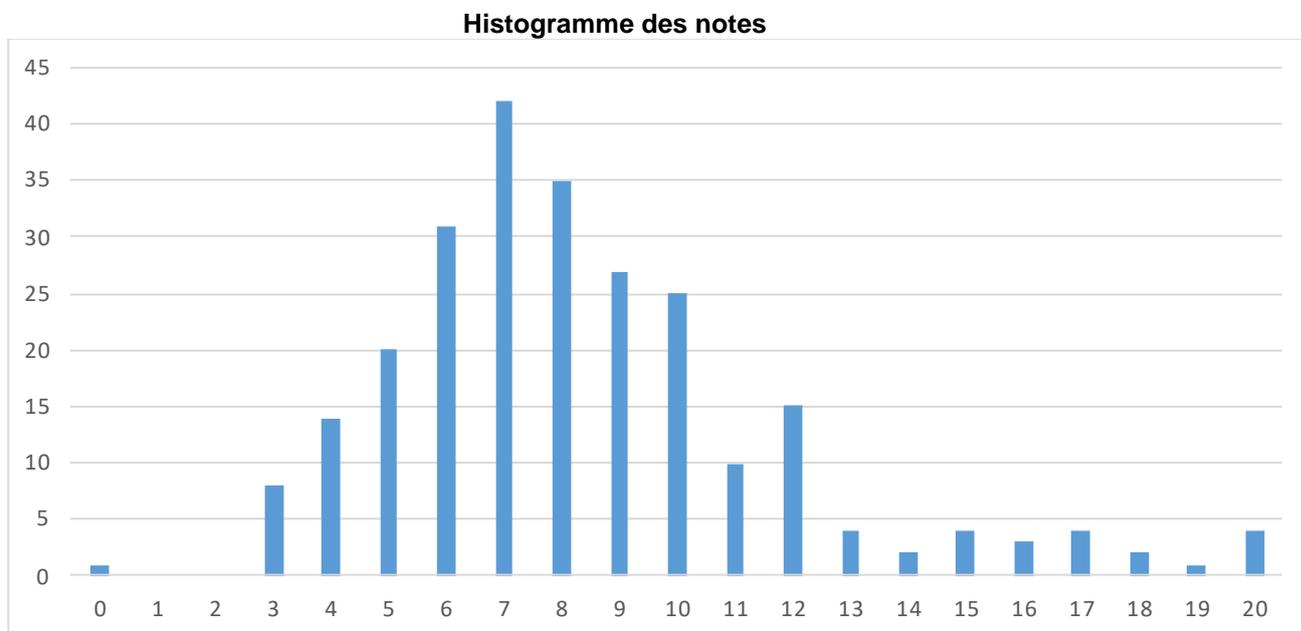
La démarche à suivre consistait d'abord à comparer les besoins et les ressources, puis à mettre en évidence le décalage temporel qui pouvait exister entre les uns et les autres. Il en résultait logiquement une gamme de choix possibles pour les sources principales (énergies renouvelables) et les sources de compensation (énergies fossiles et/ou système de stockage).

Cette question a été abordée par 53% des candidats, qui y obtiennent en moyenne 19% des points.

Résultats

252 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 ;
- 0/20 comme note la plus basse.



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

Présentation de l'épreuve

Arrêté du 19 avril 2016

- 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://media.devenirenseignant.gouv.fr/file/agregation_externer/99/1/s2020_agreg_externer_sii_mecanique_2_1259991.pdf

Éléments de correction

Question 1

Par une fermeture géométrique, on trouve $x = OA \cdot \cos\beta + (L_1 + OA \cdot \sin\beta) \cdot \tan\alpha$.

Par construction, dans le triangle OAS, on trouve :

$$L_4 = OA \cdot \cos\beta + SA \cdot \cos\delta = OA \cdot \cos\beta + OA \cdot \frac{\sin\beta}{\sin\delta} \cdot \cos\delta ;$$

d'où :

$$x = L_4 \cdot \frac{\tan\delta}{\tan\delta + \tan\beta} (1 + \tan\beta \cdot \tan\alpha) + L_1 \cdot \tan\alpha.$$

Question 2

Soit L_{10} et β_0 , les valeurs initiales de L_1 et β , cela conduit à $dL_1 = L_1 - L_{10}$ et $d\beta = \beta - \beta_0$.

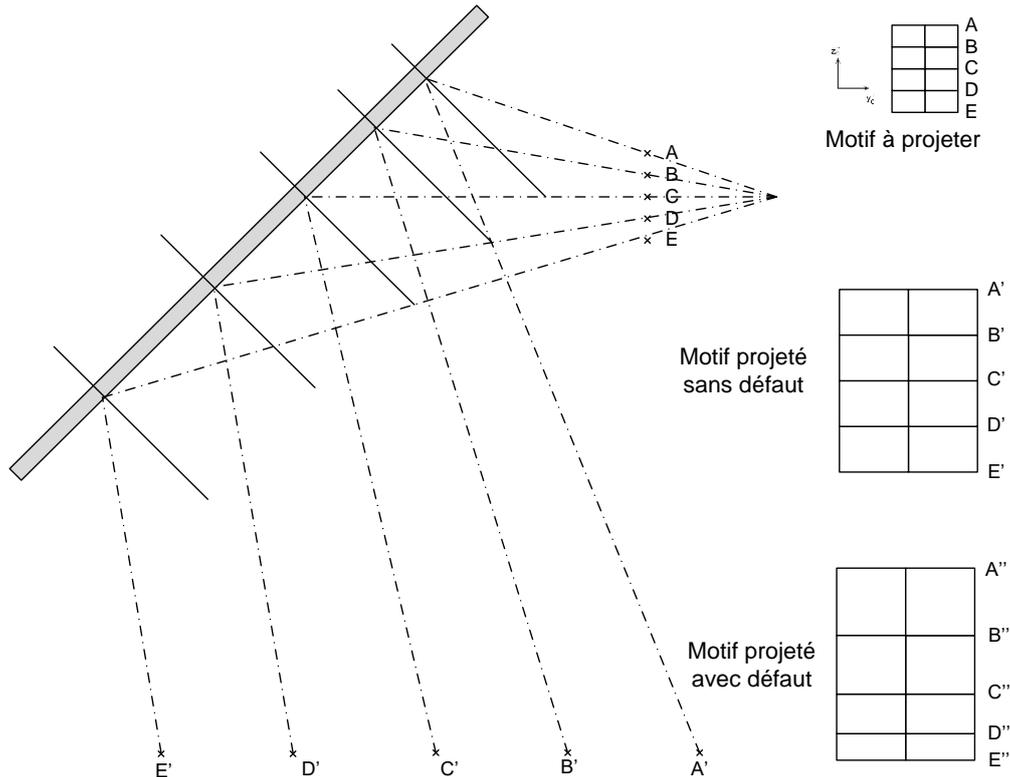
$$\text{Ainsi : } dx = L_4 \cdot \frac{\tan\delta}{\tan\delta + \tan(\beta)} (1 + \tan(\beta) \cdot \tan\alpha) - L_4 \cdot \frac{\tan\delta}{\tan\delta + \tan(\beta_0)} (1 + \tan(\beta_0) \cdot \tan\alpha) + dL_1 \cdot \tan\alpha.$$

Les courbes sont obtenues à partir de la relation précédente pour $dx = dx_{\text{limite}} = 5\text{mm}$ en faisant varier dL_1 et en calculant les valeurs de β puis de $d\beta$.

L'erreur maximale admissible $d\beta_{\text{Max}}$ est obtenue pour dL_1 :

- $d\beta_{\text{Max}} = 0,36^\circ$ pour la projection sur les murs ;
- $d\beta_{\text{Max}} = 0,42^\circ$ pour la projection au plafond.

Question 3



Pour illustrer l'influence du défaut, il est proposé de réaliser un schéma de la projection du motif sans défaut. Soient A, B, C, D et E les sommets à droite du motif, sans défaut, ces points se projettent respectivement en A', B', C', D' et E'. Après projection, le motif est agrandi pour être visualisé sur le mur de grandes dimensions.

Une fois ce schéma réalisé, en cas d'erreur $d\beta_{\text{Max}}$ (autour de \bar{y}_0), un décalage selon \bar{x}_0 peut être observé : positif pour les points A et B et négatif pour les points D et E. Le point C n'est pas concerné car il n'y a pas de variation de distance entre C et le miroir (aligné avec l'axe de rotation du miroir dans la configuration choisie). Cela conduit à la déformation du motif représenté par les points A'', B'', C'', D'' et E''.

Il n'y a pas de déformation selon la direction horizontale car aucun défaut n'est appliqué en rotation selon \bar{z}_0 .

Question 4

Soit L_1 la distance A_1M , par une fermeture géométrique, le système d'équations suivant est obtenu :

$$\begin{cases} \bar{x}_0 : L_1 \cos \beta + \lambda \cos \theta = L_0 \\ \bar{z}_0 : L_1 \sin \beta + \lambda \sin \theta = H_0 \end{cases}$$

La course vaut alors : $\lambda = \sqrt{(L_0 - L_1 \cos \beta)^2 + (H_0 - L_1 \sin \beta)^2}$.

β varie de 35° à 55° , ce qui conduit à une variation pour λ de $\lambda_1 = 273$ mm à $\lambda_2 = 490$ mm. Ainsi la course vaut : $\lambda = 217$ mm.

Question 5

L'assemblage étudié est constitué de deux liaisons pivots, deux liaisons rotules et une liaison pivot glissant. Il y a deux boucles cinématiques indépendantes et trois mobilités. Parmi ces mobilités, on retrouve la mobilité utile en rotation du miroir et les mobilités internes de rotation propre du vérin (corps + tige) et de la tige autour de son axe. Cela conduit à un degré d'hyperstatisme $h = 5$ provenant des deux liaisons pivot en parallèle qu'il faudra aligner « parfaitement ».

Question 6

La géométrie peut être considérée comme étant plane dans $\{G, \vec{x}_1, \vec{y}_1\}$, avec $\{G, \vec{x}_1, \vec{y}_1\}$ plan de symétrie et d'épaisseur négligeable selon \vec{z}_1 , ce qui conduit à la forme proposée :

$$I_G(1) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 \end{bmatrix}_{\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1}$$

$$\overline{\delta_{A_1}(1,0)} \cdot \vec{y}_0 = \frac{d}{dt} \overline{\sigma_{A_1}(1,0)} \Big|_0 \cdot \vec{y}_0 \text{ car } A_1 \text{ est fixe dans } 0 \text{ (supposé galiléen), soit } \overline{\delta_{A_1}(1,0)} \cdot \vec{y}_0 = \frac{d}{dt} (\overline{\sigma_{A_1}(1,0)} \cdot \vec{y}_0).$$

$$\text{Or, } \overline{\sigma_{A_1}(1,0)} = \overline{\sigma_G(1,0)} + \overline{A_1 G} \wedge (M_m + M_s) \overline{V_G(1,0)}.$$

Soit $d_1 = \|\overline{A_1 G}\| = \sqrt{23^2 + 31^2}$, cela conduit à $\overline{\delta_{A_1}(1,0)} \cdot \vec{y}_0 = (B_1 + (M_m + M_s) \cdot d_1^2) \cdot \beta$ par application du théorème de Huyghens.

Question 7

En appliquant le théorème du moment dynamique au solide 1 (miroir + support) en A_1 en projection sur \vec{y}_0 , on obtient :

$$\overline{\delta_{A_1}(1,0)} \cdot \vec{y}_0 = \overline{M_{A_1}}(\text{Pesanteur} \rightarrow 1) \cdot \vec{y}_0 + \overline{M_{A_1}}(\text{Bâti} \rightarrow 1) \cdot \vec{y}_0 + \overline{M_{A_1}}(\text{Tige } 2 \rightarrow 1) \cdot \vec{y}_0.$$

Le calcul de chaque moment conduit à :

- $\overline{M_{A_1}}(\text{Pesanteur} \rightarrow 1) \cdot \vec{y}_0 = - (31 \cos \beta - 23 \sin \beta) \cdot m \cdot g$;
- $\overline{M_{A_1}}(\text{Bâti} \rightarrow 1) \cdot \vec{y}_0 = 0$ en supposant la liaison énergétiquement parfaite ;
- $\overline{M_{A_1}}(\text{Tige } 2 \rightarrow 1) \cdot \vec{y}_0 = L_1 F_{21} \sin(\theta - \beta)$ car l'ensemble $\{2+3\}$ est soumis à deux glisseurs (liaisons rotules aux extrémités).

Une fois les applications numériques effectuées, on trouve un effort de l'ordre de $F_{21 \text{Max}} = 200 \text{ N}$ pour $\beta = 35^\circ$.

Question 8

Voici une liste non exhaustive de proposition de réponses :

- la géométrie retenue pour l'étude est simplifiée (légèrement) ;
- le châssis étant réalisé en mécano-soudure, il est possible que les tolérances, liées au procédé de fabrication du châssis, sur les dimensions prises en compte dans le calcul dynamique aient un impact non négligeable sur le dimensionnement effectué ;
- les liaisons sont supposées énergétiquement parfaites.

Question 9

Tous les vérins vérifient le critère de course.

Avec le coefficient de sécurité, il suffit que le vérin puisse développer un effort maximum de 400 N.

En conséquence, le premier vérin (diamètre de tige 32 mm) convient.

Question 10

En supposant qu'on se place en régime permanent et en considérant que la vis constitue l'entrée du vérin et l'écrou la sortie, le rendement s'écrit :

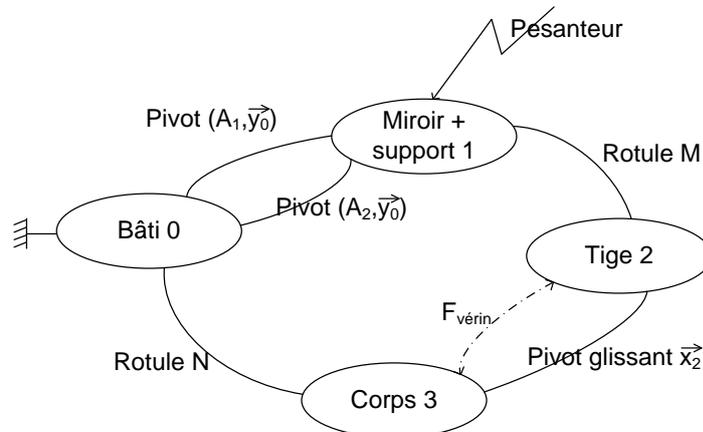
$$\eta_{ve} = \frac{\vec{F}_{vis \rightarrow \text{écrou}} \cdot \vec{V}_{\text{écrou}/vis}}{\vec{C}_{\text{rédu} \rightarrow vis} \cdot \vec{\Omega}_{vis/\text{écrou}}}$$

$$\text{Soit, } \eta_{ve} = \frac{-F_a \|\vec{\Omega}_{vis/\text{écrou}}\| \frac{pas}{2\pi}}{-F_a \frac{D}{2} \tan(\alpha + \varphi) \cdot \|\vec{\Omega}_{vis/\text{écrou}}\|}$$

Or $\tan \alpha = \frac{\text{pas}}{\pi D}$, ainsi on obtient :

$$\eta_{\text{ve}} = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \varphi')}$$

Question 11



Question 12

La question 4 a conduit à : $\lambda^2 = (L_1 \cos \beta - L_0)^2 + (L_1 \sin \beta - H_0)^2$.

En dérivant, on obtient : $2\lambda \cdot \dot{\lambda} = 2L_1 \cdot \dot{\beta}(L_0 \sin \beta - H_0 \cos \beta)$

Or $\dot{\lambda} = \|\vec{V}_{\text{écrou}/0}\| = -\frac{\text{pas}}{2\pi} \cdot \omega_m(t)$.

Soit $\dot{\beta} = -\frac{\sqrt{(L_1 \cos \beta - L_0)^2 + (L_1 \sin \beta - H_0)^2}}{L_1(L_0 \sin \beta - H_0 \cos \beta)} \cdot \frac{\text{pas}}{2\pi} \cdot \omega_m(t)$.

Question 13

$$E_c(E/0) = E_c(1/0) + E_c(\text{vérin}/0) + E_c(\text{moteur}/0) + E_c(\text{réducteur}/0).$$

En détaillant les expressions des énergies cinétiques, on trouve :

- $E_c(1/0) = \frac{1}{2}(B_1 + (M_m + M_s) \cdot d_1^2) \cdot \dot{\beta}^2$, rotation autour de (A_1, \vec{y}_0) qui est fixe dans 0 ;
- $E_c(\text{vérin}/0) = \frac{1}{2} m_2 \dot{\lambda}^2 + \frac{1}{2} (J_0 + J_v(\lambda - \lambda_0)) \dot{\theta}^2$;
- $E_c(\text{moteur}/0) = \frac{1}{2} J_m \omega_m^2$, seule la rotation propre de l'arbre moteur est considérée, l'énergie cinétique en rotation autour de (A_1, \vec{y}_0) est incluse dans le terme $\frac{1}{2} (J_0 + J_v(\lambda - \lambda_0)) \dot{\theta}^2$;
- $E_c(\text{réducteur}/0) = \frac{1}{2} k^2 J_r \omega_m^2$, seule la rotation propre du réducteur est considérée, l'énergie cinétique en rotation autour de (A_1, \vec{y}_0) est incluse dans le terme $\frac{1}{2} (J_0 + J_v(\lambda - \lambda_0)) \dot{\theta}^2$.

$$\text{Soit } E_c(E/0) = \frac{1}{2} (J_m + k^2 J_r) \omega_m^2 + \frac{1}{2} (J_0 + J_v(\lambda - \lambda_0)) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} (B_1 + (M_m + M_s) \cdot d_1^2) \cdot \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{\lambda}^2.$$

Question 14

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble E dans 0, considéré galiléen, on obtient :

$$\frac{d}{dt} E_c(E/0) = P(\text{ext} \rightarrow E/0) + P_{\text{int}}(E).$$

Les puissances extérieures à l'ensemble E sont définies ci-après :

$$P(\text{ext} \rightarrow E/0) = P(\text{Bati}_{A1} \rightarrow 1/0) + P(\text{Bati}_{A2} \rightarrow 1/0) + P(\text{pesanteur} \rightarrow 1/0) + P(\text{Bati}_N \rightarrow 3/0).$$

Chaque puissance extérieure est détaillée ci-dessous :

- $P(\text{Bati}_{A1} \rightarrow 1/0) = P(\text{Bati}_{A2} \rightarrow 1/0) = P(\text{Bati}_N \rightarrow 3/0) = 0$ (liaisons énergétiquement parfaites) ;
- $P(\text{pesanteur} \rightarrow 1/0) = - (M_m + M_s) g d_1 \dot{\beta} \sin \beta$.

Au final, on trouve : $P(\text{ext} \rightarrow E/0) = - (M_m + M_s) g d_1 \dot{\beta} \sin \beta$.

Les puissances intérieures à l'ensemble E sont définies ci-après : $P_{int}(E) = C_m \omega_m + (1 - \eta_{ve}) C_m \omega_m = \eta_{ve} C_m \omega_m$, en considérant que les autres liaisons sont énergétiquement parfaites.

On rappelle que $\dot{\lambda} = -\omega_m(t) \cdot \frac{pas}{2\pi}$ (Q12) ; $\dot{\beta} \approx -80 \cdot \frac{\pi}{180} \dot{\lambda} = -1,4 \dot{\lambda}$ (linéarisation figure 13).

Par ailleurs, en analysant les énergies cinétiques mises en jeu $\frac{1}{2}(B_1 + (M_m + M_s) \cdot d_1^2) \cdot \dot{\beta}^2 \gg \frac{1}{2}(J_0 + J_v(\lambda - \lambda_0)) \dot{\theta}^2$. En effet, $\dot{\beta}$ et $\dot{\theta}$ sont du même ordre de grandeur et $B_1 + (M_m + M_s) \cdot d_1^2 \gg J_0 + J_v(\lambda - \lambda_0)$. De même $m_2 \ll 1,4^2(B_1 + (M_m + M_s) \cdot d_1^2)$.

Au final, on trouve l'équation demandée avec :

- $A = \frac{1}{\eta_{ve}} \left((J_m + k^2 J_r) + \left(\frac{pas}{2\pi} \right)^2 \cdot 1,4^2 [B_1 + (M_m + M_s) \cdot d_1^2] \right) = J_{eq}$;
- $B = 0$;
- $C = \frac{1}{\eta_{ve}} (M_m + M_s) \cdot g \cdot d_1 \cdot 1,4 \cdot \frac{pas}{2\pi}$.

Question 15

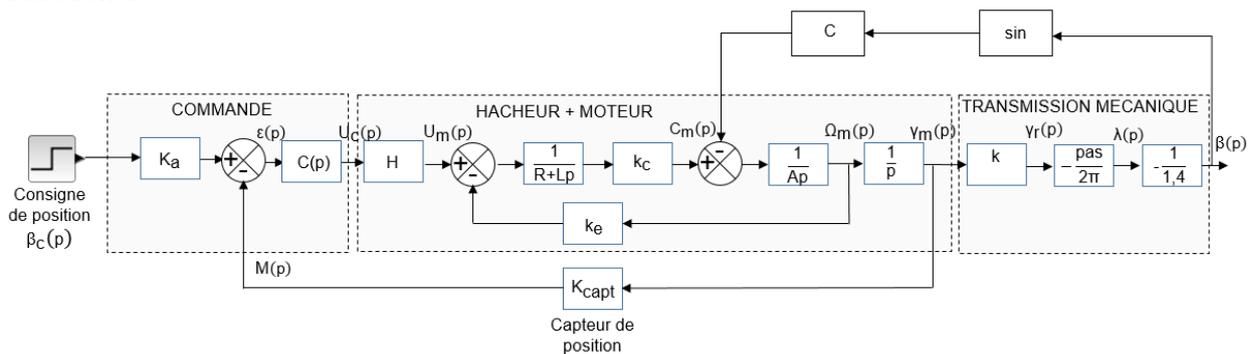
Le codeur est positionné en sortie du moteur (avant le réducteur) afin d'améliorer la précision de la mesure. Le codage de l'information s'effectuant sur 12 bits, ce qui conduit à :

$$K_{capt} = 2^{12} \text{ tops/tour} = 4096 \text{ tops/tour} = 652 \text{ tops/rad.}$$

Afin que l'asservissement fonctionne correctement, K_a doit permettre la comparaison entre des grandeurs « compatibles ». Cela se traduit par $\varepsilon(p) = 0$, quand $\beta = \beta_c$.

$$\text{Ainsi : } K_a = K_{capt} \frac{2\pi \cdot 1,4 \cdot k}{pas}$$

Question 16



Question 17

On remarque que l'équation dynamique du moteur comporte une fonction sinus. Dans ce cas, il est nécessaire de linéariser autour d'une position d'équilibre ce qui est cohérent avec l'utilisation qui est effectuée. En effet, lors du réglage de l'orientation du miroir, les angles ne vont évoluer qu'avec de petites variations.

Pour cela, il est nécessaire d'effectuer un changement de variable $\beta = \beta_0 + d\beta$ avec $\beta_0 = \pi/4$. Ainsi le comportement du système sera linéaire en considérant des variations $d\beta$ de l'ordre de quelques degrés avec $\cos(d\beta) \approx 1$ et $\sin(d\beta) \approx d\beta$. Une fois la linéarisation précédente effectuée le bloc « sin » disparaît du schéma-bloc pour travailler avec les hypothèses de type SLCI.

Par ailleurs, les conditions de Heaviside seront vérifiées pour le modèle SLCI en $d\beta$.

NB : sur le schéma proposé, il est supposé que β et β_c sont en radians. Si ces grandeurs devaient s'exprimer en degré, cela reviendrait à effectuer la conversion au niveau de K_a et de la dernière fonction de transfert.

Question 18

Le correcteur est supposé unitaire pour le moment, on retrouve alors le tracé du produit d'une fonction de transfert constituée de produit de fonction de transfert :

- gains purs (correcteur, hacheur et capteur) ;
- second ordre (moteur) ;
- intégrateur.

Sur le diagramme de phase on remarque alors l'asymptote à -90° en basses fréquences et à -270° en hautes fréquences.

Par lecture graphique, on trouve une marge de phase de 30° et une marge de gain de 10 dB.

La marge de phase est un peu en dessous des grandeurs usuelles retenues pour la stabilité (40° à 45°). Cependant le système peut être considéré comme stable en boucle fermée vis-à-vis du cahier des charges.

Question 19

Le critère de stabilité a été vérifié précédemment.

Le temps de réponse à 5% vaut environ 15 ms (< 20 ms). Le critère de rapidité est donc vérifié.

En revanche, pour un échelon de 5° la réponse en régime permanent est $4,1^\circ$. Le système n'est alors pas précis.

Pour pallier ce problème de précision, il est alors proposé de mettre en place une action intégrale en amont de la perturbation avec l'utilisation d'un correcteur proportionnel intégral par exemple.

Question 20

Dans le cas d'un correcteur proportionnel intégral, comme le système est à la limite de stabilité du cahier des charges, il faut faire en sorte que la phase ne soit pas modifiée autour de la pulsation de coupure à 0 dB. Cela revient à choisir la constante d'intégration en basse fréquence. On veillera à mettre le gain proportionnel à 1 afin de ne pas translater la courbe de gain et ainsi éviter un décalage de la pulsation de coupure à 0 dB.

Question 21

Avec les réglages effectués, les marges de stabilité sont inchangées. Le système est devenu précis (la valeur de consigne est atteinte en régime permanent. Le temps de réponse à 5% a augmenté (19 ms) mais reste conforme aux exigences.

Ainsi le cahier des charges est intégralement validé.

Question 22

Le détail de modélisation des différentes liaisons est donné ci-dessous :

- liaisons ponctuelles en A_1, A_2, A_3, A_4 (contacts entre la passerelle et le châssis = surfaces de petites dimensions) ;
- liaisons sphériques en B_1, B_2 (identifiées sur le DT1) ;
- liaisons sphériques en C_1, C_2 (contacts cylindriques courts + arrêts en translation) ;
- liaisons complètes en D_1, D_2 (hélicoïdale d'axe \vec{z}_0 + ponctuelle de normale \vec{z}_0).

Le torseur d'action mécanique modélisant les actions mécaniques extérieures qui agit sur le châssis (1) en un point A_i est de la forme suivante :

$$\left\{ T_{\text{plateforme} \rightarrow 1} \right\}_{R_0} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_{A_i} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{A_i} \text{ avec } \vec{F}_{A_i} = (P_T \vec{x}_0 + P_L \vec{y}_0 + P_V \vec{z}_0) \frac{n}{S} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t).$$

Question 23 et question 24

Fonction objectif:

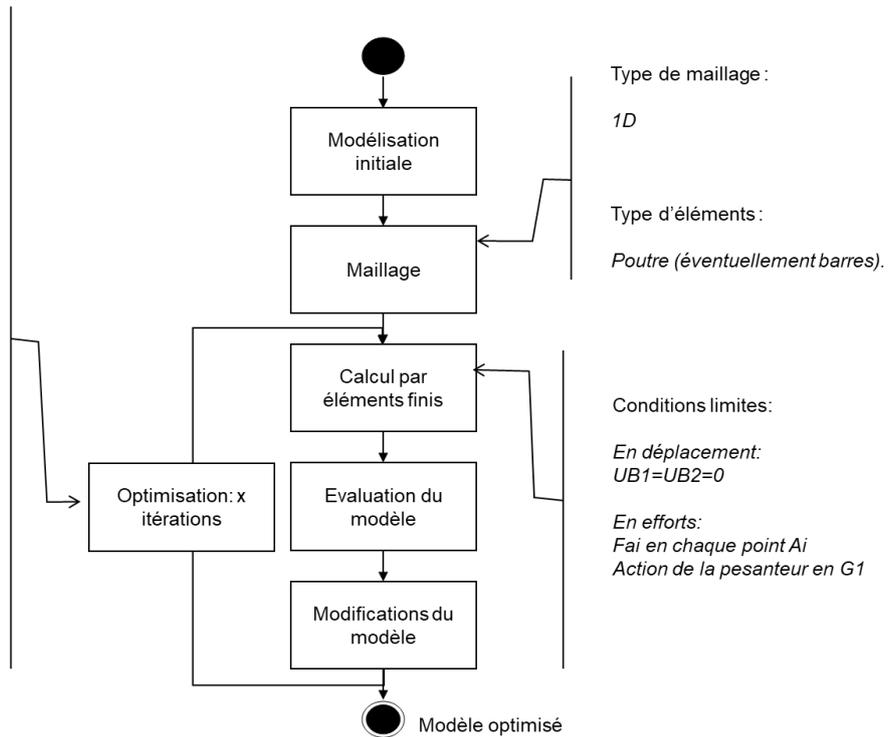
Maximisation de la rigidité (+ éventuellement minimisation de la masse)

Variables de conception à optimiser:

Nombre d'éléments
Dimensions des sections des poutres (largeur et épaisseur des sections)

Contraintes:

Déplacement d'un point $M=[C1, C2, E1, E2]$ $dU_M < seuil_M$



Question 25

Analyse globale qualitative des résultats des simulations du modèle existant (DT2).

Les déplacements des points A_4 , et D_1 ont nettement diminué avec le modèle optimisé.

La structure étant en liaison pivot autour de $\overline{B_1B_2}$, on s'attend à ce que $dA_3 \approx dA_4$ ce qui n'est pas du tout le cas avec le modèle initial mais s'en rapproche avec le modèle optimisé.

Analyse quantitative

Soit, $\overline{d\theta_{10}}$ la rotation du châssis autour de $\overline{B_1B_2}$, et $\overline{dU_{M,R1}}$ le déplacement d'un point M dans le repère lié au châssis 1.

Les figures du DT2 donnent les déplacements $dU_{M,R0}$ dans le repère fixe R_0 , avec :

$$\overline{dU_{M,R1}} = \overline{dU_{M,R0}} + \overline{O_1M} \wedge \overline{d\theta_{10}}.$$

La flexibilité du châssis s'écrit sous la forme : $\frac{1}{K} = \frac{dU_{M,R1} - dU_{O_1,R1}}{\sum F_{ext \rightarrow 1}}$ en mm/N.

Si le châssis est rigide $\rightarrow dU_{M,R1} \approx 0 \rightarrow dU_{M,R0} \approx \overline{O_1M} \cdot d\theta_{10}$.

Cela ne se vérifie pas pour le modèle initial, par exemple au point D_1 :

$dU_{D1y,R0} = -3 \text{ mm}$	$dU_{D1y,R1} = 1,18 \text{ mm}$
$dU_{D1z,R0} = -9 \text{ mm}$	$dU_{D1y,R1} = 8,25 \text{ mm}$

Pour le modèle optimisé on obtient :

$dU_{D1y,R0} = -1,75 \text{ mm}$	$dU_{D1y,R1} = 0,315 \text{ mm}$
$dU_{D1z,R0} = 0,5 \text{ mm}$	$dU_{D1y,R1} = 0,085 \text{ mm}$

Conclusion

L'optimisation a permis d'améliorer la rigidité du châssis, les défauts résiduels peuvent être dus à la flexibilité dans les liaisons entre les éléments du châssis.

Question 26

Les pièces assemblées 1a, 1b et les deux rondelles 1c sont assimilées à un ressort de raideur K_a . La vis 3 est assimilée à un ressort de raideur K_{b1} (entre O_{b1} et O_{b2}) et K_{b2} (entre E et O_{b2}), l'élément de raideur K_{b1} est en parallèle avec les pièces de raideur K_a .

Il est possible de déterminer facilement une raideur équivalente pour l'association en parallèle de K_a et K_{b1} .

Question 27

Les pièces étant sollicitées en traction compression, leur raideur est de la forme : $K = \frac{E.S}{L}$.

E est le module d'élasticité longitudinale, S la section de la pièce soumise à l'effort de serrage et L la longueur de la pièce.

Ainsi pour la vis on détermine les raideurs suivantes :

$$\begin{aligned} - K_{b1} &= \frac{E_b \cdot (\pi \cdot d_{eq}^2 / 4)}{O_{b1} O_{b2}} = 596 \text{ KN} \cdot \text{mm}^{-1}; \\ - K_{b2} &= \frac{E_b \cdot (\pi \cdot d_{eq}^2 / 4)}{E O_{b2}} = 402 \text{ KN} \cdot \text{mm}^{-1}. \end{aligned}$$

Pour les pièces assemblées, on peut supposer que toute la surface des pièces participe au serrage. La section d'une pièce i est alors $S_i = \pi / 4 (d_{exti}^2 - d_{inti}^2)$ ($i = \{1a, 1b, 1c\}$)

La raideur K_a se détermine en considérant que les trois pièces sont en série soit $\frac{1}{K_a} = \frac{1}{K_{1a}} + \frac{1}{K_{1b}} + \frac{1}{K_{1c}}$.

$$AN : K_a = \left[\frac{4}{\pi \cdot E_a} \left(\frac{L_{1a}}{d_{e1a}^2 - d_{i1a}^2} + \frac{2 \cdot L_{1b}}{d_{e1b}^2 - d_{i1b}^2} + \frac{2L_{1c}}{d_{e1c}^2 - d_{i1c}^2} \right) \right]^{-1} = 1479 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}.$$

La différence avec la valeur proposée vient de la simplification du modèle (hypothèse ci-dessus).

Question 28

L'étude de l'équilibre d'une pièce d'assemblage conduit à
$$\begin{cases} N_b - N_a - \overrightarrow{F_{E(2 \rightarrow 3)}} \cdot \vec{X}_2 = 0 \\ T_a - \overrightarrow{F_{E(2 \rightarrow 3)}} \cdot \vec{Z}_2 = 0 \end{cases}.$$

On rappelle les relations suivantes :

$$\begin{aligned} - N_b &= F_0 + K_{b1} \cdot \delta; \\ - N_a &= \frac{T_a}{\Phi} + F_a = F_0 - K_a \cdot \delta. \end{aligned}$$

Ainsi l'allongement des pièces assemblées vaut $\delta = \frac{1}{K_a} \left(F_0 - \frac{T_a}{\Phi} - F_a \right)$.

On obtient alors la relation suivante : $F_0 - \left(\frac{T_a}{\Phi} + F_a \right) = \frac{K_a}{K_a + K_{b1}} \overrightarrow{F_{E(2 \rightarrow 3)}} \cdot \vec{X}_2$.

Question 29

La condition de non décollement conduit à $F_a > 0$.

L'équation de la question 28 s'écrit : $F_0 = \frac{T_a}{\Phi} + \frac{K_a}{K_a + K_{b1}} \overrightarrow{F_{E(2 \rightarrow 3)}} \cdot \vec{X}_2$.

Avec les valeurs suivantes : $T_a = \overrightarrow{F_{E(2 \rightarrow 3)}} \cdot \vec{Z}_2 = 87,5N$, $\Phi = 0,2$, $K_a = 1402 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ et $K_{b1} = 402 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$.

On trouve une valeur de $F_0 = 454\text{N}$

Le serrage préconisé ($F_{0\text{min}} = 6998\text{ N}$) est supérieur à l'effort F_0 appliqué sur la vis, il n'y a pas de risque de décollement.

Question 30

En appliquant les relations d'association de ressorts en série et en parallèle au modèle de la figure 20a, on trouve immédiatement $\frac{1}{K_{\text{eq}}} = \frac{1}{K_{b2}} + \frac{1}{K_a + K_{b1}}$ soit $K_{\text{eq}} = 444\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Question 31

Pour cette question on retiendra les hypothèses suivantes :

- la structure est infiniment rigide ;
- on se place dans le cadre des petits déplacements ;
- le mouvement de 1/0 est une rotation d'axe (O_1, \vec{x}_0) .

En considérant $S = \{\text{châssis (1)} ; \text{miroir (2)}\}$, l'énergie cinétique de S est définie par :

$$T(S/0) = T(1/0) + T(2/0).$$

En appliquant la définition, on exprime $T(1/0) = \frac{1}{2} m_1 \overrightarrow{V_{G1(1/0)}} \cdot \overrightarrow{V_{G1(1/0)}} + \frac{1}{2} \overrightarrow{\omega_{1/0}} \cdot [J_{G1}] \cdot \overrightarrow{\omega_{1/0}}$

$$\text{Avec : } \overrightarrow{\omega_{1/0}} = \dot{\theta}_{10} \cdot \vec{x}_0 \text{ et } \overrightarrow{V_{G1(1/0)}} = \overrightarrow{G_1 O_1} \wedge \overrightarrow{\omega_{1/0}} = \begin{vmatrix} 0 \\ G_1 O_{1z} \cdot \dot{\theta}_{10} \\ -G_1 O_{1y} \cdot \dot{\theta}_{10} \end{vmatrix}.$$

Ainsi, on trouve pour le châssis 1 l'expression suivante :

$$T(1/0) = \frac{1}{2} m_1 \left(G_1 O_{1y}^2 + G_1 O_{1z}^2 \right) \cdot \dot{\theta}_{10}^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{1xx} \cdot \dot{\theta}_{10}^2.$$

En appliquant la définition, on exprime $T(2/0) = \frac{1}{2} m_2 \overrightarrow{V_{G2(2/0)}} \cdot \overrightarrow{V_{G2(2/0)}} + \frac{1}{2} \overrightarrow{\omega_{2/0}} \cdot [J_{G2}] \cdot \overrightarrow{\omega_{2/0}}$

$$\overrightarrow{\omega_{2/0}} = \overrightarrow{\omega_{2/1}} + \overrightarrow{\omega_{1/0}} = \dot{\theta}_{21} \cdot \vec{z}_1 + \dot{\theta}_{10} \cdot \vec{x}_1$$

$$\overrightarrow{V_{G2(2/0)}} = \overrightarrow{V_{G2(2/1)}} + \overrightarrow{V_{G2(1/0)}} = \overrightarrow{G_2 O_2} \wedge \overrightarrow{\omega_{2/1}} + \overrightarrow{G_2 O_1} \wedge \overrightarrow{\omega_{1/0}}$$

$$\overrightarrow{V_{G2(2/0)}} = \begin{vmatrix} G_2 O_{2y} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \cos\theta_{10} - G_2 O_{2z} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \sin\theta_{10} \\ -G_2 O_{2x} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \cos\theta_{10} + G_2 O_{1z} \cdot \dot{\theta}_{10} \\ G_2 O_{2x} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \sin\theta_{10} - G_2 O_{1y} \cdot \dot{\theta}_{10} \end{vmatrix}$$

$$\frac{1}{2} \overrightarrow{\omega_{2/0}} \cdot [J_{G2}] \cdot \overrightarrow{\omega_{2/0}} = \frac{1}{2} \cdot (J_{2xx} \cdot \dot{\theta}_{10} + J_{2zz} \cdot \dot{\theta}_{21})$$

Ainsi on trouve pour le miroir 2 l'expression suivante :

$$T(S/0) = \frac{1}{2} m_2 \left(\left(G_2 O_{2y} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \cos\theta_{10} - G_2 O_{2z} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \sin\theta_{10} \right)^2 + \left(-G_2 O_{2x} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \cos\theta_{10} + G_2 O_{1z} \cdot \dot{\theta}_{10} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} (J_{2xx} \cdot \dot{\theta}_{10}^2 + J_{2zz} \cdot \dot{\theta}_{21}^2) + \left(G_2 O_{2x} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \sin\theta_{10} - G_2 O_{1y} \cdot \dot{\theta}_{10} \right)^2$$

Question 32

Puissances extérieures

Hypothèse : les liaisons en B1 et B2 sont des liaisons sphériques parfaites ce qui conduit à $P_{(\text{liaisons B1, B2})} = 0$.

La puissance due à l'action de la pesanteur vaut : $P_{\text{ext(pesanteur)}} = m_1 \vec{g} \cdot \overrightarrow{V_{G1(1/0)}} + m_2 \vec{g} \cdot \overrightarrow{V_{G2(2/0)}}$.

Ainsi on trouve : $P_{\text{ext(pesanteur)}} = m_1 \cdot g \cdot G_1 O_{1y} \cdot \dot{\theta}_{10} + m_2 \cdot g (G_2 O_{2x} \cdot \dot{\theta}_{21} \cdot \sin \theta_{10} - G_2 O_{1y} \cdot \dot{\theta}_{10})$.

La puissance des efforts en A_i ($i=\{1, 2, 3, 4\}$) s'exprime de la manière suivante : $P_{\text{ext}(F_{A_i})} = \overrightarrow{F_{A_i}} \cdot \overrightarrow{V_{A_i(1/0)}}$, avec :

$$- \overrightarrow{V_{A_i(1/0)}} = \overrightarrow{A_i O_1} \wedge \overrightarrow{\omega_{1/0}} = \begin{vmatrix} 0 \\ A_i O_{1z} \cdot \dot{\theta}_{10} \\ -A_i O_{1y} \cdot \dot{\theta}_{10} \end{vmatrix} ;$$

$$- \overrightarrow{F_{A_i}} = (P_T \overrightarrow{x_0} + P_L \overrightarrow{y_0} + P_V \overrightarrow{z_0}) \cdot \frac{n}{S} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t).$$

Ainsi on trouve : $P_{\text{ext}(F_{A_i})} = (P_L \cdot A_i O_{1z} - P_V \cdot A_i O_{1y}) \cdot \dot{\theta}_{10} \cdot \frac{n}{S} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$.

Puissances internes :

Hypothèse : les liaisons en C1, C2, E1, E2 sont considérées comme parfaites ce qui conduit à $P_{(\text{liaisons C1, C2, E1, E2})} = 0$.

La puissance due à l'action des éléments filetés assimilés à des ressorts pour $i = \{1, 2\}$ vaut :

$$P_{(\text{ressort Di})} = K_{\text{eq}} (\overrightarrow{dU_{D_i,21}} - \overrightarrow{dU_{E_i,21}}) \cdot \left(\frac{dU_{D_i,21}}{dt} - \frac{dU_{E_i,21}}{dt} \right).$$

Question 33

Les inconnues des expressions précédentes des énergies et puissances sont $\dot{\theta}_{10}$ et $\dot{\theta}_{21}$. Il n'existe pas de relation cinématique entre $\dot{\theta}_{10}$ et $\dot{\theta}_{21}$. L'application du théorème de l'énergie cinétique fournit une seule équation, cette méthode ne sera alors pas suffisante.

Les mouvements étant considérés comme étant des petits déplacements, il est proposé d'appliquer le principe des travaux virtuels.

Les principales étapes de la résolution sont détaillées ci-après :

1. analyse et détermination du nombre d'équations de Lagrange à écrire ;
2. calcul des énergies et du travail virtuel,
 - a. énergie cinétique, $T_c(2/0)$ (définie précédemment),
 - b. énergie potentielle, $T_p(2/0)$,
 - c. travail virtuel des liaisons en A_i ;
3. équations de Lagrange,
 - a. équation de Lagrange en θ_{10} ,
 - b. équation de Lagrange en θ_{21} ;
4. résolution pour obtenir $d\theta_{10}$ et $d\theta_{21}$;
5. calcul des petits déplacements $\overrightarrow{dU_{(M2 \in 2/0)}} = \overrightarrow{dU_{(M2 \in 2/1)}} + \overrightarrow{dU_{(M2 \in 1/0)}}$ exprimé en fonction de θ_{10} et θ_{21} .

Question 34

$$\overrightarrow{dU_{(E1 \in 2/0)}} = \overrightarrow{dU_{(E1 \in 2/1)}} + \overrightarrow{dU_{(E1 \in 1/0)}}$$

Avec : $\vec{dU}_{(E1 \in 2/1)} = \vec{dU}_{(O2 \in 2/1)} + \vec{E}_1 \vec{O}_2 \wedge d\theta_{21} \vec{z}_1 = \begin{pmatrix} E_1 O_{2y} \cdot d\theta_{21} \cos\theta_{10} - E_1 O_{2z} \cdot d\theta_{21} \sin\theta_{10} \\ -E_1 O_{2x} \cdot d\theta_{21} \cos\theta_{10} \\ E_1 O_{2x} \cdot d\theta_{21} \sin\theta_{10} \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}$

$\vec{dU}_{(E1 \in 1/0)} = \vec{dU}_{(C1 \in 1/0)} + \vec{E}_1 \vec{C}_1 \wedge d\theta_{10} \vec{z}_0 = \begin{pmatrix} dU_{C1,10x} \\ dU_{C1,10y} + E_1 C_{1z} \cdot d\theta_{10} \\ dU_{C1,10z} - E_1 C_{1y} \cdot d\theta_{21} \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}$

Remarque : le calcul de $\vec{dU}_{(E1 \in 2/1)}$ à partir des résultats de $\vec{dU}_{(C1 \in 1/0)}$ permet de prendre en compte la déformation de la structure.

On constate que $dU_{(E1 \in 2/0)}$ est maximal pour $t = 0,5$ s.

Application numérique : $\vec{dU}_{(E1 \in 2/0)_{\text{Max}}} \approx \begin{pmatrix} 0,004 \text{ mm} \\ -1,77 \text{ mm} \\ 0,88 \text{ mm} \end{pmatrix}$

Question 35

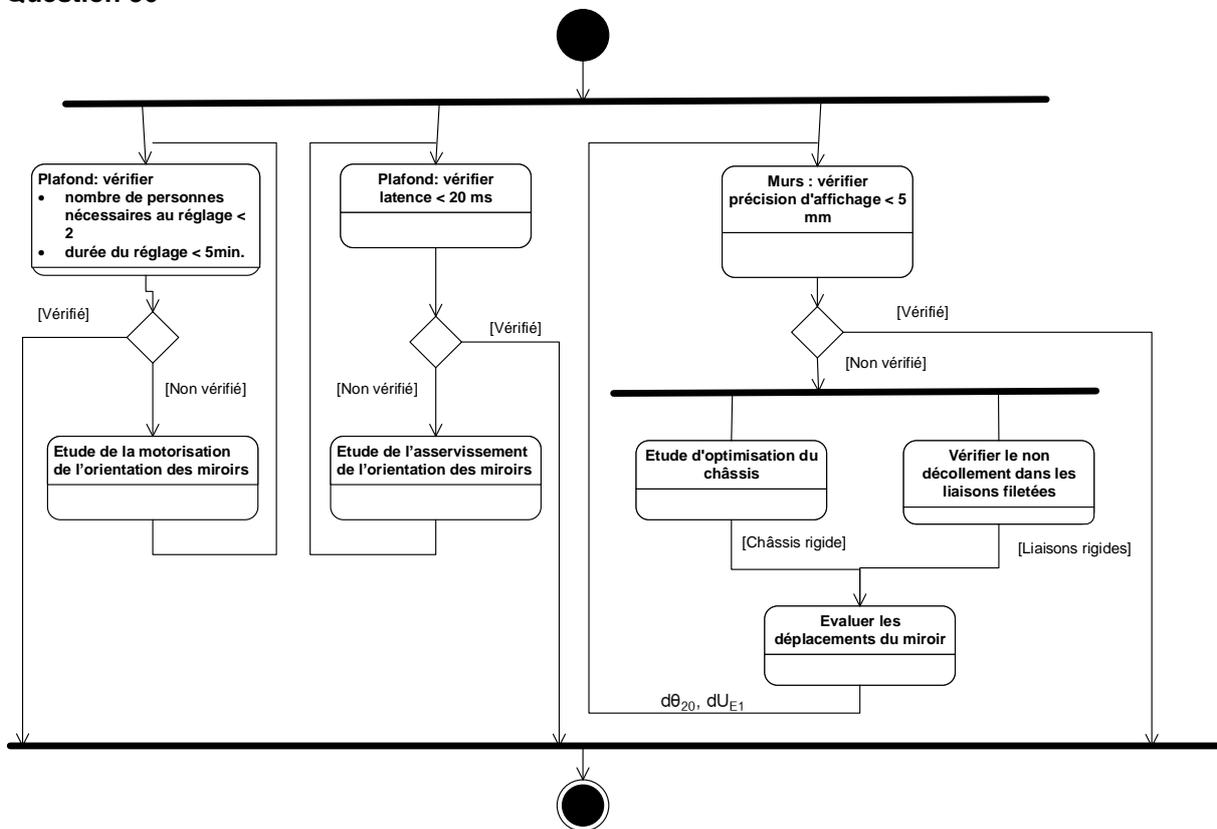
L'erreur angulaire du miroir vaut $d\beta = d\theta_{20z} = d\theta_{21} \cdot \cos \theta_{10}$.

Ainsi on trouve $d\beta_{\text{max}} = d\theta_{20z, \text{max}} = 0,005^\circ$.

L'erreur de positionnement vaut $dL_{1, \text{max}} = dU_{E1x, \text{max}} = 0,004$ mm.

On se trouve dans la zone de la figure 6 pour laquelle $dx < 5$ mm, le déplacement d'une personne sur la passerelle n'aura pas d'influence sur le désalignement des images.

Question 36



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 d'un cube immersif 3D (CAVE). L'objectif de l'étude était de mettre en place et en application les outils de modélisation permettant de caractériser ces défauts géométriques d'orientation des miroirs et de choisir les solutions technologiques de réglage associées. Après avoir identifié l'influence d'un défaut géométrique du système de projection sur un motif simple, l'étude s'attachait par la suite à vérifier l'amélioration que pouvaient apporter certains composants sur ces performances. Par ailleurs, le CAVE étant utilisé de manière collaborative avec plusieurs personnes, l'influence des personnes sur le comportement de la structure était également abordée dans un second temps.

La problématique générale était abordée en cinq parties :

- la première partie consistait à analyser l'influence d'un défaut géométrique intrinsèque du système de projection sur les défauts d'alignements relatifs entre deux écrans ;
- la seconde partie permettait de mettre en place une solution de réglage visant à compenser les défauts d'alignements relatifs entre les écrans ;
- la troisième partie s'intéressait à la mise en place d'une démarche d'optimisation du châssis porteur ;
- la quatrième partie traitait du comportement de la liaison entre le châssis porteur et le miroir de projection ;
- enfin la cinquième partie portait sur l'évaluation des performances du système de positionnement des miroirs de projection sur les murs lors du déplacement d'une personne sur la passerelle et ce à partir des modèles mis en œuvre dans les deux parties précédentes.

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 deux tiers du sujet, pour bon nombre de candidats il se dégage un manque de maîtrise de connaissances et compétences qui peuvent être qualifiées d'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. 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 des candidats à réaliser des schémas clairs et à proposer 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 rigueur dans l'usage des notations des scalaires et des vecteurs. Il est à remarquer que l'utilisation des outils de description des modèles mécaniques (schéma cinématique, graphe de structure) est mal connue et mal

maîtrisée par un nombre non négligeable de candidats. Par ailleurs, les méthodes de résolution élémentaires (fermeture géométrique, principe fondamental de la statique, calcul d'énergie cinétique, calcul de moment d'une force...) et les formulations d'hypothèses (forme d'une matrice d'inertie, modèle de comportement de solide déformable) sont galvaudées par certains 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. Ainsi, il est nécessaire que les étapes relatives à la modélisation et 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 général en lien insuffisant avec le problème à traiter ; elles s'avèrent également insuffisamment étayées technologiquement et scientifiquement.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie 1

Le questionnement proposait au candidat d'analyser l'influence d'un défaut géométrique d'orientation d'un miroir, appartenant au système de projection, sur la qualité de la visualisation d'un motif géométrique simple. Une partie des candidats s'est contentée d'énoncer des formules sans préciser leur origine, les justifications sont souvent hasardeuses quand elles existent.

Pour la troisième question, il était suggéré d'effectuer des schémas. Malheureusement un certain nombre de candidats n'a pas choisi de retenir cette proposition. Par ailleurs, une proportion non négligeable de candidats propose une représentation du motif déformé sans aucune explication.

Les candidats qui ont pris le temps de la réflexion pour proposer des justifications cohérentes avec ou sans schéma ont su proposer des réponses très satisfaisantes.

Partie 2

Partie 2.1 : Analyse de l'assemblage

Afin de limiter l'influence des défauts précédemment constatés, il était demandé aux candidats de valider un choix de solution technologique pour la motorisation du miroir du plafond à l'aide d'un vérin électrique.

Ces questions n'ont globalement pas posé de problème aux candidats maîtrisant les connaissances et compétences élémentaires de résolution.

Pour les candidats moins bien préparés, les réponses sont majoritairement dépourvues de toute rigueur et de justifications ce qui nuit gravement à la qualité de ces copies. Le jury remarque une volonté de certains candidats de proposer, quoi qu'il advienne, une tentative de justification sans réelle réflexion. Par exemple, certains candidats pensent que le système doit forcément être isostatique, ils tentent de le justifier plutôt que de mettre en œuvre une démarche rigoureuse qui leur aurait permis d'aboutir à un résultat correct.

Le jury constate qu'un nombre important de candidats propose des réponses hors sujet en voulant transformer la problématique à résoudre : passer d'un modèle hyperstatique à un modèle isostatique par exemple.

L'évaluation a nettement privilégié le raisonnement par rapport au résultat seul. Le jury invite fortement les candidats à vérifier l'homogénéité de leurs résultats tout comme à rester concis et précis dans la définition et l'application des théorèmes utilisés pour obtenir les équations proposées.

Concernant la validation de solution technologique, il était impératif de vérifier l'intégralité des critères retenus pour l'étude en question.

Partie 2.2 : Implantation d'un vérin électrique

Une fois le choix de solution effectué dans la partie précédente, il était proposé d'implanter cette solution au sein du système étudié. Cela conduisait à établir les différentes relations nécessaires en vue de modéliser la commande asservie d'un vérin électrique.

Le manque de rigueur et de justifications pour les premières questions de cette sous-partie a conduit à de mauvaises performances pour une majorité de candidats.

La représentation structurelle classique d'un asservissement se révèle malheureusement insuffisamment maîtrisée pour de nombreux candidats alors qu'ils peuvent être amenés à l'enseigner à différents niveaux (cycle terminal du lycée, STS, CPGE...). Le jury recommande aux candidats de ne pas négliger cette partie du programme de l'agrégation.

Partie 3

Le sujet demandait au candidat de mettre en place et justifier une modélisation de types éléments finis pour améliorer la structure du châssis.

Cette partie a été traitée par une majorité des candidats. Le jury constate un manque de précision dans la proposition de modèle ainsi que dans les notions globales associées à la mise en œuvre d'un calcul par éléments finis et d'un calcul d'optimisation : fonction objectif, variable de conception et contraintes d'optimisation.

Les analyses de modélisation sont restées dans l'ensemble assez générales ne permettant pas de mettre en évidence la qualité des raisonnements technologiques et scientifiques exigibles au concours de l'agrégation externe.

Partie 4

Le questionnement permettait au candidat, en se basant sur une modélisation mécanique d'un composant simple fourni, de définir le comportement mécanique d'une liaison entre le châssis et le miroir.

Le jury regrette de nouveau le manque de précision dans la définition des théorèmes à utiliser pour obtenir les équations proposées.

Une grande majorité des candidats a traité cette partie mais moins d'un quart d'entre eux a su déterminer la raideur équivalente du modèle proposé pour le comportement de la tige filetée en tenant compte correctement de l'assemblage de pièces en série ou en parallèle. Il est regrettable que ce genre de modélisation élémentaire ne soit pas mieux maîtrisée de la part des candidats.

Partie 5

En utilisant les modèles mis en place dans les deux parties précédentes, le questionnement proposait aux candidats d'étudier les performances du système de positionnement des miroirs de projection sur les murs lors du déplacement d'une personne sur la passerelle.

Afin d'éviter des développements calculatoires, le jury constate qu'une majorité des candidats n'hésitent pas à reformuler leurs propres hypothèses qui ne correspondent pas à celles données dans le sujet. Par ailleurs, les méthodes de résolution sont malheureusement mal maîtrisées par une majorité des candidats. De nombreux candidats se contentent de proposer une forme très simplifiée des vitesses et des énergies cinétiques sans prendre en compte le mouvement relatif entre les deux ensembles ni le fait que leurs centres de gravité ne sont pas fixes.

Cette volonté de vouloir systématiquement simplifier certaines expressions, qui ne devraient pas l'être et s'avèrent fausses au final, a été relevé dans plusieurs questions. Il en est de même pour le choix de méthodes, les candidats se contentent souvent de citer les méthodes basiques telles que le principe de l'énergie cinétique. Certains concepts, relevant du programme de l'agrégation, ne sont pas connus par un grand nombre de candidats tels que les approches énergétiques mettant en œuvre les équations de

Lagrange ou encore les torseurs de petits déplacements. Le jury invite les candidats à mieux s'appropriier les concepts attendus à ce niveau de recrutement.

Commentaires généraux

Le jury encourage 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.

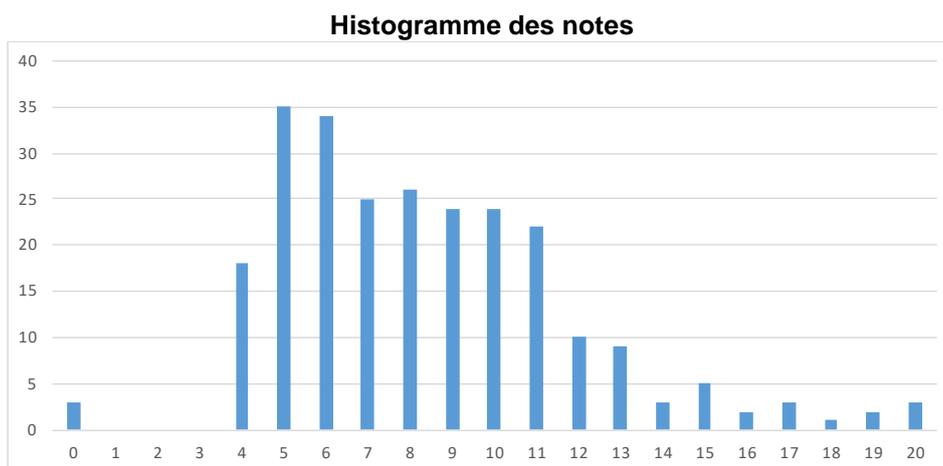
De façon complémentaire, la rigueur scientifique et la maîtrise des outils mathématiques usuels nécessaires aux sciences industrielles de l'ingénieur sont des prérequis indispensables.

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

252 copies ont été évaluées. La moyenne de l'épreuve s'établit à 8/20 avec un écart-type de 3,5/20. Les notes s'étalent entre 0/20 et 20/20.



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 19 avril 2016

- 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_externe/99/3/s2020_agreg_externe_sii_mecanique_3_1259993.pdf

Éléments de correction

Question 1.1. Dans le cadre des hypothèses du sujet, l'action élémentaire du mors (2) sur le câble (c) est modélisée par le torseur suivant :

$$\{dF_{2 \rightarrow c}\}_M = \begin{Bmatrix} d\vec{R}_{2 \rightarrow c} \\ \vec{0} \end{Bmatrix} \text{ avec } d\vec{R}_{2 \rightarrow c} = -P(M) dS \vec{n} - f P(M) dS \vec{x}_c.$$

Question 1.2. Pour obtenir le torseur global donné dans le sujet, il faut :

- réduire le torseur élémentaire en O ;
- exprimer \vec{n} en fonction de \vec{y}_c et \vec{z}_c ;
- intégrer sur la surface de contact avec $dS = R_c d\theta dx$ pour θ variant de $-\frac{\pi}{4}$ à $\frac{\pi}{2}$ et pour x variant de $-\frac{l_2}{2}$ à $\frac{l_2}{2}$.

Question 1.3. Pour l'action du mors 1 sur le câble, seuls la résultante suivant \vec{z}_c et le moment en O suivant \vec{y}_c vont changer de signe :

$$\{F_{1 \rightarrow c}\}_O = \begin{Bmatrix} -P_{m1} R_c l_1 \left(f_c \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \vec{x}_c + \frac{1}{4} \vec{y}_c - \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \vec{z}_c \right) \\ -P_{m1} R_c^2 l_1 f_c \left(-\frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \vec{y}_c - \frac{1}{4} \vec{z}_c \right) \end{Bmatrix}.$$

Question 1.4. Si on isole le système d'attache et la cabine, les actions mécaniques extérieures sont :

- le poids ;
- l'action du câble.

Le poids étant vertical, la pince n'exerce pas de résultante d'action mécanique suivant \vec{z}_c .

On a donc $(\vec{R}_{1 \rightarrow c} + \vec{R}_{2 \rightarrow c}) \cdot \vec{z}_c = 0$ soit $P_{m1} R_c l_1 \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) - P_{m2} R_c l_2 \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) = 0$. On obtient donc $P_{m1} l_1 = P_{m2} l_2$.

Question 1.5. En sommant les deux torseurs précédents et en prenant l'action réciproque, on obtient :

$$\{F_{c \rightarrow \{1+2\}}\}_O = \begin{Bmatrix} 2 P_{m2} R_c l_2 \left(f_c \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \bar{x}_c + \frac{1}{4} \bar{y}_c \right) \\ - \frac{1}{2} P_{m2} R_c^2 l_2 f \bar{z}_c \end{Bmatrix}$$

Question 1.6. Pour le ressort extérieur, on a : $G = 84 \text{ GPa}$, $d = 15 \text{ mm}$, $D = 73 \text{ mm}$, $n = 6$. On trouve donc $K_{Re} = 227,74 \text{ N.mm}^{-1}$ avec la formule $K = \frac{G d^4}{8 D^3 n}$.

Pour le ressort intérieur, on a : $G = 84 \text{ GPa}$, $d = 10,5 \text{ mm}$, $D = 44,5 \text{ mm}$, $n = 8,7$. On trouve donc $K_{Ri} = 166,47 \text{ N.mm}^{-1}$.

L'effort total développé par les deux ressorts en position pince fermée : $F_{pf} = K_{Re} (L_{0Re} - L_{pfRe}) + K_{Ri} (L_{0Ri} - L_{pfRi})$. $F_{pf} = 227,74 \times (186 - 149) + 166,47 \times (166 - 138) = 13\,087,57 \text{ N}$ en position pince fermée.

Question 1.7. Pour répondre à la question, on peut :

- isoler 3 et appliquer le PFS, à l'aide de l'équation des résultantes suivant \bar{z}_c trouver l'action de 4 → 3 en fonction de l'effort des 2 ressorts F_{pf} ;
- isoler {2 ; 4} et appliquer le PFS, à l'aide de l'équation des moments en A suivant \bar{x}_c trouver l'action de 3 → 4 en fonction de P_{m2} ;
- relier P_{m2} à F_{pf} .

Question 1.8.

- On isole 3

Le bilan des actions mécaniques extérieures donne :

$$\{F_{1 \rightarrow 3}\}_M = \begin{Bmatrix} Y_{13} \bar{y}_c \\ L_{13} \bar{x}_c \end{Bmatrix}, \{F_{\{Re+Ri\} \rightarrow 3}\}_M = \begin{Bmatrix} -F_{pf} \bar{z}_c \\ \vec{0} \end{Bmatrix}, \{F_{4 \rightarrow 3}\}_B = \begin{Bmatrix} F_{43} \sin 25 \bar{y}_c + F_{43} \cos 25 \bar{z}_c \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

Le théorème de la résultante statique en projection suivant \bar{z}_c permet d'écrire : $F_{43} \cos 25 = F_{pf}$.

- On isole {2 ; 4}

Le bilan des actions mécaniques extérieures est le suivant.

$$\{F_{1 \rightarrow 2}\}_A = \begin{Bmatrix} X_{13} \bar{x}_c + Y_{13} \bar{y}_c + Z_{13} \bar{z}_c \\ M_{13} \bar{y}_c + N_{13} \bar{z}_c \end{Bmatrix}$$

$$\{F_{3 \rightarrow 4}\}_B = \begin{Bmatrix} -F_{43} \sin 25 \bar{y}_c - F_{43} \cos 25 \bar{z}_c \\ \vec{0} \end{Bmatrix} \text{ et } \overrightarrow{M_{A,3 \rightarrow 4}} = \overrightarrow{AB} \wedge \overrightarrow{R_{3 \rightarrow 4}} = (a F_{43} \cos 25 + b F_{43} \sin 25) \bar{x}_c$$

$$\{F_{C \rightarrow 2}\}_O = \begin{Bmatrix} P_{m2} R_c l_2 \left(f_c \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \bar{x}_c + \frac{1}{4} \bar{y}_c + \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \bar{z}_c \right) \\ P_{m2} R_c^2 l_2 f_c \left(\frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \bar{y}_c - \frac{1}{4} \bar{z}_c \right) \end{Bmatrix} \text{ et } \overrightarrow{M_{A,C \rightarrow 2}} = \overrightarrow{M_{O,C \rightarrow 2}} + \overrightarrow{AO} \wedge \overrightarrow{R_{C \rightarrow 2}} = P_{m2} R_c^2 l_2$$

$$f_c \left(\frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \bar{y}_c - \frac{1}{4} \bar{z}_c \right) + (-a \bar{y}_c) \wedge P_{m2} R_c l_2 \left(f \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \bar{x}_c + \frac{1}{4} \bar{y}_c + \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \bar{z}_c \right) = -a P_{m2} R_c l_2 \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \bar{x}_c + P_{m2} R_c^2 l_2 f_c \left(\frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \bar{y}_c - \frac{1}{4} \bar{z}_c \right) + a P_{m2} R_c l_2 f \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \bar{z}_c$$

Le théorème du moment statique en A en projection suivant \bar{x}_c permet d'écrire :

$$a F_{43} \cos 25 + b F_{43} \sin 25 = a P_{m2} R_c l_2 \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right)$$

- Les deux équations obtenues permettent d'écrire que :

$$(a + b \tan 25) F_{pf} = a P_{m2} R_c l_2 \frac{1}{4} \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right) \text{ donc } P_{m2} = \frac{4 (a + b \tan 25) F_{pf}}{a R_c l_2 \left(\frac{3\pi}{2} + 1 \right)}$$

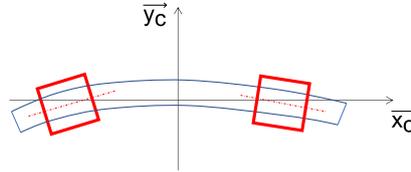
L'application numérique donne $P_{m2} = 17,56 \text{ MPa}$ et $\{F_{c \rightarrow \{1+2\}}\}_O = \begin{Bmatrix} 11\,153 \bar{x}_c + 9074 \bar{y}_c \\ 31,85 \bar{z}_c \end{Bmatrix}$.

Question 1.9. On isole la cabine. On applique le théorème de la résultante statique en projection

suitant \bar{x}_c : $2 \overrightarrow{R_{C \rightarrow \{1;2\}}} \cdot \bar{x}_c - M_{\max} g \bar{y}_g \cdot \bar{x}_c = 0$ soit $M_{\max} = \frac{2 \overrightarrow{R_{C \rightarrow \{1;2\}}} \cdot \bar{x}_c}{g \frac{\sqrt{2}}{2}} = \frac{2 \overrightarrow{R_{C \rightarrow \{1;2\}}} \cdot \bar{x}_c}{g \frac{\sqrt{2}}{2}} = 3215,9 \text{ kg}$.

Question 1.10. $\frac{M_{\max i}}{M_{\text{cabine chargée}}} = \frac{3215}{570+6 \times 80} = 3,06 > 3$, l'exigence est donc respectée.

Question 1.11.



Si les serrages ne sont pas coaxiaux, cela va engendrer une déformation du câble, comme illustré sur la figure ci-dessus. Or le câble étant relativement rigide, la pression de contact ne sera pas correctement répartie sur les surfaces de contact entre le câble et la pince ce qui peut engendrer un mauvais serrage.

Il faut donc maîtriser la coaxialité de serrage entre les 2 pinces.

Question 1.12. Cette spécification permet de localiser les axes des liaisons des pinces par rapport à la traverse. Cette spécification participe, mais ce n'est pas suffisant, à assurer des serrages coaxiaux des deux pinces.

Symbole de la spécification	Éléments Non-idéaux		Éléments Idéaux		
	Élément(s) tolérancé(s)	Élément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance	
Type de spécification <input type="checkbox"/> forme <input checked="" type="checkbox"/> position <input type="checkbox"/> orientation	<input type="checkbox"/> unique <input checked="" type="checkbox"/> groupe	<input checked="" type="checkbox"/> unique <input type="checkbox"/> multiples	<input checked="" type="checkbox"/> simple <input type="checkbox"/> commune <input type="checkbox"/> système	forme/taille <input type="checkbox"/> simple <input checked="" type="checkbox"/> composé	Situation par rapport aux références spécifiées
Schéma de la spécification sur le nominal	description littérale 2 axes de deux surfaces nominalement cylindriques.	description littérale Surface nominalement cylindrique.	description littérale Droite « A » – Axe du plus grand cylindre tangent extérieur matière.	description littérale 2 cylindres de diamètres 0,2 mm.	description littérale Les axes de la ZT sont parallèles à « A » et situés à 325 mm.
	croquis	croquis	croquis	croquis	croquis
Expression de la contrainte fonctionnelle associée à cette spécification : Les 2 éléments tolérancés doivent être contenus dans les deux zones de tolérances.					

Question 1.13. Trois nuances d'aciers de construction sont utilisées pour cette pièce : S235, S275 et S355 – le nombre est la limite élastique en MPa –. Cela s'explique par le fait que les différentes parties ne subissent pas les mêmes contraintes mécaniques. L'âme de la pièce repérée EFGH subit donc des sollicitations plus importantes.

Question 1.14. Au regard de la série envisagée, les procédés de forgeage et fonderie ne seraient pas rentables. Le soudage permet à moindre coût d'obtenir une forme de pièce creuse, rigide et résistante.

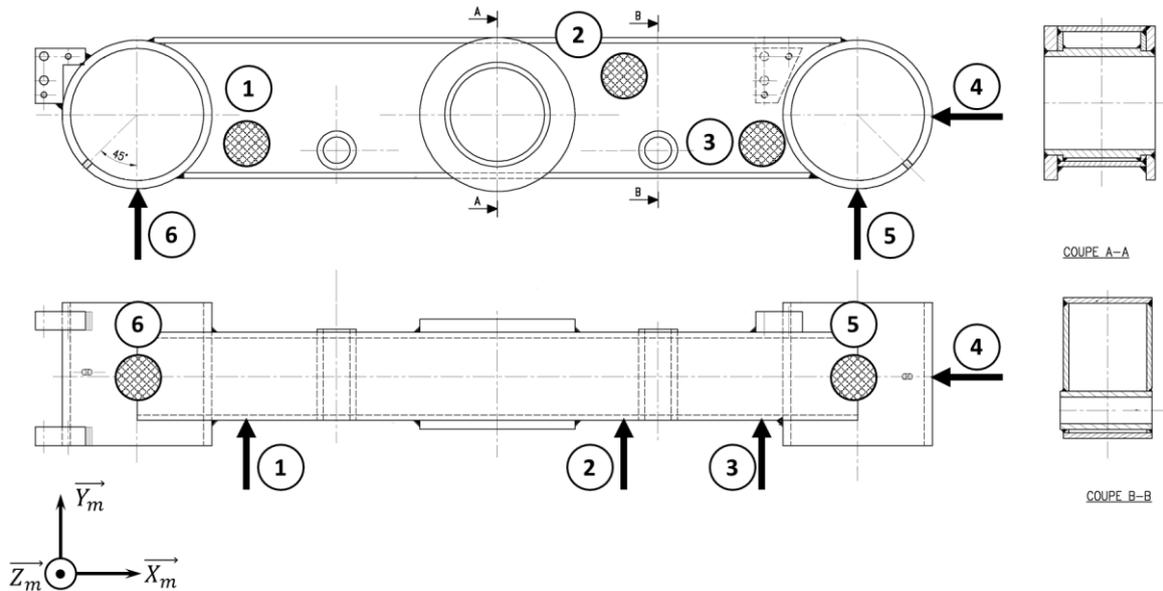
Pour souder le brut, on peut par exemple utiliser le soudage TIG.

Question 1.15. La chronologie de la gamme de fabrication proposée est naturelle. En effet, on usine les pièces après les avoir soudées afin d'avoir un meilleur positionnement relatif des surfaces fonctionnelles.

Le recuit permet de relaxer la pièce après soudage : sous les effets thermiques localisés, des contraintes internes peuvent apparaître dans la pièce et provoquer sa déformation. Le traitement thermique permet d'atténuer ces contraintes internes.

Ainsi, usiner la pièce « détensionnée » permettra de minimiser les défauts de positionnement des surfaces entre elles. Si le recuit avait été fait après l'usinage, des défauts seraient apparus sur les surfaces usinées et la pièce n'aurait plus été conforme.

Question 1.16.



On choisit un centre de fraiseage 4 axes (X, Y, Z, A). La pièce pourra tourner autour de \vec{X}_m . La mise en position choisie permet d'avoir accès à l'ensemble des surfaces fonctionnelles à usiner dans la même phase. La pièce étant brute, on ne peut s'appuyer que sur des surfaces brutes pour réaliser la mise en position.

Phase 10 :

- fraise à surfacer pour usiner les plans ;
- barre d'alésage pour aléser les cylindres.

Question 1.17. Palpage et construction des ET :

- pour chaque cylindre Cyl_2 et Cyl_3, on palpe 8 points (au minimum 5 points) répartis sur le cylindre (4 points 2 à 2 diamétralement opposés dans 2 plans différents) ;
- on construit les 2 axes parfaits de ces deux cylindres (critères des moindres carrés).

Palpage et construction de la RS :

- pour Cyl_1, on palpe 8 points (au minimum 5 points) répartis sur le cylindre (4 points 2 à 2 diamétralement opposés dans 2 plans différents) ;
- on construit l'axe du cylindre tangent extérieur matière qui minimise les écarts.

Limites de la ZT :

- on palpe PI_1, PI_2, PI_3 et PI_4 (au minimum 4 points par plan) ;
- on construit PL_1, PL_2, PL_3 et PL_4 par le critère des moindres carrés à partir des 4 nuages précédents.

Construction de points :

- on construit le Pt_1 intersection de l'axe des moindres carrés de Cyl_2 et de PI_1 ;
- on construit le Pt_2 intersection de l'axe des moindres carrés de Cyl_2 et de PI_2 ;
- on construit le Pt_3 intersection de l'axe des moindres carrés de Cyl_3 et de PI_3 ;
- on construit le Pt_4 intersection de l'axe des moindres carrés de Cyl_3 et de PI_4.

Mesure de distances :

- mesure de la distance d1 du Pt_1 à la droite RS ;
- mesure de la distance d2 du Pt_2 à la droite RS ;
- mesure de la distance d3 du Pt_3 à la droite RS ;
- mesure de la distance d4 du Pt_4 à la droite RS.

Vérification :

- vérification que chaque di appartient à 325+/-0,1 mm.

Question 1.18. Contrôler la spécification de localisation participera à garantir la coaxialité du serrage mais ce ne sera pas suffisant. En effet, pour garantir l'exigence de coaxialité, les défauts géométriques des pinces et leur positionnement dans la traverse devront être maîtrisés.

Question 2.1. On a $\overrightarrow{QM} = -f \overrightarrow{y_5} - e \overrightarrow{z_5}$.

$$\overrightarrow{QM} \cdot \overrightarrow{y_c} = y_m = -f \overrightarrow{y_5} \cdot \overrightarrow{y_c} - e \overrightarrow{z_5} \cdot \overrightarrow{y_c}$$

$$y_m = -f \cos \beta + e \sin \beta \text{ ou } \frac{y_m}{\sqrt{e^2+f^2}} = \frac{-f \cos \beta + e \sin \beta}{\sqrt{e^2+f^2}} = \sin \beta \cos \beta_0 - \cos \beta \sin \beta_0 = \sin(\beta - \beta_0).$$

$$\text{D'où } \frac{y_m}{k} = \sin(\beta - \beta_0) \text{ avec } k = \sqrt{e^2+f^2} \text{ et } \cos \beta_0 = \frac{e}{\sqrt{e^2+f^2}}, \sin \beta_0 = \frac{f}{\sqrt{e^2+f^2}} \text{ ou } \tan \beta_0 = \frac{f}{e}.$$

Question 2.2. Les applications numériques donnent : $\beta_0 = 13,3^\circ$, $k = 217,33 \text{ mm}$, $\beta_{pf} = -19,58^\circ$, $\beta_{po} = 3,77^\circ$.

Question 2.3. On considère la course positive. On a $\text{course} = c \sin(\beta_{po}) - c \sin(\beta_{pf}) = 30,07 \text{ mm}$.

Position pince fermée : $F_{pf} = 13\,087,57 \text{ N}$.

Position pince ouverte : $F_{po} = F_{pf} + (K_{Re} + K_{Ri}) \times \text{course} = 24\,939,71 \text{ N}$.

Pour la suite, nous prenons les valeurs données dans le sujet : $\beta_{pf} = -19,6^\circ$, $\beta_{po} = 3,77^\circ$, $F_{pf} = 13\,090 \text{ N}$ et $F_{po} = 24\,930 \text{ N}$.

Question 2.4. On a $\{F_{7 \rightarrow 5}\} = \begin{Bmatrix} -F \overrightarrow{z_c} \\ \vec{0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -F (\sin \beta \overrightarrow{y_5} + \cos \beta \overrightarrow{z_5}) \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$.

Pince fermée :

$$\beta = \beta_{pf} = -19,6^\circ, F = F_{pf} = 13\,090 \text{ N}, \{F_{7 \rightarrow 5}\} = \begin{Bmatrix} -F \overrightarrow{z_c} \\ \vec{0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 4\,391,06 \overrightarrow{y_5} - 12\,331,53 \overrightarrow{z_5} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

Pince ouverte :

$$\beta = \beta_{po} = 3,77^\circ, F = F_{po} = 24\,940 \text{ N et } \{F_{7 \rightarrow 5}\} = \begin{Bmatrix} -F \vec{z}_c \\ \vec{0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1639,84 \vec{y}_5 - 24\,886,03 \vec{z}_5 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}.$$

$$\text{Question 2.5. } \{F_{coh}\} = \{F_{ext \rightarrow y+}\} = \begin{Bmatrix} -F \vec{z}_c \\ \vec{0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -F (\sin \beta \vec{y}_5 + \cos \beta \vec{z}_5) \\ -(c-y) F \cos \beta \vec{x}_5 \end{Bmatrix}$$

Question 2.6. La poutre est soumise à de la flexion simple et traction/compression.

Question 2.7. C'est dans la section droite en Q que le moment fléchissant est le plus grand. De plus, la section droite est la plus faible en ce point. L'effort normal constant le long de la poutre et le moment fléchissant engendrent tous deux une contrainte normale. C'est donc en Q que la contrainte normale sera la plus grande.

Question 2.8. La contrainte normale est la superposition de la contrainte normale de compression et de la contrainte normale de flexion : $\sigma_{n,maxi} = -\frac{F \sin \beta}{S} - \frac{12 \frac{h}{2} c F \cos \beta}{j (h^3 - d_i^3)} = -73,92 \text{ MPa}.$

Question 2.9. On fait l'hypothèse que les déformations du mors fixe 1 sont négligeables devant celle du levier 5. De plus, le levier et le mors sont en liaison pivot. On peut donc décider de bloquer les déplacements radiaux sur la surface cylindrique et axiaux sur la surface plane de contact avec le levier 5.

Le levier est aussi en liaison avec le galet 6. Ce galet bloque la rotation du levier 5 par rapport à la pince et impose un déplacement vertical (via le rail de débrayage) qui va comprimer les ressorts de serrage. On bloque donc les déplacements radiaux de la surface de contact avec le galet 6.

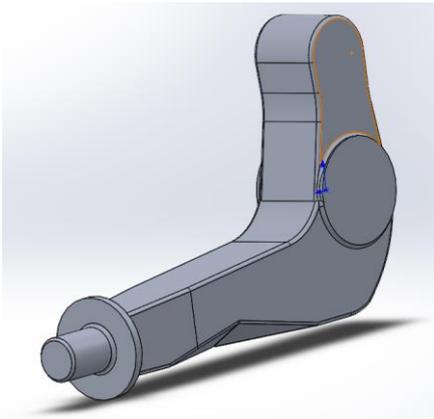
Avec ces conditions limites en déplacement, tous les degrés de liberté de la pièce 5 sont supprimés et une étude éléments finis peut être menée.

Le galet 7 est soumis à 2 glisseurs suivant \vec{z}_c ; donc l'action du galet 7 sur 5 transmis par les 2 paliers sera suivant $-\vec{z}_c$. Ensuite la base attachée au levier 5 ($\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_5$) n'est pas alignée avec la base ($\vec{x}_c, \vec{y}_c, \vec{z}_c$) ce qui fait qu'il y a 2 composantes. Enfin l'angle β change de signe entre la position pince ouverte et pince fermée (Q2.3), d'où le changement de signe de F1 et F3.

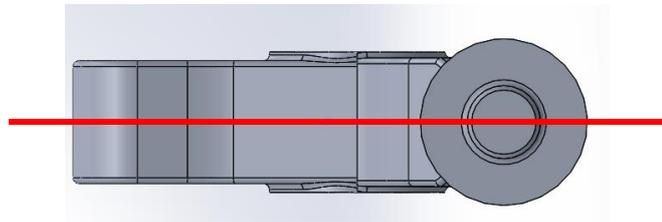
Question 2.10. Comme évoqué précédemment, c'est au niveau du point Q que l'on observe les contraintes les plus importantes. La valeur maximale atteinte dans la simulation est de $1,1 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2} = 110 \text{ MPa}$. Cette valeur est à comparer aux 73,92 MPa déterminés à la question 2.8. L'écart peut s'expliquer par :

- la différence des contraintes observées (on compare la contrainte normale à la contrainte de Von Mises qui combine contrainte normale et tangentielle) ;
- la différence de modèle (on compare un modèle élément fini à un modèle poutre qui ne respecte pas exactement les hypothèses. En effet, la longueur de la poutre n'est pas vraiment grande par rapport aux autres dimensions) ;
- la section droite utilisée dans le modèle poutre n'est pas entièrement compatible avec la section du modèle éléments finis.

Question 2.11.



Forme du brut



Plan de joint des deux matrices

Question 2.12. Dans le but de minimiser la masse du système d'attache et de minimiser les effets de la corrosion, un alliage d'aluminium peut être envisagé plutôt qu'un acier. De plus, les contraintes ne sont pas très importantes.

Question 2.13. La limite élastique de l'EN AC-44100 peut varier de 105 à 116 Mpa. Celle de l'EN AW-6013 est de 317 à 350 MPa. De plus pour ce dernier la limite à la fatigue est plus importante. La contrainte de Von Mises maximale est de 110 MPa. Si on souhaite avoir un coefficient de sécurité de 3 afin de garantir la sécurité des personnes et des biens, on peut donc préconiser l'utilisation de l'EN AW-6013.

De plus, le matriçage (à chaud) est un procédé classique de mise en forme des pièces brutes en aluminium qui garantit une bonne tenue à la fatigue des pièces. Ce choix de mise en forme est donc naturel à partir du matériau choisi.

Le système va réaliser 2 cycles toutes les 10 minutes : car la pièce est sollicitée une première fois lors de l'ouverture et une seconde fois lors de la fermeture. La pince reste ouverte (voir figures pages 5 et 6) grâce à une butée et non grâce au levier. Ce dernier n'est donc plus sollicité lorsque la pince est ouverte en gare.

Au cours de sa vie, le levier va donc subir 2 cycles toutes les 10 minutes (un trajet dure 10 minutes), soit 12 cycles par heure, 96 par jour, 17 568 par an (183 jours) et 351 360 fois au cours de sa vie.

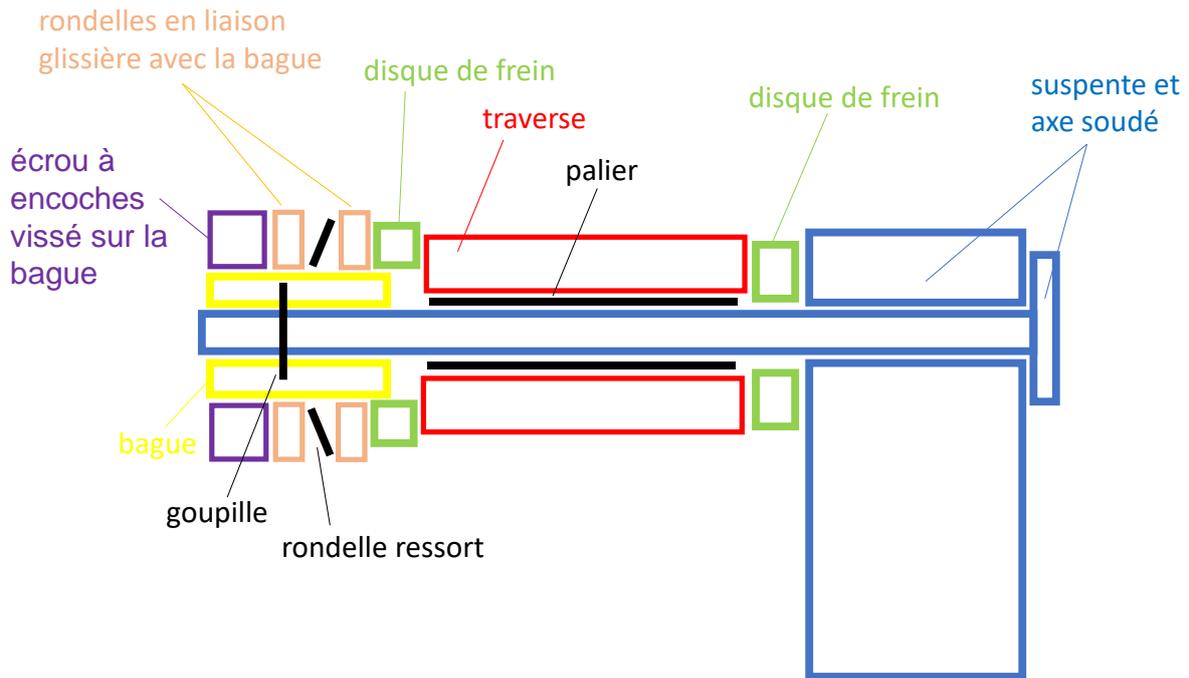
On constate qu'avec le choix de l'aluminium EN AW-6013, la limite à la fatigue est supérieure au maximum de contraintes calculées (110 MPa) pour 350 000 cycles sans toutefois de coefficient de sécurité.

Question 3.1. Pour dimensionner un palier il faut qu'au niveau du contact on ait :

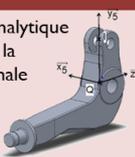
- $V < V_{lim}$;
- $P < P_{lim}$;
- $PV < PV_{lim}$.

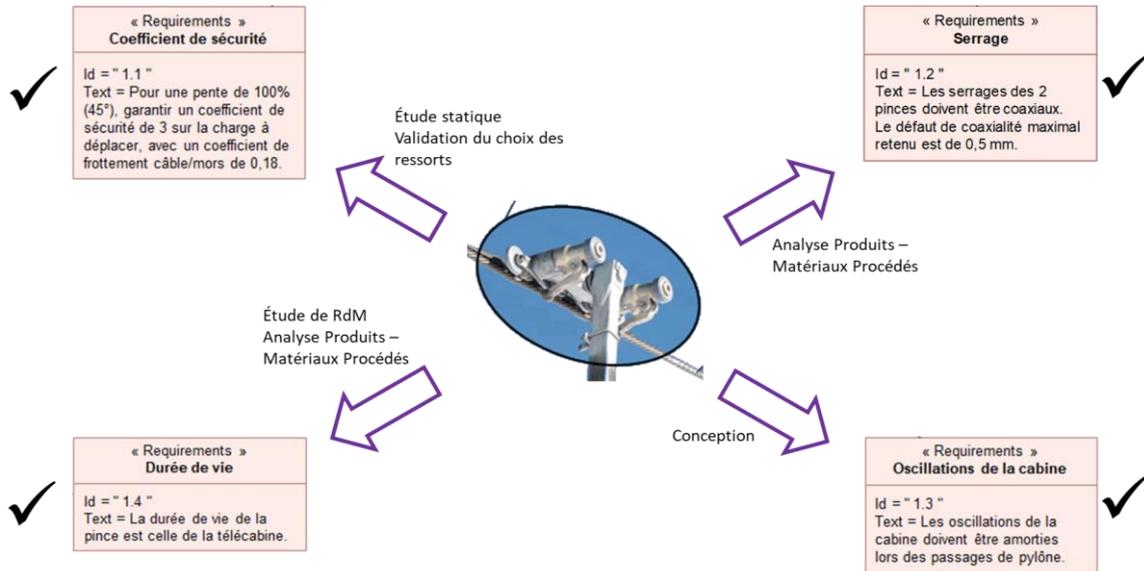
En faisant une hypothèse de répartition de pression de contact uniforme ou non, on peut estimer la pression de contact P . Ici la vitesse relative au niveau du contact est faible car les oscillations sont faibles donc le critère prépondérant sera $P < P_{lim}$.

Question 3.2. Pour cette liaison, des disques de frein et un effort presseur peuvent permettre d'amortir les mouvements d'oscillations. Le schéma technologique ci-dessous peut être proposé.



Question 4.

Performances attendues	Performances simulées et mesurées	Démarche et conclusion
<p>Objectif : valider les choix technologiques sur le système d'attache</p>		
<p>« Requirements » Coefficient de sécurité</p> <p>Id = " 1.1 " Text = Pour une pente de 100% (45°), garantir un coefficient de sécurité de 3 sur la charge à déplacer, avec un coefficient de frottement câble/mors de 0,18.</p>	 <p>Coefficient de sécurité déterminé analytiquement 3</p>	<p>Étude statique Les ressorts choisis et la zone de contact, permettent de valider l'exigence sur le coefficient de sécurité</p>
<p>« Requirements » Serrage</p> <p>Id = " 1.2 " Text = Les serrages des 2 pinces doivent être coaxiaux. Le défaut de coaxialité maximal retenu est de 0,5 mm.</p>	<p>Pas de performance simulée/mesurée</p>	<p>Mise en œuvre de la démarche PPM dans le but de garantir la coaxialité des serrages.</p>
<p>« Requirements » Durée de vie</p> <p>Id = " 1.4 " Text = La durée de vie de la pince est celle de la télécabine.</p>	<p>Détermination analytique et numérique de la contrainte maximale</p> 	<p>Choix d'un matériau et d'un procédé en fonction des sollicitations permettent d'assurer la durée de vie du levier.</p>
<p>« Requirements » Oscillations de la cabine</p> <p>Id = " 1.3 " Text = Les oscillations de la cabine doivent être amorties lors des passages de pylône.</p>	<p>Pas de performance simulée/mesurée</p>	<p>Les oscillations sont amorties par l'interposition de rondelles ressorts.</p>



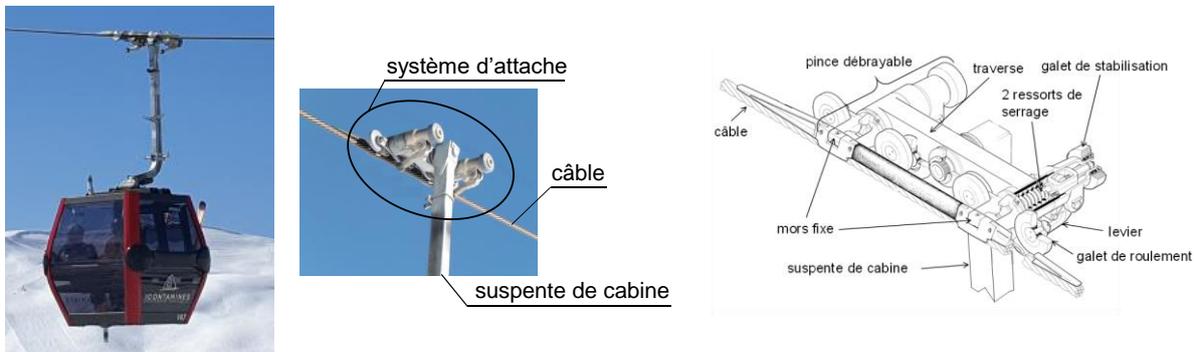
Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

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.

Les auteurs du sujet remercient la société Poma et plus particulièrement Monsieur Babaz pour les renseignements communiqués qui ont servi à élaborer ce sujet.

1. Présentation du sujet

Ce sujet permettait de justifier et de valider les différents choix technologiques réalisés par la société POMA sur le système d'attache en vue de garantir le confort et la sécurité des passagers, ainsi que la durée de vie de la pince.



Dans un premier temps, l'objectif était de vérifier que les pinces permettaient d'assurer un serrage satisfaisant sur le câble. Pour cela, il était nécessaire de déterminer le torseur des actions mécaniques des pinces sur le câble en tenant compte de la raideur des ressorts et de la géométrie des surfaces de contact, dans le but de déterminer la pression de contact dans la liaison. La connaissance de cette pression de contact permettait de vérifier la condition de non-glissement de la cabine sur le câble. Par ailleurs, pour garantir une bonne répartition de la pression de chacune des pinces sur le câble et éviter une déformation du câble, il était nécessaire de maîtriser les défauts géométriques de la traverse supportant les deux pinces.

L'objectif de la deuxième partie était de vérifier la tenue en fatigue du levier permettant le débrayage de la pince sur le câble. Pour cela, une étude géométrique et statique amenait les candidats à trouver les efforts auxquels le levier était soumis. Une seconde étude permettait de déterminer (par un modèle poutre et par un modèle éléments finis) les contraintes maximales. Enfin, en fonction des contraintes mécaniques et des contraintes d'utilisation il était demandé de justifier le choix du matériau et du procédé.

Pour finir, l'objectif de la troisième partie était de concevoir une liaison pivot entre la traverse et la suspente. La difficulté était ici de proposer une solution permettant d'amortir les oscillations de la cabine.

2. Analyse globale des résultats

L'objectif de la première section de la première partie (Q1.1 à Q1.10) était de vérifier le coefficient de sécurité du système de serrage. En effet, pour une pente de 100 % et un facteur de frottement donné, il fallait vérifier si le serrage était maintenu lorsque la cabine transportait 3 fois la charge maximale. On évaluait ici les compétences des candidats à proposer des modèles d'actions mécaniques et à proposer des méthodes de résolution permettant de les déterminer. Cette première partie a été abordée par la totalité des candidats.

L'objectif de la seconde section de la première partie (Q1.11 à Q1.18) était de valider le choix de matériau de la traverse ainsi que le processus de réalisation et de contrôle. On évaluait ici les compétences des candidats à analyser et justifier les procédés et une gamme de fabrication. Cette partie a été abordée par 95% des candidats.

L'objectif de la deuxième partie (Q2.1 à Q2.14) était de vérifier la résistance à la fatigue du levier de débrayage. On évaluait ici les compétences des candidats à déterminer des contraintes mécaniques en utilisant un modèle poutre et en analysant un calcul éléments finis. Les candidats devaient alors être capables de justifier le choix d'un matériau et d'un procédé. Cette partie a été abordée par 90 % des candidats.

L'objectif de la troisième partie (Q3.1 à Q3.2) était de concevoir la liaison pivot entre la traverse et la suspente. On évaluait ici les compétences des candidats à proposer une démarche de dimensionnement d'un palier puis à concevoir une liaison mécanique. 39 % des candidats ont abordé cette partie.

Enfin, la dernière partie évaluait la capacité des candidats à synthétiser le travail effectué. Cette partie a été abordée par 31% des candidats.

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 : Maintenir l'adhérence entre le système d'attache de la télécabine et le câble avec un coefficient de sécurité élevé

Étude des efforts des mors sur le câble (Q1.1 à 1.10)

Dans cette série de questions on demandait d'établir le torseur des actions mécaniques des deux pinces sur le câble. Beaucoup de candidats ont eu des difficultés à exprimer les actions élémentaires dans la base adéquate et à justifier le passage du modèle local au modèle global. Ces questions ont aussi mis en évidence beaucoup d'erreurs de signes et d'erreurs de calcul. La question 1.6 a été assez bien traitée, même si on note beaucoup de résultats sans unité ou avec des unités erronées.

Les questions 1.7 et 1.8 demandaient de proposer et d'appliquer une démarche de résolution. Beaucoup de candidats peinent à proposer une démarche rigoureuse qu'elle soit graphique ou analytique.

Le jury conseille aux futurs candidats de s'entraîner à la réalisation de calculs nécessaires à notre discipline (déplacement de torseurs et calcul vectoriel, calcul intégral permettant de passer d'un modèle local à un modèle global). De plus, avoir un avis critique sur l'ordre de grandeur et le signe des applications numérique est au cœur du métier d'enseignant de sciences industrielles de l'ingénieur. Le jury conseille aussi aux futurs candidats de maîtriser la résolution des problèmes de statique et de dynamique : définition de l'ensemble isolé, bilan des actions mécaniques extérieures et choix de l'équation la plus pertinente à utiliser. En effet, même si les applications numériques sont erronées, la proposition de méthodes rigoureuse est fortement valorisée lors de l'évaluation.

Réalisation de la traverse (Q1.11 à Q1.18)

La nécessité d'un serrage « coaxial » des deux pinces a été bien traitée par les candidats. Concernant la question 1.12, le jury note une grande confusion dans le vocabulaire utilisé. Le jury attend la maîtrise du vocabulaire associé au décodage des spécifications.

Les questions 1.13 à 1.15 ont été bien traitées. Le jury constate que la notion de zone affectée thermiquement lors du soudage est connue des candidats. Les réponses à la question 1.16 manquent globalement de précision. La machine utilisée (et son nombre d'axes) n'est généralement pas précisée. La plupart des mises en position proposées ne sont pas isostatiques et les opérations d'usinage de base (et les outils associés) ne semblent pas connues pour une majorité de candidats.

Le jury attend que les candidats sachent choisir une cinématique de machine adaptée à l'obtention des surfaces fonctionnelles et sache citer les opérations d'usinage de base.

Lorsque la question 1.17 est traitée, les réponses données par les candidats sont globalement satisfaisantes. La question 1.18 a été bien abordée.

Le jury a constaté que les candidats possédaient de bonnes capacités dans l'analyse du triptyque produit-proposé matériau et les encourage à continuer dans ce sens.

Partie 2 : Vérification de la résistance à la fatigue du levier de débrayage

L'objectif des questions 2.1 à 2.4 était de déterminer les actions mécaniques du galet sur le levier en fonction de la position de pince (ouverte ou fermée). Ces questions ont fait l'objet de beaucoup d'erreurs de signe tant dans les expressions géométriques que dans les actions mécaniques déterminées.

Les questions 2.5 à 2.8 avaient pour but de déterminer la contrainte maximale dans le levier en utilisant un modèle poutre. On dénote ici de nombreuses erreurs de signes dans l'expression du torseur de cohésion. L'expression de la contrainte normale en flexion est source de nombreuses erreurs. La contribution de la contrainte de traction/compression est très souvent omise dans la question 2.8.

Dans les questions 2.9 et 2.10 il était demandé de justifier les conditions aux limites dans le cadre d'une modélisation par éléments finis ainsi que d'analyser les résultats. Le jury déplore un manque de précision dans les réponses à la question 2.9. Dans la question 2.10 la grande majorité des candidats n'évoquent pas le fait que l'on compare une contrainte de Von Mises à une contrainte normale et ne remettent jamais en cause le modèle.

Le jury souhaite que les candidats soient capables de déterminer le torseur de cohésion dans une poutre droite et soit capable de déterminer les contraintes associées. Il attend aussi des candidats qu'ils soient plus critiques sur les hypothèses et les résultats de simulations par éléments finis.

Les réponses aux questions 2.11 à 2.13 sont globalement satisfaisantes.

Partie 3 : Réalisation de la liaison pivot amortie entre la cabine et le système d'attache

Peu de candidats proposent des critères permettant de dimensionner un palier. Moins de 20 candidats proposent une solution permettant d'amortir les oscillations dans la liaison. Quelques solutions envisagées par les candidats proposaient d'utiliser des ressorts, ce qui ne permet pas d'amortir de manière efficace les oscillations.

Le jury souhaite que les candidats soient capables de proposer des solutions techniques classiques pour la conception des liaisons élémentaires : pivot, encastrement, glissière.

Synthèse

Cette partie invitait les candidats à faire une synthèse des différentes études menées tout au long du sujet et des moyens mis en œuvre pour valider le cahier des charges. Il était attendu une analyse du travail effectué dans les parties précédentes et pas seulement une liste exhaustive des activités menées dans ce sujet. Les candidats ayant abordé ces questions ont généralement bien réussi à démontrer leur capacité de synthèse.

4. Conclusion

Ce sujet de conception avait pour objectif de permettre aux candidats d'exprimer au mieux leur potentiel et de montrer leur expertise dans l'analyse et la proposition de solutions. Le spectre des compétences à mobiliser était assez large mais les études proposées étaient classiques pour une épreuve d'ingénierie mécanique.

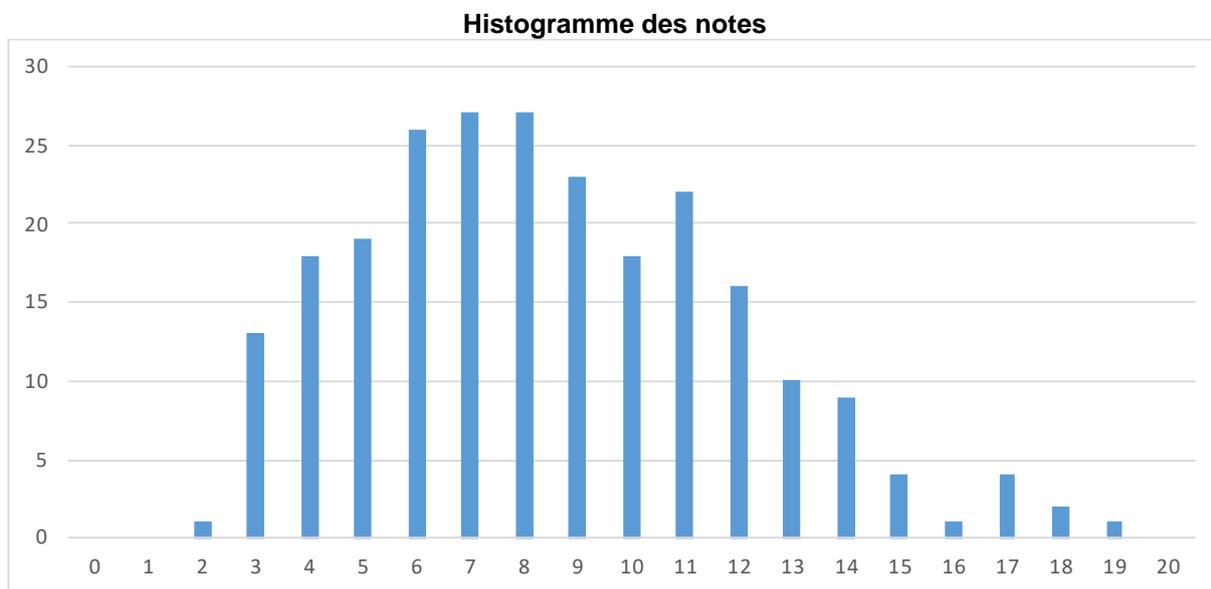
Au vu des études proposées, il est surprenant que les résultats ne soient pas meilleurs. Trop peu de candidats ont réussi à traiter correctement l'ensemble des questions.

Le jury invite vivement les candidats à se préparer avec rigueur, à s'inscrire dans les dispositifs de formation ou de préparation qui sont mis à leur disposition et à bien maîtriser les méthodes de base. En effet, la notation a privilégié les méthodes proposées par les candidats plutôt que les résultats non justifiés.

5. Résultats

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

- 18,6/20 comme meilleure note ;
- 1,9/20 comme note la plus basse.



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

1. Présentation de l'épreuve

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

« 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.

Pour cette session 2020, les candidats ont réalisé cette épreuve dans les mêmes conditions que ceux des sessions précédentes à l'exception des candidats ultramarins. Pour ceux-là, l'épreuve a été réalisée via des moyens de visio-conférence dans des conditions matérielles qui ont parfaitement permis aux candidats de présenter leur dossier ainsi que d'échanger avec le jury selon des modalités très similaires de celles proposées aux candidats présents sur site.

2. Analyse globale des résultats

De très bons résultats, avec parfois la note maximale, 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 aux candidats de faire preuve de leurs compétences et ont été sanctionnés par des notes très faibles sur l'ensemble des champs de compétences testés sur cette épreuve.

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

Le dossier industriel

Le choix du support, produit ou système technique représentatif des technologies actuelles, 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 et totalement connecté avec la nature du support et la problématique traitée.

Les développements scientifiques et technologiques, du niveau de l'agrégation, doivent être absolument justifiés au regard de la problématique et non pas réalisés dans le simple but d'étoffer le dossier.

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, ce qui permettra, en situation réelle, d'éveiller l'intérêt des élèves ;
- scientifique pour appliquer des démarches, pour conduire et analyser des expérimentations, des modélisations, des simulations ;
- ingénierie pour analyser les résultats des développements scientifiques, illustrer une réelle démarche d'ingénierie et apporter des réponses technologiques concrètes et adaptées aux problématiques.

Ce dossier doit comporter au moins une exploitation pédagogique qui s'appuie sur le support et les problématiques retenus et sur 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, ... ou l'enseignement supérieur : STS, CPGE...

Le dossier présenté doit absolument 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 pour attester du caractère personnel du travail réalisé.

Un certain niveau de confidentialité est possible mais il ne doit pas nuire à la constitution du dossier et au dialogue avec le jury.

Les fichiers numériques joints (déposés en 2020 sur une plateforme sécurisée) ne doivent pas se limiter au dossier au format pdf. L'ensemble des fichiers pertinents issus des « outils numériques métiers » sont joints et clairement inventoriés.

Le jury apprécie particulièrement :

- les dossiers élaborés autour d'une véritable problématique, clairement définie, résultant d'une relation authentique avec l'entreprise ;
- les choix de dossiers montrant une réelle volonté de susciter l'intérêt des élèves par la problématique choisie et par la nature des démarches mises en place ;
- 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 éventuelles 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 écarts identifiés ;

- 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...) ;
- 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, le candidat met en valeur ses qualités de didacticien et de pédagogue pour expliquer ses choix, ses démarches et ses analyses.

Ensuite, 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 le candidat a 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 et responsabilités 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.

Afin d'assurer une équité entre tous, en particulier lorsque certains candidats sont évalués à distance et 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 numériques présentés.

Cette année encore et malgré les conditions parfois difficiles de préparation de cette épreuve exigeante, les présentations orales ont été, pour une grande majorité de candidats, préparées soigneusement avec un temps d'exposé maîtrisé.

4. Conclusion

Les candidates et les candidats qui se sont distingués montrent en même temps une solide expertise scientifique et technique, 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

71 candidats ont été évalués. La moyenne des notes obtenues est de 10/20 et l'écart-type 5,3 avec :

- 20 comme meilleure note ;
- 1 comme note la plus basse.

