



## **Concours de recrutement du second degré**

### **Rapport de jury**

---

**Concours : Agrégation externe**

**Section : Sciences industrielles de l'ingénieur**

**Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et  
Ingénierie mécanique**

**Session 2016**

Rapport de jury présenté par :  
Monsieur Norbert PERROT , Inspecteur général  
Président du jury

## Sommaire

Résultats statistiques	3
Avant-propos	4
Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur	6
Rapport du jury de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur	21
Éléments de correction de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	25
Rapport du jury de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	34
Éléments de correction de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	37
Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	61
Exemple de sujet pour l'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique	67
Rapport du jury de l'épreuve d'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique	74
Exemple de sujet pour l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique	81
Rapport du jury de l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique	92
Rapport du jury de l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel	99
Rapport sur la transmission des valeurs et principes de la République	102

Le rapport de jury est rédigé sous la responsabilité du président de jury

## Résultats statistiques de la session 2016

Inscrits	Nombre de postes	Présents aux trois épreuves d'admissibilité	Admissibles	Admis
510*	38	230**	87	38

\*dont 73 candidats à l'agrégation marocaine

\*\* dont 44 candidats à l'agrégation marocaine

Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le premier candidat admissible	17,71
Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le dernier candidat admissible	7,47
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le premier candidat admis	16,06
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le dernier candidat admis	9,90

## Avant-propos

Cette session est dans la continuité des précédentes, trente-huit candidats ont été déclarés admis alors que 186 ont participé aux trois épreuves d'admissibilité.

Le niveau de cette option de l'agrégation reste élevé puisque cinquante-sept candidats ont obtenu une moyenne supérieure à 08/20. Malheureusement, le nombre de femmes est toujours aussi faible. Quatre ont été déclarées admissibles et deux ont été admises.

Dans cet avant-propos, je souhaite surtout insister sur les éléments que j'ai déjà énoncés dans les rapports des trois sessions précédentes. Le paragraphe suivant, issu du rapport 2014, est encore et toujours d'actualité : *« L'État recrute des agrégés pour leurs hautes compétences scientifiques et technologiques, mais aussi pour leurs compétences pédagogiques. Celles-ci sont évaluées dans les trois épreuves d'admission. Il importe donc de les préparer dès l'inscription au concours. Proposer une séquence pédagogique ne s'improvise pas, cela nécessite entraînement et réflexion. Si le jury apprécie que le candidat positionne sa séquence dans la progression pédagogique annuelle et précise les objectifs et les prérequis, il attend que le candidat décrive et justifie les activités et les démarches qui permettent d'atteindre les objectifs. Ensuite, le candidat doit proposer une évaluation et éventuellement une remédiation ».*

D'ailleurs la direction générale des ressources humaines a adressé le rappel suivant aux présidents de concours de recrutement de professeurs : *« Comme vous le savez, les nouvelles épreuves des CAPES, CAPET, CAPLP et CAPEPS 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 des épreuves d'admission et leur définition mettent clairement en évidence la nécessité d'axer la préparation sur l'élaboration de séquences pédagogiques.

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 pluritechnologique.**

Il est conseillé aux futurs candidats et à leurs formateurs de lire attentivement la définition des épreuves, décrite dans l'arrêté du 25 novembre 2011 publié au JORF du 10 janvier 2012 et l'arrêté du 25 juillet 2014 publié au JORF du 12 août 2014, et les commentaires du jury qui figurent dans le présent rapport.

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 ».* Madame la ministre de l'Éducation

nationale a 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* ».

Cette demande a été prise en compte pour les trois épreuves d'admission. Globalement, les candidats ont réagi correctement aux questions posées.

Les modalités de ces épreuves d'admission, leurs objectifs et les attendus du jury sont rappelés aux candidats lorsqu'ils sont accueillis, avant leur première épreuve, par le directoire du jury ; ils ne peuvent donc pas les ignorer.

Les candidats ont à leur disposition des ordinateurs reliés à l'Internet. Les sites consultés par les candidats sont surveillés. L'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, et accessibles par tous, sont autorisés.**

Cette session 2016 s'est révélée être d'un excellent niveau. Le jury félicite les candidats et leurs formateurs. Le classement à l'issue des épreuves d'admissibilité a été complètement 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 irréprochable. 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.

Cinq candidats, dont deux candidats admis à l'agrégation interne 2016, n'ont pas souhaité se présenter à l'oral, et sept autres n'ont même pas daigné prévenir. Au moment où les valeurs de la République sont mises en avant jusque dans les questions posées aux candidats lors des épreuves d'admission, cette attitude surprend d'autant plus que ces candidats enseignent déjà.

Pour la session prochaine, une quatrième option va être créée : ingénierie informatique (voir JORF du 1<sup>er</sup> juin 2016). La structure du concours ne sera pas modifiée.

Pour conclure cet avant-propos, j'espère sincèrement que ce rapport sera très utile aux futurs candidats de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur et à leurs formateurs.

Norbert PERROT  
Président du jury

Le lycée La Martinière Monplaisir à Lyon a accueilli les réunions préparatoires à cette session 2016 de l'agrégation externe section sciences industrielles de l'ingénieur, option sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique, ainsi que les épreuves d'admission qui se sont déroulées dans de très bonnes conditions du 23 mai inclus au 3 juin 2016 inclus. Les membres du jury adressent de vifs remerciements à monsieur le Proviseur de cet établissement ainsi qu'à l'ensemble de ses collaborateurs pour l'accueil chaleureux qui leur a été réservé.

Ces remerciements s'adressent aussi à la direction de l'ENSAM de Paris qui a accueilli les membres du jury pour la réunion d'admissibilité qui s'est déroulée le 26 avril 2016.

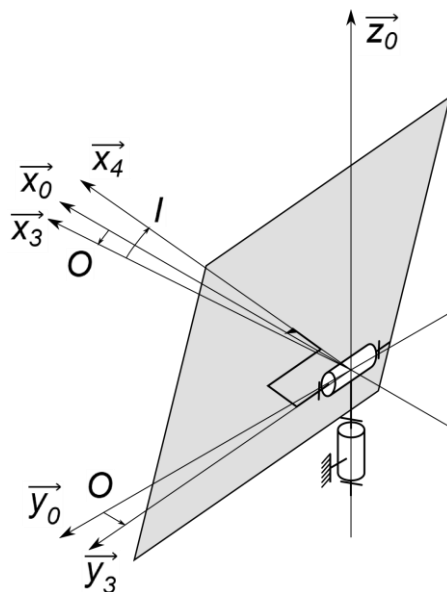
# Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

## Question 1

Un héliostat est positionné par deux motoréducteurs d'orientation et d'inclinaison.

La GTC transmet à l'héliostat les coordonnées de pointage A et H. L'héliostat acquitte la demande, calcule les angles de position O et I à atteindre, détermine le sens de rotation des motoréducteurs et les alimente. Lorsque la position demandée est atteinte, l'héliostat arrête les motoréducteurs et il envoie la confirmation de positionnement à la GTC.

## Question 2



## Question 3

Le vecteur  $\vec{x}_4$  est bissecteur de  $(\vec{u}, \vec{x}_2)$ , c'est-à-dire colinéaire à la somme de ces deux vecteurs unitaires. Les angles O et I respectent donc l'équation :

$$\vec{x}_4 \wedge (\vec{u} + \vec{x}_2) = \vec{0}$$

$$\begin{vmatrix} \cos I \cdot \cos O & u_x + \cos H \cdot \cos A \\ \cos I \cdot \sin O & u_y + \cos H \cdot \sin A \\ -\sin I & u_z - \sin H \end{vmatrix} = \vec{0}$$

$$\begin{cases} \cos I \cdot \sin O \cdot (u_z - \sin H) + \sin I \cdot (u_y + \cos H \cdot \sin A) = 0 \\ -\sin I \cdot (u_x + \cos H \cdot \cos A) - \cos I \cdot \cos O \cdot (u_z - \sin H) = 0 \\ \cos I \cos O \cdot (u_y + \cos H \cdot \sin A) - \cos I \sin O (u_x + \cos H \cdot \cos A) = 0 \end{cases}$$

Les inconnues sont O et I. La troisième équation permet d'obtenir O en fonction des données :

$$\tan O = \frac{u_y + \cos H \cdot \sin A}{u_x + \cos H \cdot \cos A}$$

La première équation permet d'obtenir I en fonction de O et des données :

$$\tan I = -\sin O \cdot \frac{u_z - \sin H}{u_y + \cos H \sin A}$$

Le facteur d'inclinaison s'écrit comme le cosinus de l'angle entre la normale au panneau et la direction du soleil, soit :

$$fi = \frac{Sa}{Sh} = \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_2 = \bar{x}_4 \cdot \bar{u} = u_x \cdot \cos I \cdot \cos O + u_y \cdot \cos I \cdot \sin O - u_z \cdot \sin I$$

#### Question 4

Le programme permettant de calculer le facteur d'inclinaison moyen annuel sur un héliostat s'écrit en langage Scilab par exemple :

```

function fi=fi(xp,yp)
    Hr=93
    L=sqrt( xp^2+yp^2+Hr^2 )
    Ux=-xp/L
    Uy=-yp/L
    Uz=Hr/L
    fi=0 // initialisation de fi
    for j =1:365 // boucle sur tous les jours de l'année
        for m=1:24*60 // boucle sur les minutes d'une journée
            A=Azimut(j,m)
            H=Hauteur(j,m)
            O=Orientation(A,H)
            I=Inclinaison(A,H)
            If (H>0) then // test si le soleil est au-dessus de l'horizon
                fi=fi+Ux*cos(I)*cos(O)+Uy*cos(I)*sin(O)-Uz*sin(I)
            end
        end
    end
end
fi=fi/(365*24*60)
endfunction

```

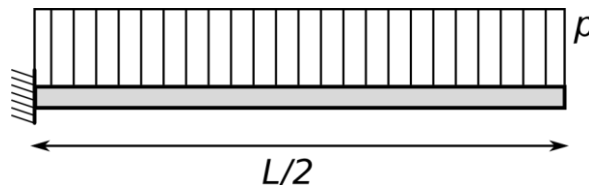
#### Question 5

$$\eta_{capt} = \eta_{incl} \cdot \eta_{refl} \cdot \eta_{trans} \cdot \eta_{omb} \cdot \eta_{mas} = 0,86 \times 0,88 \times 0,95 \times 0,96 \times 0,97 = 0,67$$

$$E = \eta_{capt} \cdot I_{SG} \cdot S_{rt} = 50,5 \text{ MW}$$

#### Question 6

Par symétrie, le problème se ramène à une poutre simplement encastree soumise à une charge répartie uniforme.



L'angle à l'extrémité de la poutre est approché par la dérivée de la flèche :  $\varepsilon \cong \left| y' \left( \frac{L}{2} \right) \right|$

L'effort tranchant vaut :  $T(x) = -p \cdot \left( \frac{L}{2} - x \right)$  (axe des ordonnées ascendant)

Le moment fléchissant se déduit par la relation :  $\frac{dM_f}{dx}(x) = -T(x) = p \cdot \left( \frac{L}{2} - x \right)$

En intégrant :  $M_f(x) = -\frac{p}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + cste$

Les conditions limites (moment fléchissant nul à l'extrémité droite) permettent de calculer la constante ( $cste = 0$ ).

Sous l'hypothèse de Bernoulli, la flèche s'exprime en fonction du moment fléchissant :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_f}{EI_z} \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{p}{6EI_z} \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right)^3 + cste$$

Les conditions limites (pente nulle à l'encastrement) permettent de calculer :  $cste = -\frac{pL^3}{48EI_z}$

$$\text{d'où : } \frac{dy}{dx} = \frac{p}{6EI_z} \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right)^3 - \frac{pL^3}{48EI_z}$$

$$\text{L'angle à l'extrémité de la poutre vaut alors : } \varepsilon \cong \left| y' \left( \frac{L}{2} \right) \right| = \frac{pL^3}{48EI_z}$$

### Question 7

L'application numérique pour la poutre IPN80 :  $\varepsilon = 7,5 \times 10^{-3} \text{ rad} > 10^{-3} \text{ rad}$ .

La poutre IPN80 ne convient donc pas.

### Question 8

Soit  $\alpha$  le coefficient d'homothétie (coefficient de longueur). Les valeurs du problème deviennent :

$$\begin{cases} p' = 5,9 \times \alpha^2 \times 10 \text{ (N}\cdot\text{m}^{-1}) \\ L = 10 \text{ m} \\ E = 210 \text{ GPa} \\ I'_z = \alpha^4 \times 78 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \\ \varepsilon' = 10^{-3} \text{ rad} \end{cases}$$

$$\text{L'expression de l'angle conduit alors à } \frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z} \cdot \frac{48 \cdot E \cdot I'_z}{p' \cdot L^3} = \alpha^2 = 7,5$$

La hauteur de la nouvelle poutre vaut alors  $h' = \sqrt{7,5} \cdot h = 219 \text{ mm}$  et la masse de la poutre vaut  $m' = 5,9 \cdot \alpha^2 \cdot L = 442 \text{ Kg}$ .

Ces valeurs sont évidemment inacceptables donc la solution d'une poutre IPN n'est pas adaptée.

### Question 9

La charge répartie est due au poids propre de la poutre et au poids des miroirs, soit :

$$p'' = 2 \cdot a^2 \cdot \rho_a \cdot g + p_m$$

L'angle en bout de poutre est toujours égal à  $\varepsilon'' = 10^{-3} \text{ rad}$ , ce qui permet d'écrire la relation :

$$\varepsilon'' = \frac{p'' L^3}{48 E I_z''} = \frac{(2 \cdot a^2 \cdot \rho_a \cdot g + p_m) \cdot L^3}{48 E \left( \frac{a^2 h^2}{2} \right)}$$

$$\text{Cette expression permet de déduire la valeur de } a = \sqrt{\frac{p_m \cdot L^3}{24 \cdot E \cdot h^2 \cdot \varepsilon'' - 2 \cdot L^3 \cdot \rho_a \cdot g}} = 2,8 \text{ cm}$$

La masse de la poutre treillis vaut alors 110 kg, ce qui s'avère adapté.

### Question 10

Si le cumul d'erreur vaut  $\pm 2,5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ , alors le secteur angulaire qui élargit la tache vaut  $5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ . À 600 m, la tâche s'élargit de 3 m. L'image du soleil étant déjà large de 5,6 m, la tache



finale sera large de 8,6 m, ce qui est bien inférieur aux dimensions du récepteur (12 m x 14 m). La tâche est donc totalement incluse dans le récepteur.

Le facteur de concentration du champ de captation s'exprime donc comme un rapport de surfaces. C'est en effet le rapport de la surface utile du champ héliostatique (75 000 m<sup>2</sup>) et de la surface de la tâche perçue par le récepteur. Soit :

$$F_C = \frac{75\,500}{\pi \cdot 8,6^2} = 1\,299,8$$

On en déduit la valeur de la puissance surfacique incidente sur le récepteur dans des conditions nominales de fonctionnement telles que  $I_{SG} = 1\,000\text{ W/m}^2$ .

$$\phi = \eta_{capt} \cdot I_{SG} \cdot F_C = 870\text{ kW/m}^2$$

### Question 11

Une lecture du tableau N°1, nous permet d'observer que le coefficient correspondant aux pertes thermiques du bouilleur en face arrière est numériquement 22 à 67 fois plus faible que les coefficients d'échanges thermiques de la face avant.

Le fait de négliger ces pertes est alors tout à fait justifié.

### Question 12

Si l'on pose un bilan énergétique sur le bouilleur en se basant sur la figure N°13, on peut écrire en régime permanent établi (régime statique) :

$$E = \phi_{utile} + r \cdot E + K_{conv-av} \cdot (T_s - T_a) + K_{ray-av} \cdot (T_s - T_c)$$

Avec  $\phi_{utile} = K_{tube-av} \cdot (T_s - T_f)$

On en déduit :  $E = \phi_{utile} \cdot \left(1 + \frac{K_{conv-av}}{K_{tube-av}} + \frac{K_{ray-av}}{K_{tube-av}}\right) + r \cdot E + K_{conv-av} \cdot (T_f - T_a) + K_{ray-av} \cdot (T_f - T_c)$

Ou encore :  $\phi_{utile} = \frac{E - r \cdot E - K_{conv-av} \cdot (T_f - T_a) - K_{ray-av} \cdot (T_f - T_c)}{\left(1 + \frac{K_{conv-av}}{K_{tube-av}} + \frac{K_{ray-av}}{K_{tube-av}}\right)}$

Le rendement du récepteur s'exprime comme le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée,

soit :  $\eta_{rec} = \frac{\phi_{utile}}{E} = \frac{1 - r - \frac{K_{conv-av}}{E} \cdot (T_f - T_a) - \frac{K_{ray-av}}{E} \cdot (T_f - T_c)}{\left(1 + \frac{K_{conv-av}}{K_{tube-av}} + \frac{K_{ray-av}}{K_{tube-av}}\right)}$

$$\eta_{rec} = \frac{1 - 0,02 - \frac{2,54 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^6} \cdot (250 - 10) - \frac{6,65 \cdot 10^3}{50 \cdot 10^6} \cdot (250 - 0)}{\left(1 + \frac{2,54}{5000} + \frac{6,65}{5000}\right)}$$

$$\eta_{rec} = 0,933$$

### Question 13

Il s'agit ici de déterminer à partir de quelle valeur de l'éclairement E, le récepteur peut commencer à débiter un flux utile dans le réseau vapeur. À la limite, il faut trouver la valeur de E telle que le rendement soit nul, cette valeur de E vérifiant :

$$0 = E - r \cdot E - K_{conv-av} \cdot (T_f - T_a) - K_{ray-av} \cdot (T_f - T_c)$$

$$0 = E \cdot (1 - r) - (K_{\text{conv-av}} + K_{\text{ray-av}}) \cdot (T_f - T_a) - K_{\text{ray-av}} \cdot (T_a - T_c)$$

L'expression de l'éclairement E permettant de débiter la production de vapeur se déduit alors :

$$E = \frac{(K_{\text{conv-av}} + K_{\text{ray-av}}) \cdot (T_f - T_a) + K_{\text{ray-av}} \cdot (T_a - T_c)}{1 - r}$$

$$E = \frac{(6,65 + 2,54) \cdot (250 - 10) + 2,54 \cdot (10)}{0,98} \cdot 10^3$$

$$E = 2,28 \text{ MW}$$

En utilisant la relation de la question 5, on en déduit l'irradiance minimale :

$$I_{\text{SG}} = 45,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

#### Question 14

Le cycle de Carnot est une modélisation externe du cycle thermodynamique, dont le rendement est le rapport entre le travail mécanique  $-W$  délivré par la machine thermodynamique, et la quantité de chaleur  $Q_c$  apportée à la machine sur la source chaude.

$$\eta_{\text{carnot}} = \frac{-W}{Q_c}$$

Le premier principe de la thermodynamique donne :  $Q_c = -W - Q_f$

On en déduit :  $\eta_{\text{carnot}} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$

Le second principe appliqué au cycle dans le cas d'un cycle idéal réversible nous permet d'écrire que :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0$$

Soit :

$$\eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$\eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{273,15 + 50}{273,15 + 250} = 0,38$$

#### Question 15

Les valeurs des températures et des pressions sont :

$$T_c = 273 + 250 = 523 \text{ K} ;$$

$$T_f = 273 + 50 = 323 \text{ K} ;$$

$$P_c = 39,78 \text{ bar (pression absolue)} ;$$

$$P_f = 0,12 \text{ bar (pression absolue)}.$$

Le tracé de l'allure du cycle thermodynamique est donné sur le document réponse N°1.

Le rendement thermodynamique est le rapport entre la puissance libérée à la turbine et la puissance absorbée par l'évaporateur. On a :

$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{q_{\text{mvsat}} \cdot (H_{\text{et}} - H_{\text{st}})}{q_{\text{mvsat}} \cdot (H_{\text{et}} - H_{\text{spomp}})} \approx \frac{q_{\text{mvsat}} \cdot (H_{\text{et}} - H_{\text{st}})}{q_{\text{mvsat}} \cdot (H_{\text{et}} - H_{\text{scond}})}$$

En effet, on peut évaluer la variation d'enthalpie massique apportée par le pompage :

$$H_{spomp} - H_{scond} = \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{(39,78 - 0,12) \cdot 10^5}{988} = 4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

On en déduit que cette variation d'enthalpie est négligeable et que l'on peut numériquement confondre  $H_{spomp}$  et  $H_{scond}$ .

Il reste donc à déterminer les valeurs des enthalpies.

Grâce au tableau (DT N°1), on peut lire :

$$H_{et} = 2,8 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$S_{et} = S_{sis} = 6069 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Sur le diagramme de Mollier ( $H,S$ ), on observe, que dans l'espace liquide vapeur (sous la « cloche » ou courbe de saturation), l'enthalpie et l'entropie massique sont liées par une relation de proportionnalité pour des changements d'état isobares. On a donc :  $\Delta H = \Delta S \cdot T$ , avec  $T$  la température absolue de changement d'état.

Il est donc possible connaissant  $S_{et}$  de déterminer  $H_{sis}$ , puis d'en déduire  $H_{st}$ .

En effet, en sortie de la turbine, la température du mélange diphasique est de 50 °C, soit 323 K. On peut sur cette isotherme et isobare écrire :

$$(H_{sis} - H_{vsat(50^\circ\text{C})}) = (S_{sis} - S_{vsat(50^\circ\text{C})}) \cdot \frac{(H_{lsat(50^\circ\text{C})} - H_{vsat(50^\circ\text{C})})}{(S_{lsat(50^\circ\text{C})} - S_{vsat(50^\circ\text{C})})}$$

Soit :

$$H_{sis} = 209,3 + (6,07 - 0,71) \cdot \frac{(2592 - 209,3)}{(8,07 - 0,71)}$$

$$H_{sis} = 1944 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

On détermine alors  $H_{st}$  :

$$H_{st} = H_{et} - (H_{et} - H_{sis}) \cdot \eta_{is}$$

$$H_{st} = 2801 - (2801 - 1944) \cdot 0,90$$

$$H_{st} = 2023 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

On en déduit donc le rendement thermodynamique du cycle :

$$\eta_{cycle} = \frac{(H_{et} - H_{st})}{(H_{et} - H_{scond})}$$

$$\eta_{cycle} = \frac{(2801 - 2023)}{(2801 - 209,3)}$$

$$\eta_{cycle} = 0,3$$

### Question 16

Le cycle de Carnot est une modélisation thermique externe de la machine qui part de l'hypothèse que toutes les transformations thermodynamiques subies par le fluide sont réversibles et idéales.

Le cycle de Rankine est une modélisation interne, qui tient compte des caractéristiques thermodynamiques du fluide utilisé. Dans le cadre de la modélisation faite ici, nous avons pris en compte les transformations irréversibles et imparfaites de la détente dans la turbine ; il est donc normal que ce rendement soit plus faible que le rendement de Carnot.

### Question 17

Conditions qui permettent de réduire l'étude à une seule phase :

- l'alternateur doit être de construction symétrique (condition de découplage des phases) ;
- l'alimentation électrique doit être sinusoïdale et équilibrée (condition de découplage des phases) ;
- l'alternateur doit être de type à pôles lisses à l'exclusion des pôles saillants (limite de validité) ;
- l'état magnétique de la machine ne doit pas être saturé (limite de validité) ;
- l'alternateur doit fonctionner en régime permanent à l'exclusion des régimes transitoires (limite de validité).

### Question 18

Voir le corrigé sur le document réponse N°2

### Question 19

De la puissance apparente nominale  $S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = 3 \cdot V_n \cdot I_n$ , on déduit :

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{12 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \times 6,6 \cdot 10^3} = 1050 \text{ A}$$

Au point nominal, le facteur de puissance est tel que :

$$F_{pn} = \cos(\varphi_n) = \frac{P_n}{S_n} = \frac{11}{12} = 0,917 \quad \varphi_n \approx 23,55^\circ$$

Sachant que les phases de l'induit sont couplées en étoile et connaissant la résistance mesurée entre deux bornes de l'induit, on déduit :

$$R_i = \frac{R_c}{2} = \frac{64 \cdot 10^{-3}}{2} = 32 \text{ m}\Omega$$

### Question 20

Par application du théorème de Pythagore, l'annulation de la tension d'induit  $\underline{V}$  conduit à la relation suivante sur les normes des vecteurs (voir le diagramme de Fresnel sur le document réponse N°2)

$$E_{rcc} = I_{rcc} \cdot \sqrt{R_i^2 + (L\omega)^2}$$

Connaissant l'intensité du courant d'excitation, on déduit la force électromotrice en court-circuit de la caractéristique interne présentée sur le document réponse N°3 :

$$E_{rcc} = \frac{44}{40} \cdot \frac{4 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 2,54 \text{ kV}$$

On en déduit la réactance synchrone :

$$X = \sqrt{\left(\frac{E_{rcc}}{I_{cc}}\right)^2 - R_i^2} = \sqrt{2,54^2 - 32^2 \cdot 10^{-6}} \approx 2,54 \Omega$$

Pour les applications numériques, à défaut d'avoir su identifier la réactance synchrone, on pourra utiliser la valeur approximative suivante :  $X = 2,6 \Omega$ . Dans les corrections qui suivent, les valeurs numériques obtenues via cette approximation seront présentées entre accolades  $\{\cdot\}$  à côté des valeurs exactes.

### Question 21

$$\underline{E_m} = \underline{V}_n + j \cdot X \cdot \underline{I}_n$$

En réutilisant le calcul du courant nominal et celui du facteur de puissance des questions précédentes :

$$E_m = \sqrt{(V_n + X \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n)^2 + (X \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n)^2}$$

$$E_m = \sqrt{\left(\frac{6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} + 2,54 \times 1050 \times 0,3997\right)^2 + (2,54 \times 1050 \times 0,9182)^2} = 5,457 \text{ kV} \{5,505 \text{ kV}\}$$

Sinon, en utilisant les puissances nominales indiquées dans l'énoncé :

$$E_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(1 + X \cdot \frac{Q_n}{U_n^2}\right)^2 + \left(X \cdot \frac{P_n}{U_n^2}\right)^2}$$

$$E_m = \frac{6,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(1 + 2,54 \times \frac{4,8}{6,6^2}\right)^2 + \left(2,54 \times \frac{11}{6,6^2}\right)^2} = 5,455 \text{ kV} \{5,505 \text{ kV}\}$$

$$\text{Angle interne : } \theta = \arcsin\left(\frac{X \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{E_m}\right) = \arcsin\left(\frac{X \cdot P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot E_m}\right) \approx 26^\circ 40' \{27^\circ 02'\}$$

En reportant  $E_m$  sur la caractéristique interne, on obtient en abscisse :  $I_{fn} = 243 \text{ A} \{255 \text{ A}\}$

Pertes électriques de l'inducteur :

$$P_{jf} = U_f \cdot I_{fn} = 420 \times 243 = 102,1 \text{ kW} \{107,1 \text{ kW}\}$$

### Question 22

Les phénomènes, aux origines des pertes ferromagnétiques, sont le phénomène d'hystérésis associé à l'alternance de la polarisation magnétique et la circulation de courants induits dans la masse des tôles (courants de Foucault).

Le silicium permet d'augmenter la résistivité de l'alliage et donc de réduire l'intensité des courants de Foucault. Il contribue à limiter les pertes ferromagnétiques.

### Question 23

Par la loi de conservation du flux, en supposant que la longueur de l'induit  $L_r$  est la même du côté de l'inducteur :

$$B_a \cdot d_a \cdot L_r = B_e \cdot \left(d_a + 2 \cdot \frac{b}{2}\right) \cdot L_r = 2 \cdot B_e \cdot d_a \cdot L_r \Rightarrow B_a = 2 \cdot B_e = 2,14 \text{ T}$$

Largeur de dent à l'alésage :

$$d_a = b = \frac{\pi \cdot D_r}{2 \cdot N_d} = \frac{\pi \times 0,7}{2 \times 54} = 20,362 \text{ mm}$$

Par le calcul de la circonférence en fond d'encoche et en retranchant la largeur d'encoche, on obtient la largeur des dents à la base :

$$d_f = \frac{p}{N_d} \cdot (D_r + 2 \cdot h_d) - b = \frac{p}{54} \cdot (700 + 2 \times 90) - 20,362 = 30,83 \text{ mm}$$

$$\text{Ou directement : } d_f = \frac{\pi}{N_d} \cdot \left(\frac{D_r}{2} + 2 \cdot h_d\right) = \frac{\pi}{54} \cdot \left(\frac{700}{2} + 2 \times 90\right) = 30,83 \text{ mm}$$

Par la loi de conservation du flux :  $B_a \cdot d_a = B_f \cdot d_f$

On déduit :

$$B_f = B_a \cdot \frac{d_a}{d_f} = 2,14 \times \frac{20,36}{30,83} = 1,413 \text{ T}$$

Voir le document réponse N°4 :  $W_a = 7,45 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;  $W_m = 4,45 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;  $W_f = 2,9 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### Question 24

Voir le document réponse N°4.

Géométriquement ou en intégrant, on obtient les pertes massiques moyennes :

$$W_d = \frac{W_a + 4 \cdot W_m + W_f}{6} = \frac{7,45 + 4 \times 4,45 + 2,9}{6} = 4,692 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Question 25

Il n'est pas équivalent de calculer l'induction moyenne dans la dent pour en déterminer les pertes massiques moyennes *a posteriori* car la relation entre l'induction et les pertes n'est pas linéaire (affine).

### Question 26

Pertes majorées dans la couronne :

$$P_{Fc} = K_c \cdot W_c \cdot m_c = 1,4 \times 3,875 \times 1976 = 10,72 \text{ kW}$$

Section des dents :

$$S_d = h_d \cdot \frac{D_a + D_f}{2} = 90 \times \frac{20,362 + 30,83}{2} = 23,04 \text{ cm}^2$$

Masse des dents :  $m_d = \rho_s \cdot N_d \cdot S_d \cdot L_r = 7\,800 \times 54 \times 2\,304 \cdot 10^{-6} \times 0,3 = 291,1 \text{ kg}$

Pertes majorées dans les dents :

$$P_{Fd} = K_d \cdot W_d \cdot m_d = 2,4 \times 4,692 \times 291,1 = 3,278 \text{ kW}$$

Section de la couronne :

$$S_c = \pi \cdot \left[ \left( \frac{D_r}{2} + h_d + h_c \right)^2 - \left( \frac{D_r}{2} + h_d \right)^2 \right] = \pi \cdot \left[ (35 + 9 + 24)^2 - (35 + 9)^2 \right] = 8\,445 \text{ cm}^2$$

Masse de la couronne :  $m_c = \rho_s \cdot S_c \cdot L_r = 7\,800 \times 0,8445 \times 0,3 = 1\,976 \text{ kg}$

Pertes majorées dans la couronne :

$$P_{Fc} = K_c \cdot W_c \cdot m_c = 1,4 \times 3,875 \times 1976 = 10,72 \text{ kW}$$

### Question 27

Par la loi de Faraday, en régime périodique alternatif, l'induction est proportionnelle à la force électromotrice. Il suffit de multiplier les inductions par  $E/V$ . Par la réponse à la question 26, il vient :

$$P_{Ft} = 1,146^2 \cdot [P_{Fd} + P_{Fc}] = 1,313 \cdot (3,278 + 10,72) = 18,38 \text{ kW} \{18,15 \text{ kW}\}$$

### Question 28

Pertes par effet Joule dans les dans les trois phases de l'induit :

$$P_{Ji} = 3 \cdot R_i \cdot I_n^2 = 3 \times 32 \cdot 10^{-3} \times 1050^2 = 105,8 \text{ kW}$$

Ou directement par les puissances nominales énoncées :

$$P_{Ji} = R_i \cdot \frac{S_n^2}{U_n^2} = 32 \times \frac{12^2}{6,6^2} \cdot 10^3 = 105,8 \text{ kW}$$

### Question 29

Rendement au point nominal :

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_n + (P_{jf} + P_{Ft} + P_{ji}) + (P_{fp} + P_{fg} + P_V) + (P_{Fi} + P_{Ti} + P_{Pf} + P_{ex}) + P_r} \cdot \eta_T \cdot \eta_r$$

$$\eta_n = \frac{11 \cdot 10^3}{11 \cdot 10^3 + 226,28 + 73,36 + 15,34} \cdot 0,993 \cdot 0,989$$

$$\eta_n = 0,96756 \times 0,993 \times 0,989 = 95,02 \% \{0,9671 \times 0,993 \times 0,989 = 94,98 \%\}$$

### Question 30

En régime nominal le rendement de la chaîne de conversion thermoélectrique hors auxiliaires est de :

$$\eta = 0,67 \times 0,92 \times 0,999 \times 0,31 \times 0,95 = 0,181$$

La puissance délivrée étant de 11 MW, la puissance solaire collectée est alors :  $P_{abs} = 60,66 \text{ MW}$

Le rendement intégrant les auxiliaires est alors :

$$\eta = \frac{11}{60,66 + 0,180} = 0,181$$

### Question 31

Le coût de la centrale sur la durée de vie de cette dernière est :

$$C = 35 + 25 \times 2,635 = 100,875 \text{ M€}$$

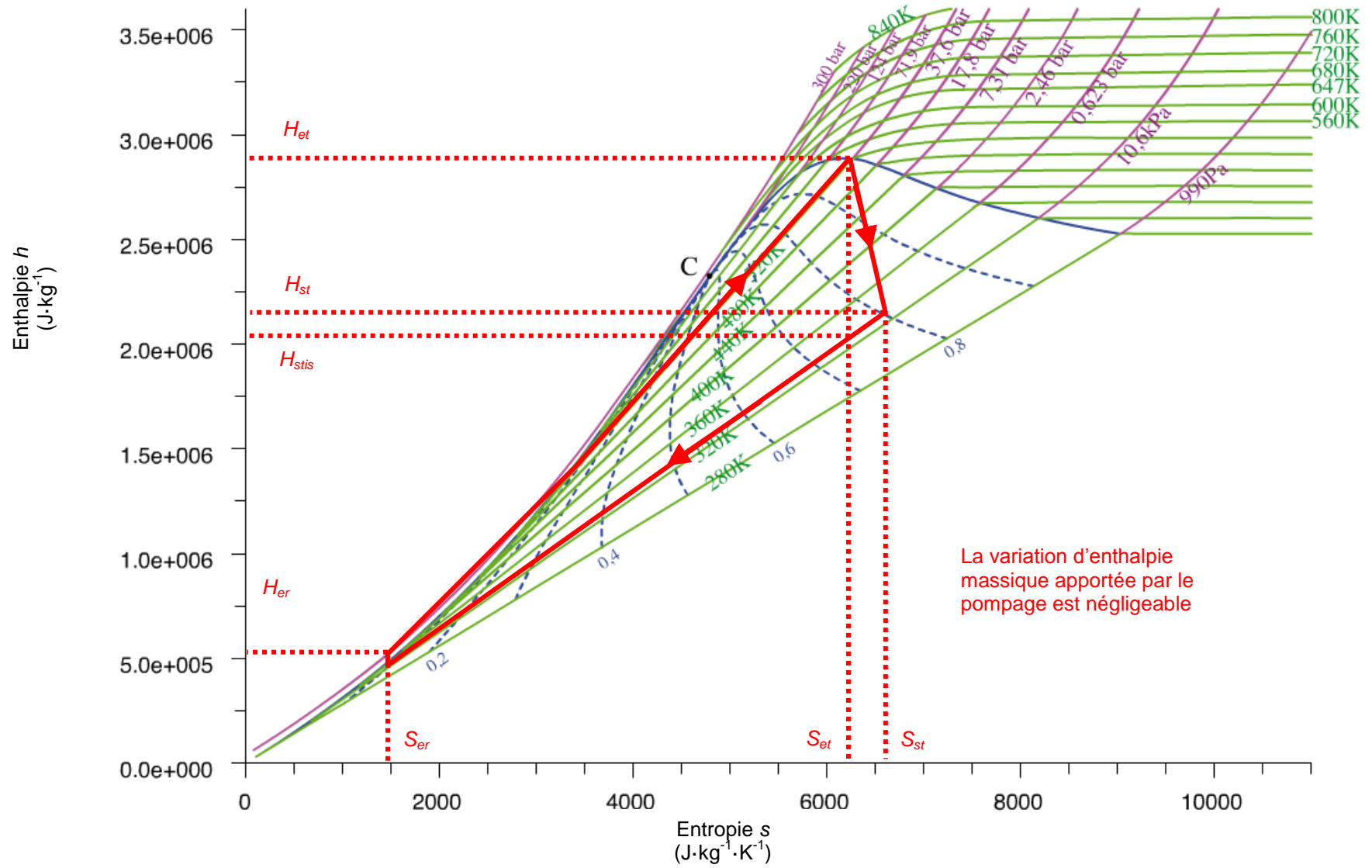
L'énergie produite sur la durée de vie est :

$$E = 24 \times 25 = 600 \text{ GW}\cdot\text{h}$$

Le coût moyen de production est donc de 168 € du MW·h.

Cette solution ne semble pas rentable en l'état, mais elle représente une alternative qui peut devenir intéressante avec la disparition progressive des énergies fossiles facilement exploitables et l'augmentation des tarifs de ces énergies.

Document Réponse N°1 : « Diagramme de Mollier de l'eau »





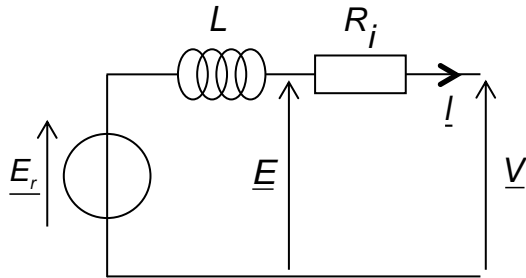


Schéma électrique du modèle de Behn-Eschenburg

**Significations des paramètres du modèle de Behn-Eschenburg**

$R_i$  représente la résistance électrique d'une phase de l'induit.

$L$  représente l'inductance cyclique.

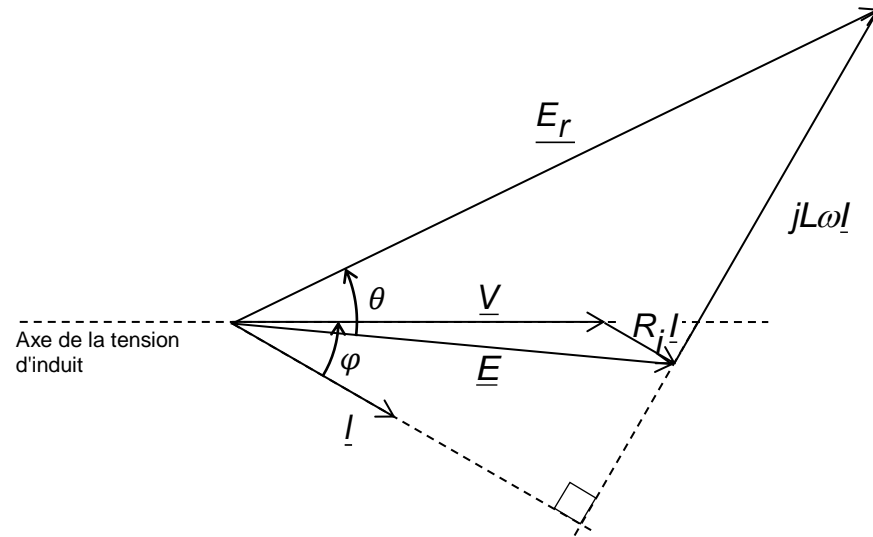
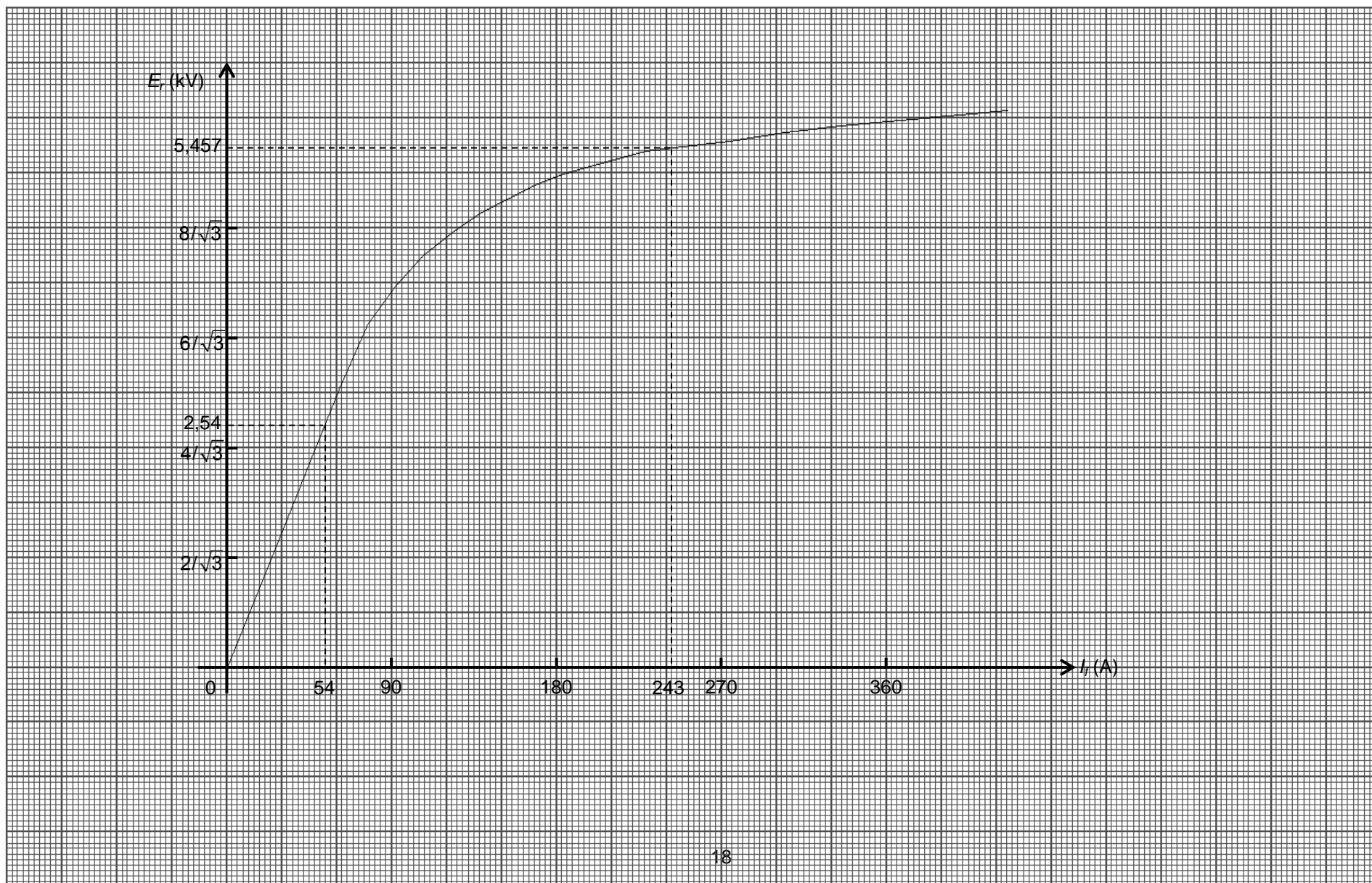
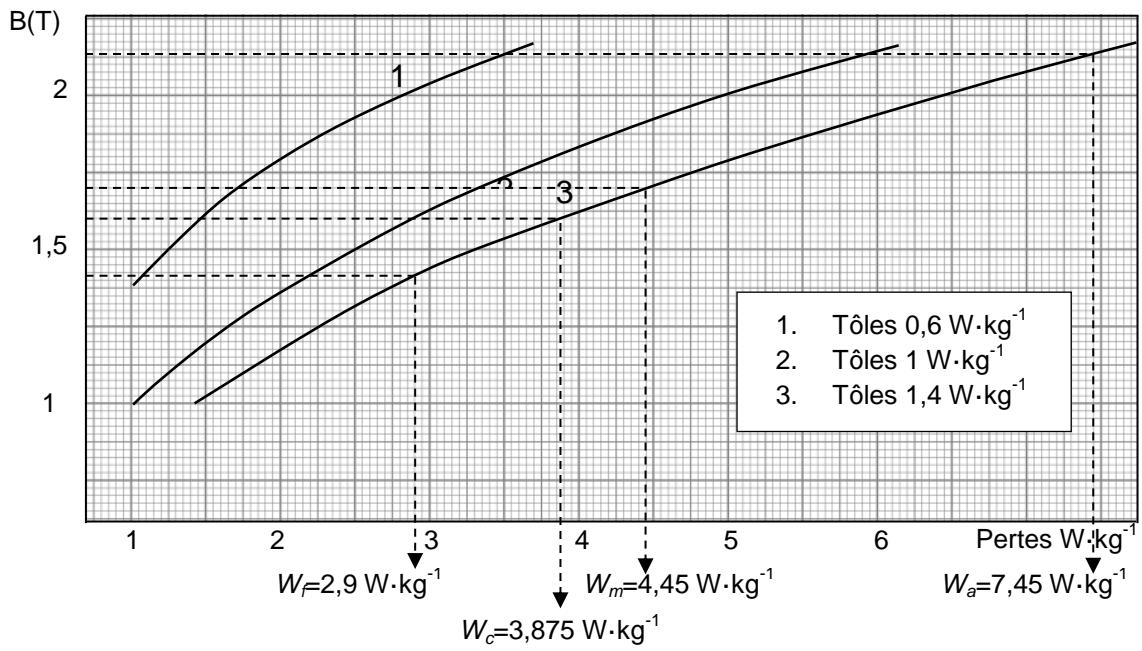


Diagramme de Fresnel

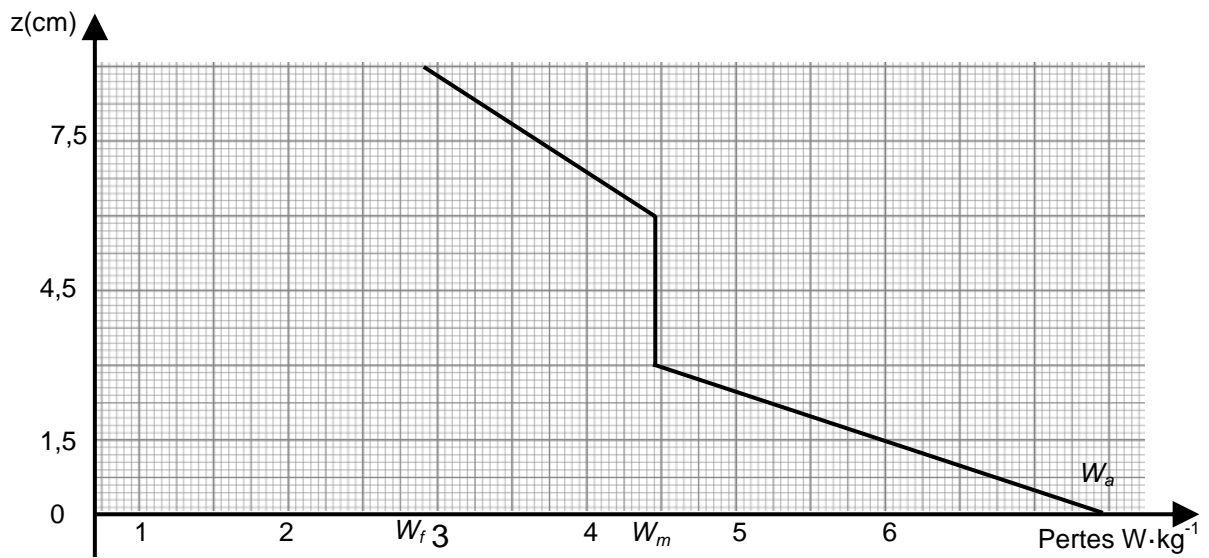
Document Réponse N°3 : « Paramètres de Behn-Eschenburg »



Document Réponse N°4 : « Pertes ferromagnétiques de l'induit »



I- Estimation des pertes massiques

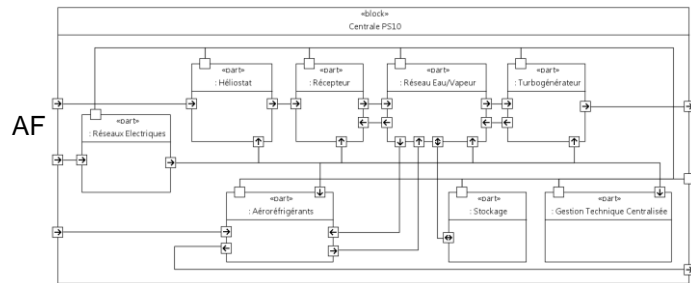


II- Profil des pertes massiques dans une dent

Document réponse N°5 : « Diagramme IBD Centrale PS10 »

ISG  $\eta_{capt} = 67\%$   $\eta_{rec} = 92\%$   $\eta = 99,9\%$   $\eta_{thermo} \cdot \eta_n = 29,5\%$  EEHT

EEBT   
  $P_{abs} = 180 \text{ kW}$



AC

Légende :

- EEBT : Énergie Électrique BT
- ISG : Irradiance Solaire Globale portée par la direction du soleil  $W \cdot m^{-2}$
- AF : Air Froid
- AC : Air Chaud

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

Cette épreuve est commune aux trois options. Les candidats composent sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie. Conformément à l'arrêté du 25/11/2011, « *cette épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de mobiliser ses connaissances scientifiques et techniques pour conduire une analyse systémique, élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances globales et détaillées d'un système des points de vue matière, énergie et information afin de valider tout ou partie de la réponse au besoin exprimé par un cahier des charges. Elle permet de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour analyser et modéliser le comportement d'un système pluritechnique automatique* ».

## 1. Présentation du sujet

Les auteurs du sujet remercient la société Abeinsa et particulièrement messieurs Manuel Valverde, Vice-Président d'Abengoa Abeinsa, et Manuel Pozo Directeur technique d'Abeinsa pour leur disponibilité et les renseignements qu'ils ont été en mesure de leur communiquer.

Le sujet porte sur l'analyse du rendement et de la rentabilité du prototype de centrale solaire thermique à tour PS10 construit en Espagne dans la région de Séville. Ce thème s'inscrit dans le contexte de l'énergie et du développement durable, deux secteurs d'activité qui constituent une voie importante d'innovation et de développement économique pour les prochaines décennies.

Après une partie introductive au sujet, quatre parties permettent progressivement de déterminer le rendement global de la centrale. Une dernière partie détermine le coût de l'électricité produite afin d'évaluer la rentabilité actuelle et future de cette technologie. L'ensemble évalue de façon transversale les compétences utiles à l'enseignement des sciences et techniques de l'ingénieur.

## 2. Analyse globale des résultats

L'évaluation des copies montre une très forte hétérogénéité. Un petit nombre de candidats bien préparés traite correctement les deux tiers du sujet, mais pour un bon nombre de candidats, visiblement non préparés, les fondamentaux ne sont pas acquis.

La qualité de la présentation est aussi très variable. Certains candidats montrent à cette occasion leur capacité à proposer des schémas clairs et pédagogiques, ainsi que des raisonnements bien construits, quand d'autres au contraire, sont très confus. Il s'agit pourtant d'une qualité indispensable pour un professeur.

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

### Partie 2

Cette partie s'intéresse aux lois et protocoles de pointage des héliostats vers la tour, puis au dimensionnement de la structure permettant une concentration suffisante du rayonnement sur le récepteur. Elle est largement abordée, avec un succès très variable selon les candidats.

La première question vise à interpréter le diagramme de séquence. Une description des échanges d'information était attendue.

Le schéma cinématique de la question 2 est bien réussi pour la moitié des candidats. Le jury s'attendait à une plus grande proportion de réponses correctes en option IM pour cette question. Le calcul des paramètres de position de l'héliostat (question 3) débouche très rarement. La plupart des candidats se contente de projeter les vecteurs, sans parvenir à exprimer une condition géométrique de pointage, ou alors de façon très approximative.

La question 4 propose d'écrire un programme informatique simple. Elle est correctement abordée par une quinzaine de candidats seulement, 4 sur 5 environ n'abordant même pas la question. La question 5, relative au rendement de captation, est au contraire traitée avec succès par la majeure partie des candidats. Un caractère (E) a disparu au moment de l'impression du sujet dans cette question. Cela n'a visiblement pas gêné les candidats.

Les questions 6 à 9 s'intéressent à un problème de résistance des matériaux. Par symétrie, il se résume à une poutre simplement encastrée soumise à une charge répartie uniforme. Seul un tiers des candidats parvient à exprimer le moment fléchissant. Peu de candidats savent mettre en évidence les lois de similitude pour une section IPN homothétique et trouver le moment quadratique de la section du treillis.

### **Partie 3**

Cette partie vise à évaluer le rendement du récepteur. Après avoir justifié une modélisation, les candidats sont amenés à l'exploiter pour déterminer l'irradiance minimale permettant de débiter la production thermoélectrique.

L'interprétation critique de l'hypothèse consistant à négliger les pertes en face arrière est souvent faite qualitativement. Il était attendu une analyse quantitative des ordres de grandeur des coefficients donnés en annexe.

L'analyse du modèle acausal du récepteur est très rarement abordée. L'application numérique du rendement est, par contre, très souvent correctement traitée. Le calcul de l'irradiance minimale est rarement abordé.

Une coquille s'est glissée dans le sujet : un exposant a disparu dans la valeur numérique de  $E$  ( $E = 50 \cdot 106$  W et il fallait lire  $E = 50 \cdot 10^6$  W). Les applications numériques réalisées avec la valeur 50 106 W ont été comptées justes pour ne pas pénaliser les candidats.

### **Partie 4**

Cette partie vise à évaluer le rendement de la transformation thermodynamique. Pour cela deux modélisations sont proposées, celle de Carnot et celle de Rankine.

Le rendement de Carnot n'est connu que par un tiers des candidats, et parmi eux, la moitié seulement réalise l'application numérique en Kelvin.

Le tracé du cycle de Rankine et son exploitation sont très rarement abordés correctement. Il en va de même de l'analyse critique des deux approches de modélisation.

### **Partie 5**

Cette partie vise à évaluer le rendement de l'alternateur en déterminant quelques pertes électriques et ferromagnétiques. Elle exploite un modèle élémentaire de cette machine.

Les hypothèses permettant d'exploiter un modèle équivalent monophasé sont rarement citées. L'identification des tensions sur le schéma électrique et le diagramme de Fresnel est généralement fautive. La dénomination de  $R_i$  et  $L$  est souvent vague, indiquant un faible degré de compréhension du modèle.

Le calcul de  $I_n$  et  $F_{pn}$  est abordé par une bonne partie des candidats, et c'est sans doute la partie la mieux traitée.

Les questions 20 à 27 sont ensuite très rarement abordées correctement. Quelle que soit l'option, moins d'un candidat sur 10 répond correctement à la question 25 relative à la condition d'application du théorème de superposition.

Alors que le calcul du courant nominal en question 19 a été relativement bien traité, moins du quart des candidats abordent la question 28, traitant des pertes par effet Joule dans l'induit.

Le calcul du rendement à la question 29 est souvent écrit en convention récepteur et non en convention générateur. On rencontre trop souvent des sommes ou des moyennes de rendements.

#### **Partie 6**

Cette dernière partie complètement indépendante permettait d'évaluer la capacité des candidats à mener un bilan énergétique et économique.

Le document réponse question 3,0 qui servait de support au bilan, est souvent correctement complété, mais les applications et raisonnements permettant d'obtenir le rendement global de la production sont souvent faux.

Le calcul de rentabilité de la centrale est très largement abordé, et la plupart des candidats aboutissent à une évaluation économique cohérente. Cependant une conclusion critique sur les résultats numériques obtenus était aussi attendue.

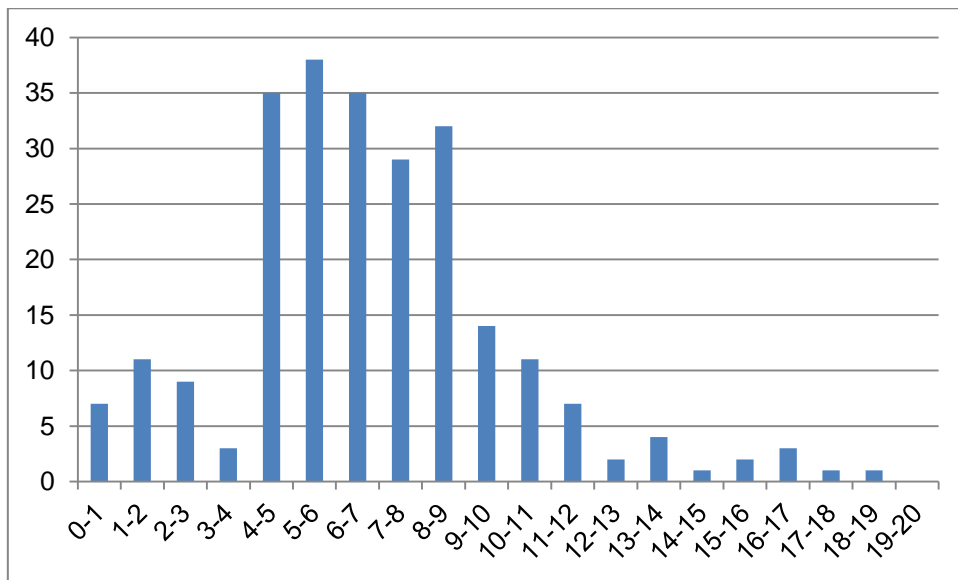
#### **4. Conclusion**

Les différentes parties de ce sujet abordent bon nombre des compétences fondamentales nécessaires pour enseigner aujourd'hui dans les filières technologiques, que ce soit en STI2D, en S-SI ou en classes préparatoires : savoir interpréter un diagramme SysML, réaliser un schéma cinématique, manipuler vecteurs et complexes, écrire un programme simple, savoir modéliser de manière élémentaire le fonctionnement d'une machine électrique, prendre en compte les rendements dans une chaîne de transmission de puissance, calculer la déformation d'une poutre dans le cadre de sollicitations simples, exploiter des modélisations multi-physiques, ou encore prendre en compte une contrainte économique. Le jury invite les futurs candidats à s'assurer qu'outre les savoirs scientifiques basiques, ils maîtrisent aussi ces fondamentaux.

#### **5. Résultats**

245 copies ont été évaluées, dont 45 pour les candidats à l'agrégation marocaine. La moyenne des notes obtenues est 6,8/20 et l'écart-type est de 3,3 avec :

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





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

## Partie 1 - Présentation du bras ASSIST et justification des choix technologiques réalisés

### Question 1

**Solution 1 :** l'inconvénient du capteur 6 axes réside dans l'impossibilité à détecter la zone d'interférence avec le robot en amont du capteur.

**Solution 2 :** les inconvénients des capteurs de couple sont l'encombrement, la multiplication des fils à ramener à la baie de commande ainsi que les problèmes de dérives et de calibration.

**Solution 3 (robot ASSIST) :** le couple moteur est mesuré sur chaque articulation. Cela permet de détecter la collision sur toute partie de bras avec un encombrement minimal. On peut vérifier continuellement les efforts mis en jeu au niveau des bras. Le système est plus sûr.

### Question 2

Le couple moteur doit être une image fidèle des efforts extérieurs sur le bras. Cela nécessite :

- des systèmes de transmission à haut rendement ;
- la réversibilité de la chaîne de transmission.

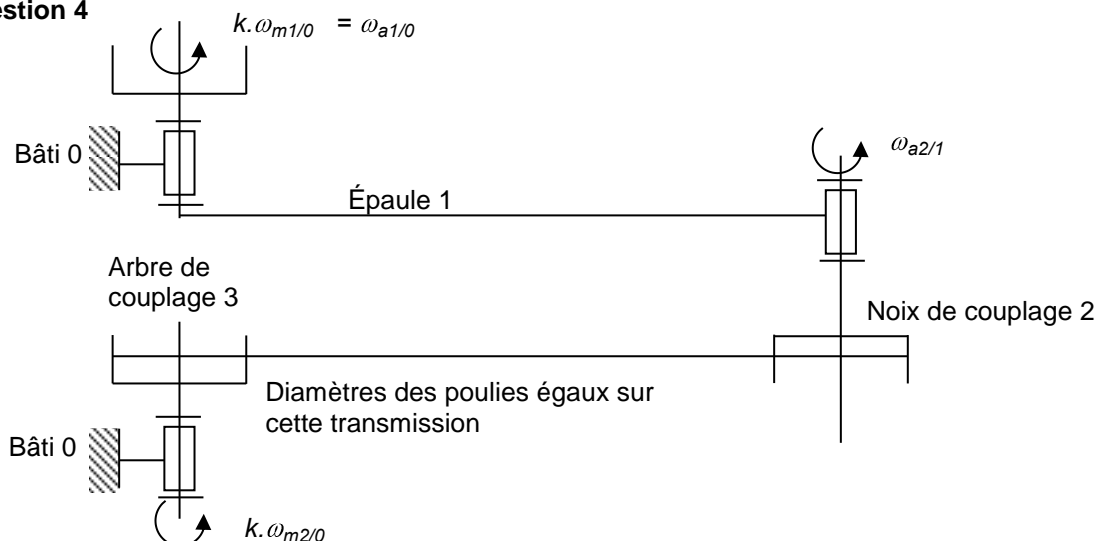
### Question 3

Le choix d'implanter les motorisations à proximité des axes permet de limiter les traversées d'axes pour atteindre celui situé en aval.

Le choix d'une technologie à axes déportés engendrerait un nombre de couplages d'axes important puisque le positionnement de l'axe N+1 serait alors dépendant du positionnement de l'axe N.

Le choix d'une implantation à axes déportés engendre également une augmentation des longueurs de câbles qui diminuent la raideur de la transmission. Le bras de robot serait alors moins stable et sa position moins précise.

### Question 4



On a les relations cinématiques suivantes :

$$k \omega_{m1/0} = \omega_{a1/0} \quad \text{et} \quad k \cdot \omega_{m2/0} = \omega_{a2/1} + k \cdot \omega_{m1/0}$$

soit :  $\omega_{m1/0} = \frac{1}{k} \cdot \omega_{a1/0}$  et  $\omega_{m2/0} = \frac{1}{k} \cdot (\omega_{a2/1} + \omega_{a1/0})$

### Question 5

La commande en coordonnées opérationnelles permet de suivre une trajectoire prédéfinie, donc de contrôler la géométrie de la trajectoire. Elle permet donc d'éviter les collisions et présente une plus grande facilité d'utilisation.

Le Modèle Géométrique Direct (MGD) est donc :

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_c(t) \\ z_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_3 \cdot \sin q_3 + l_4 \cdot \sin (q_3 + q_4) \\ l_3 \cdot \cos q_3 + l_4 \cdot \cos (q_3 + q_4) \end{pmatrix}$$

### Partie 2 - Validation de l'hypothèse « robot à articulation rigide »

#### Question 6

Ce premier modèle articulaire est défini dans l'hypothèse d'une articulation rigide et sera ensuite détaillé en partie 4 dans le cas d'une articulation flexible.

Modèle Articulaire Directe (MAD) :

$$q_{iref} = K_{tran} \cdot \theta_{iref}$$

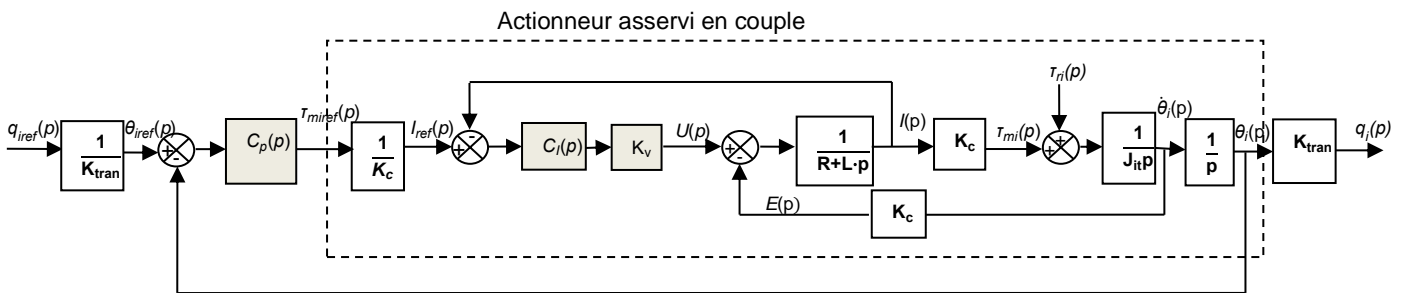
avec  $K_{tran} = \frac{1}{i} \cdot \frac{Z_m}{Z_r} \cdot p_a \cdot \frac{2}{D_m} = \frac{1}{4,3} \cdot \frac{16}{41} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2}{65 \cdot 10^{-3}} = 1,4 \cdot 10^{-2}$

Modèle Articulaire Inverse (MAI) :

$$\theta_{iref} = \frac{1}{K_{tran}} \cdot q_{iref} = 71,6$$

Modèle Dynamique Inverse (MDI) :

$$T_{mi} = J_{it} \cdot \ddot{\theta}_i - T_{ri}$$



#### Question 7

On obtient l'angle articulaire  $q_i$  par la relation :

$$q_i = \arctan\left(\frac{x_{mes} - x_0}{z_{mes} - z_0}\right) \text{ si } z_{mes} - z_0 \geq 0 \quad \text{et} \quad q_i = \arctan\left(\frac{x_{mes} - x_0}{z_{mes} - z_0}\right) + \pi \text{ si } z_{mes} - z_0 < 0$$

Le centre de rotation et la cible peuvent ne pas coïncider à cause d'un mauvais positionnement de la cible ou de déformations de la structure.

Si  $P_0$  et C ne coïncident pas, on a alors :  $\tan q = \frac{x_{mes} - x_0 - \Delta x_0}{z_{mes} - z_0 - \Delta z_0}$  avec  $\Delta x_0$  et  $\Delta z_0$  inconnues.

$$\text{Or } (x_{mes} - x_0 - \Delta x_0)^2 + (z_{mes} - z_0 - \Delta z_0)^2 = r^2$$

Soit :

$$(x_{mes} - x_0)^2 + (z_{mes} - z_0)^2 - 2\Delta x_0(x_{mes} - x_0) - 2\Delta z_0(z_{mes} - z_0) + \Delta x_0^2 + \Delta z_0^2 = r^2$$

$\Delta x_0^2$  et  $\Delta z_0^2$  étant négligeables, on obtient :

$$(x_{mes} - x_0)^2 + (z_{mes} - z_0)^2 - 2\Delta x_0(x_{mes} - x_0) - 2\Delta z_0(z_{mes} - z_0) = r^2$$

On peut estimer  $(\Delta x_0, \Delta z_0)$  variant dans le temps par moindres carrés pour reconstruire  $(x_c, z_c)$  puis on calcule la position angulaire de la cible 2.

#### Question 8

La première expérience montre que les angles moteurs et articulaires ne sont pas proportionnels. On ne peut donc pas valider un modèle à articulations rigides.

Expérience n°2 : on observe une bonne linéarité, un gain unitaire.

Expérience n°1 : on observe une réponse oscillatoire faiblement amortie  $\frac{Q(p)}{\Theta(p)} = \frac{K_{tran}}{1 + \frac{2\xi p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$

avec  $\omega_0 = 4,35 \cdot 2\pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ; dépassement de 66% (l'échelon est de 0,007 rad, le dépassement de 0,0045 rad) soit  $\xi = 0,13$ .

### Partie 3 - Analyse des flexibilités

#### Question 9

$$E \cdot I_{Gz} \cdot y'' = M_f(x) = F_{ext} \cdot (x-L) - C_{ext}$$

$$\text{Soit : } E \cdot I_{Gz} \cdot y = F_{ext} \cdot \frac{x^3}{6} - (F_{ext} \cdot L + C_{ext}) \frac{x^2}{2} + C_1 \cdot x + C_2$$

Les conditions aux limites permettent d'écrire :

- en  $x = 0, y = 0 \Rightarrow C_2 = 0$
- en  $x = 0, y' = 0 \Rightarrow C_1 = 0$

La flèche en B s'écrit donc :

$$y_B = -\frac{12}{E \cdot b \cdot h^3} \left( \frac{F_{ext} \cdot L^3}{3} + \frac{C_{ext} \cdot L^2}{2} \right); y_B = 0,153 \text{ mm}$$

et

$$\alpha_B = \left( \frac{dy_B}{dx} \right)_{x=L} = -\frac{12 \cdot L}{E \cdot b \cdot h^3} \cdot \left( \frac{F_{ext} \cdot L}{2} + C_{ext} \right); \alpha_B = 0,046^\circ$$

#### Question 10

L'ensemble des perçages et des trous taraudés peuvent être retirés de la géométrie de manière à simplifier le maillage. Ces éléments sont en effet sans influence sur la détermination de la flèche du bras.

La géométrie du bras comporte des surfaces non planes telles que des surfaces cylindriques ou des congés de raccordement. Il convient donc d'utiliser des éléments de second ordre de type tétraèdre quadratique.

#### Question 11

Le premier maillage comporte un nombre d'éléments faible qui rend le calcul très rapide. Cependant le maillage comporte un nombre important d'éléments avec un aspect ratio supérieur à trois important. Ces formes d'éléments présentes dans le maillage peuvent impacter la précision du calcul. De plus, le nombre d'éléments distordus est non négligeable.

Le second maillage comporte un nombre important d'éléments avec 99,5 % des éléments d'aspect ratio inférieur à trois, la valeur cible étant égale à 1.

Ce maillage ne comporte pas d'éléments distordus. Il convient de privilégier le second maillage, plus fin et plus précis.

#### Question 12

Le résultat de la simulation montre un déplacement au niveau des alésages en B, de l'ordre de 0,16 mm, très proche du résultat obtenu par le modèle poutre qui peut donc être validé.

L'étude du modèle poutre montre une rotation de la section de la poutre en B très faible. Le bras est donc relativement rigide pour cette application.

La déformation du bras sous l'effet de la charge extérieure peut donc être négligée dans la suite de l'étude : la figure 12 montre une déformation articulaire maximale de l'ordre de  $10^{-3}$  rad (0,05°), soit un déplacement de 1 mm pour un bras de longueur d'un mètre, ce qui est bien supérieur au 0,16 mm du modèle poutre.

#### Question 13

$$\text{Chaque brin travaille en traction : } \sigma_{tt}^i = E_c \cdot \epsilon_{tt}^i = E_c \cdot (a \cdot \epsilon_{tt}^{i0} + b \cdot \theta_{tt}^{i0})$$

L'effort de traction et le moment de torsion appliqués sur le toron sont :

$$F_{ti} = \vec{F}_{ti} \cdot \vec{t}_i \text{ avec } \vec{F}_{ti} = \int_{S_b} \sigma_{tt}^i \vec{t}_{ij} dS; \quad M_{ti} = \vec{M}_O \cdot \vec{t}_i \text{ avec } \vec{M}_O = \int_{S_b} \vec{OM} \wedge \sigma_{tt}^i \vec{t}_{ij} dS$$

$S_b$  est la section des brins :  $S_b = S_a \cdot \cos \alpha_i$

$$F_{ti} = \int_{S_a} \sigma_{tt}^{ij} \cdot \vec{t}_{ij} \cdot \vec{t}_i \cos \alpha_i dS = \int_{S_a} \sigma_{tt}^{ij} \cdot \cos \alpha_i \cdot dS = f \int_{S_0} \sigma_{tt}^{ij} \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot dS$$

$$F_{ti} = f \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot E_c \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot (a \cdot \epsilon_{tt}^{i0} + b \cdot \theta_{tt}^{i0})$$

$$M_{ti} = \int_{S_b} r \cdot \sigma_{tt}^{ij} \cdot \sin \alpha_i dS = f \int_{S_0} r \cdot \sigma_{tt}^{ij} \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i \cdot dS = f \cdot E_c \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i \cdot (a \cdot \epsilon_{tt}^{i0} + b \cdot \theta_{tt}^{i0}) \cdot \frac{2\pi r_0^3}{3}$$

Soit :

$$k_{\epsilon\epsilon} = f \cdot E_c \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot a \cdot \pi \cdot r_0^2 ; \quad k_{\epsilon\theta} = f \cdot E_c \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot b \cdot \pi \cdot r_0^2 ;$$

$$k_{\theta\epsilon} = f \cdot E_c \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i \cdot a \cdot \frac{2\pi r_0^3}{3} ; \quad k_{\theta\theta} = f \cdot E_c \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i \cdot b \cdot \frac{2\pi r_0^3}{3}$$

#### Question 14

La force de traction et le moment de torsion pour chaque toron  $i$  sont donnés par :

$$F_{ti} = k_{\epsilon\epsilon} \cdot (A \cdot u_{zz} + B \cdot \theta_{zz}) + k_{\epsilon\theta} \cdot (C \cdot u_{zz} + D \cdot \theta_{zz})$$

$$M_{ti} = k_{\theta\epsilon} \cdot (A \cdot u_{zz} + B \cdot \theta_{zz}) + k_{\theta\theta} \cdot (C \cdot u_{zz} + D \cdot \theta_{zz})$$

Soit :

$$F_{ti} = \left( k_{\epsilon\epsilon} \cdot \cos^2 \alpha + k_{\epsilon\theta} \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \sin^3 \alpha}{R_h} \right) \cdot u_{zz} + (k_{\epsilon\epsilon} \cdot R_h \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha + k_{\epsilon\theta} \cdot \cos^4 \alpha) \cdot \theta_{zz}$$

et

$$M_{ti} = \left( k_{\theta\epsilon} \cdot \cos^2 \alpha + k_{\theta\theta} \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \sin^3 \alpha}{R_h} \right) \cdot u_{zz} + (k_{\theta\epsilon} \cdot R_h \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha + k_{\theta\theta} \cdot \cos^4 \alpha) \cdot \theta_{zz}$$

La force axiale totale est :

$$F_z = F_{z0} + 6 \vec{F}_{ti} \cdot \vec{z} = F_{z0} + 6 \cos \alpha \cdot F_{ti}$$

Et le moment de torsion global est :

$$M_z = M_{z0} + 6 \vec{M}_{ti} \cdot \vec{z} + \left( \sum_i \vec{G}_0 \vec{G}_i \wedge \vec{F}_{ti} \right) \cdot \vec{z} = M_{z0} + 6 \cos \alpha \cdot M_{ti} + \left( \sum_i -R_h \vec{n}_i \wedge F_{ti} \vec{t}_i \right) \cdot \vec{z}$$

$$M_z = M_{t0} + 6 \cos \alpha \cdot M_{ti} + 6 R_h \cdot F_{ti} \cdot \sin \alpha$$

$$k_{\epsilon\epsilon}^* = k_{\epsilon\epsilon 0} + 6 \left( k_{\epsilon\epsilon} \cdot \cos^3 \alpha + k_{\epsilon\theta} \cdot \frac{\sin^3 \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{R_h} \right)$$

$$k_{\epsilon\theta}^* = k_{\epsilon\theta 0} + 6 \left( k_{\epsilon\epsilon} \cdot R_h \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha + k_{\epsilon\theta} \cdot \cos^5 \alpha \right)$$

$$k_{\theta\epsilon}^* = k_{\theta\epsilon 0} + 6 \left( k_{\epsilon\epsilon} \cdot R_h \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha + k_{\epsilon\theta} \cdot \sin^4 \alpha \cdot \cos \alpha + k_{\theta\epsilon} \cdot \cos^3 \alpha + k_{\theta\theta} \cdot \frac{\cos^2 \alpha \cdot \sin^3 \alpha}{R_h} \right)$$

$$k_{\theta\theta}^* = k_{\theta\theta 0} + 6 \left( k_{\epsilon\epsilon} \cdot R_h^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha + k_{\epsilon\theta} \cdot R_h \cdot \sin \alpha \cdot \cos^4 \alpha + k_{\theta\epsilon} \cdot R_h \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha + k_{\theta\theta} \cdot \cos^5 \alpha \right)$$

#### Question 15

Pour l'essai en traction :  $\theta_{zz}=0$  d'où  $k_{\epsilon\epsilon}^* = 10^4$  kN et  $k_{\theta\epsilon}^* = 12$  kN·m

Pour l'essai en torsion :  $u_{zz}=cte$  d'où  $k_{\epsilon\theta}^* = -5,33$  kN·m et  $k_{\theta\theta}^* = 7,81$  N·m<sup>2</sup>

Le phénomène de couplage traction/torsion est validé, mais les valeurs des différents coefficients diffèrent sensiblement des valeurs expérimentales concernant le moment de torsion.

#### Question 16

La fixation câble/poulie est telle que le moment de torsion est nul (rotation libre).

$$F_c = k_{\epsilon\epsilon}^* \cdot \frac{\Delta l_c}{l_c} + k_{\epsilon\theta}^* \cdot \frac{\Delta \theta_c}{l_c} \text{ et } 0 = k_{\theta\epsilon}^* \cdot \frac{\Delta l_c}{l_c} + k_{\theta\theta}^* \cdot \frac{\Delta \theta_c}{l_c}$$

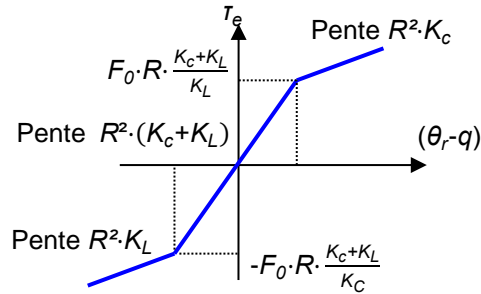
$$F_c = \left( k_{\epsilon\epsilon}^* - \frac{k_{\epsilon\theta}^* \cdot k_{\theta\epsilon}^*}{k_{\theta\theta}^*} \right) \cdot \frac{\Delta l_c}{l_c} \text{ soit } K_c = \left( k_{\epsilon\epsilon}^* - \frac{k_{\epsilon\theta}^* \cdot k_{\theta\epsilon}^*}{k_{\theta\theta}^*} \right) \cdot \frac{1}{l_c}$$

$$\text{De même, } K_L = \left( k_{\theta\theta}^* - \frac{k_{\theta\epsilon}^* \cdot k_{\epsilon\theta}^*}{k_{\epsilon\epsilon}^*} \right) \cdot \frac{1}{l_c}$$

**Question 17**

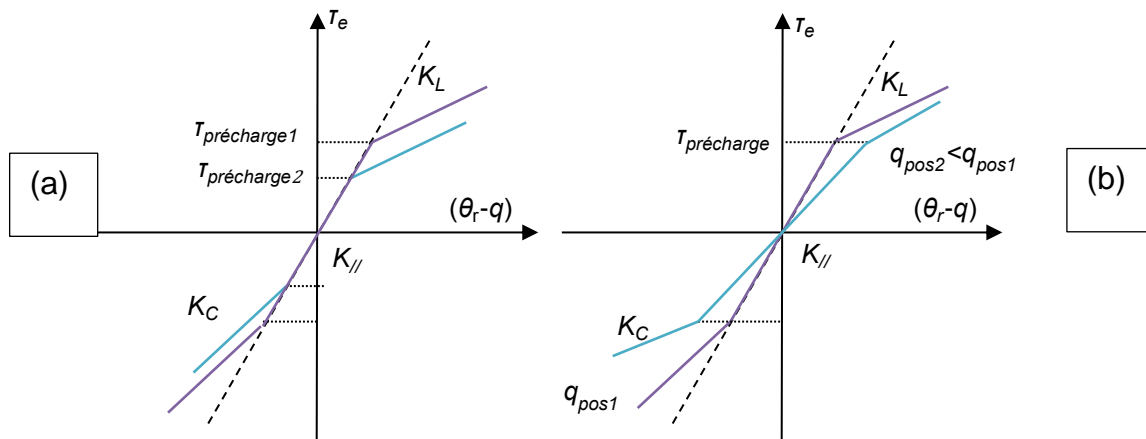
- Théorème de la résultante statique sur la vis :  $F = F_C - F_L$   
 $F_L = \max(F_0 + K_L \cdot (R \cdot q - x), 0)$  et  $F_C = \max(F_0 - K_C \cdot (R \cdot q - x), 0)$
- Si les 2 brins sont tendus :  
 $F_C - F_L = (K_C + K_L) \cdot R \cdot (\theta_r - q)$  et  $\tau_e = R^2 \cdot (K_C + K_L) \cdot (\theta_r - q)$   
 Donc la raideur de l'articulation est :  $K_e = R^2 \cdot (K_C + K_L)$
- Si seul le brin court est tendu :  
 $F_C - F_L = F_C - 0 = F_0 + K_C \cdot R \cdot (\theta_r - q)$ ,  $\tau_e = R \cdot F_0 + R^2 \cdot K_C \cdot (\theta_r - q)$  et  $K_e = R^2 \cdot K_C$
- Si seul le brin long est tendu :  
 $F_C - F_L = 0 - F_L = -F_0 + K_L \cdot R \cdot (\theta_r - q)$  et  $\tau_e = -R \cdot F_0 + R^2 \cdot K_L \cdot (\theta_r - q)$  et  $K_e = R^2 \cdot K_L$

**Question 18**



Le brin long est détendu ( $F_L = 0$ ) lorsque  $F_0 = K_L \cdot R \cdot (\theta_r - q)$  soit si  $\tau_e = R \cdot F_0 \cdot \frac{K_C + K_L}{K_L}$   
 Le brin court est détendu ( $F_C = 0$ ) lorsque  $F_0 = -K_C \cdot R \cdot (\theta_r - q)$  soit si  $\tau_e = -R \cdot F_0 \cdot \frac{K_C + K_L}{K_C}$   
 Un théorème du moment dynamique sur la poulie 1 donne :  $\tau_{ext} + R \cdot (F_L - F_C) = 0$  soit  $\tau_{ext} = \tau_e$

- (a) Effet de la précharge : les points de discontinuité sont atteints dès que  $\tau_{ext}$  atteint les valeurs de  $\tau_{limite}$ . La précharge  $F_0$  et le couple résistant extérieur  $\tau_{ext}$  font varier les instants où l'un des brins n'est plus tendu donc les instants de changement de raideur ;
- (b) Effet d'une variation de longueur  $l_c$  : les raideurs sont proportionnelles à l'inverse de la longueur. La longueur du brin court  $l_c$  fait varier la raideur. Or le couple résistant extérieur  $\tau_{ext}$  et la longueur du brin court  $l_c$  varient avec la configuration des axes situés en aval de l'articulation considérée.



Tous ces phénomènes sont non-linéaires.

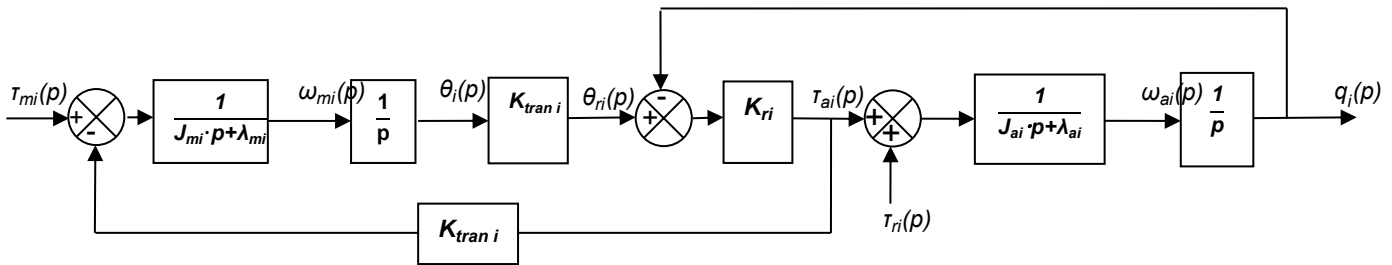
**Partie 4 - Modèles articulaire et dynamique dans le cas d'une articulation flexible**

**Question 19**

Un théorème d'énergie/puissance sur l'ensemble moteur puis sur l'ensemble articulaire donne :

$$J_{mi} \cdot \frac{d\omega_{mi}}{dt} = T_{mi} - K_{tran} \cdot T_{ai} - \lambda_{mi} \cdot \omega_{mi} \quad \text{et} \quad J_{ai} \cdot \frac{d\omega_{ai}}{dt} = T_{ai} + T_{ri} - \lambda_{ai} \cdot \omega_{ai}$$

avec  $\tau_{ai} = K_{ri} \cdot (\theta_{ri} - q_i)$  ;  $\theta_{ri} = K_{trani} \cdot \theta_i$  ;  $\omega_{ai} = \dot{q}_i$  ;  $\omega_{mi} = \dot{\theta}_i$   
 soit le schéma bloc :



$$q_i = \frac{1}{p \cdot (J_{ai} p + \lambda_{ai})} (K_{ri} \cdot (K_{trani} \theta_i - q_i) + T_{ri}) \text{ soit : } q_i = \frac{K_{ri} \cdot K_{trani}}{J_{ai} p^2 + \lambda_{ai} p + K_{ri}} \theta_i + \frac{1}{J_{ai} p^2 + \lambda_{ai} p + K_{ri}} T_{ri}$$

$$H_{i\theta}(p) = \frac{K_{ri} \cdot K_{trani}}{J_{ai} p^2 + \lambda_{ai} p + K_{ri}} \text{ et } H_{ri}(p) = \frac{1}{J_{ai} p^2 + \lambda_{ai} p + K_{ri}}$$

Le modèle articulaire direct (MAD) s'écrit donc :  $\tilde{q}_i(p) = \frac{K_{ri} \cdot K_{trani} \tilde{\theta}_i + \tilde{T}_{ri}}{J_{ai} p^2 + \lambda_{ai} p + K_{ri}}$

Remarque :  $T_{ri} = T_{pes}(q) + T_f$ , couple dû à la pesanteur et au frottement sec.

**Question 20**

$$E_c(3/0) = \frac{1}{2} (B_3 + m_3 \lambda_3^2) \dot{q}_3^2$$

$$E_c(m3/0) = \frac{1}{2} J_a \dot{\theta}_{r3}^2$$

$$\vec{V}(G_4, 4/0) = l_3 \dot{q}_3 \vec{x}_3 + \lambda_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \vec{x}_4 ;$$

$$E_c(4/0) = \frac{1}{2} B_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4)^2 + \frac{1}{2} m_4 (\vec{V}(G_4, 4/0))^2 = \frac{1}{2} [(B_4 + m_4 \lambda_4^2) (\dot{q}_3 + \dot{q}_4)^2 + m_4 l_3 \dot{q}_3^2 (l_3 + 2 \lambda_4 \cos q_4) + 2 m_4 l_3 \lambda_4 \cos q_4 \cdot \dot{q}_3 \cdot \dot{q}_4]$$

$$E_c(m4/0) = \frac{1}{2} J_a \dot{\theta}_{r4}^2$$

Donc :  $E_c(S/0) = \frac{1}{2} [J_3(q_4) \cdot \dot{q}_3^2 + J_4 \cdot \dot{q}_4^2 + J_a \cdot (\dot{\theta}_{r3}^2 + \dot{\theta}_{r4}^2) + J_{34}(q_4) \cdot \dot{q}_3 \cdot \dot{q}_4]$

Avec :  $J_3(q_4) = B_3 + m_3 \lambda_3^2 + B_4 + m_4 (\lambda_4^2 + l_3^2 + 2 l_3 \lambda_4 \cos q_4)$

$$J_4 = B_4 + m_4 \lambda_4^2$$

$$J_{34}(q_4) = 2(B_4 + m_4 \lambda_4^2 + m_4 l_3 \lambda_4 \cos q_4)$$

**Question 21**

Puissance associée à l'effort de collision :

$$\vec{V}(C, 4/0) = l_3 \dot{q}_3 \vec{x}_3 + l_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \vec{x}_4$$

$$P(\text{ext}) = \vec{F}_{\text{ext}} \cdot \vec{V}(C, 4/0) = \begin{vmatrix} F_x \\ 0 \\ F_z \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} l_3 \dot{q}_3 \cos(q_3) + l_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \cos(q_3 + q_4) \\ 0 \\ -l_3 \dot{q}_3 \sin(q_3) - l_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \sin(q_3 + q_4) \end{vmatrix}$$

$$P(\text{ext}) = F_x \cdot (l_3 \dot{q}_3 \cos(q_3) + l_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \cos(q_3 + q_4)) + F_z \cdot (-l_3 \dot{q}_3 \sin(q_3) - l_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \sin(q_3 + q_4))$$

Puissance associée à la pesanteur :

$$P(\text{pes}) = m_3 g \vec{z} \cdot l_3 \dot{q}_3 \vec{x}_3 + m_4 g \vec{z} \cdot (l_3 \dot{q}_3 \vec{x}_3 + \lambda_4 (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \vec{x}_4) = -g (\dot{q}_3 \sin q_3 (m_3 \lambda_3 + m_4 l_3) - (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \sin(q_3 + q_4) m_4 \lambda_4)$$

Puissance interne associée aux ressorts :

$$P_r = -K_{r3} \cdot (\theta_{r3} - q_3) \cdot (\dot{\theta}_{r3} - \dot{q}_3) - K_{r4} \cdot (\theta_{r4} - q_4) \cdot (\dot{\theta}_{r4} - \dot{q}_4)$$

Puissance interne associée aux frottements :

La fonction dissipative est égale à la demi-puissance dissipée, soit :

$$P_f = -\frac{1}{2} (f_{v3} \cdot \dot{\theta}_{r3}^2 + f_{v4} \cdot \dot{\theta}_{r4}^2 + f_{a3} \cdot \dot{q}_3^2 + f_{a4} \cdot \dot{q}_4^2)$$

Puissance associée aux couples articulaires :

$$P_a = \tau_{a3} \cdot \dot{\theta}_{r3} + \tau_{a4} \cdot (\dot{\theta}_{r4} - \dot{q}_3)$$

### Question 22

$$E_c(S/O) = \frac{1}{2} \left[ (B_3 + m_3 \lambda_3^2) \dot{q}_3^2 + J_a \dot{\theta}_{r3}^2 + (B_4 + m_4 \lambda_4^2) (\dot{q}_3 + \dot{q}_4)^2 + m_4 l_3 \dot{q}_3^2 (l_3 + 2 \lambda_4 \cos q_4) + 2 m_4 l_3 \lambda_4 \cos q_4 \cdot \dot{q}_3 \cdot \dot{q}_4 \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_c(S/O)}{\partial q_4} &= -m_4 l_3 \lambda_4 \sin(q_4) \dot{q}_3 \cdot (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ \frac{\partial E_c(S/O)}{\partial \dot{q}_4} &= (B_4 + m_4 \lambda_4^2) (\dot{q}_3 + \dot{q}_4) + m_4 l_3 \lambda_4 \cos q_4 \cdot \dot{q}_3 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_c(S/O)}{\partial \dot{q}_4} \right) &= (B_4 + m_4 \lambda_4^2) (\ddot{q}_3 + \ddot{q}_4) + m_4 l_3 \lambda_4 \cos q_4 \cdot \ddot{q}_3 - m_4 l_3 \lambda_4 \sin q_4 \cdot \dot{q}_3 \cdot \dot{q}_4 \end{aligned}$$

Les coefficients énergétiques sont :

$$Q_{q_4} = \frac{\partial P^*}{\partial \dot{q}_4} = F_x \cdot l_4 \cdot \cos(q_3 + q_4) - F_z \cdot l_4 \cdot \sin(q_3 + q_4) + g \sin(q_3 + q_4) m_4 \lambda_4 + K_{r4} (\theta_{r4} - q_4) - f_{a4} \dot{q}_4$$

L'équation de Lagrange associée à l'angle  $q_4$  est :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_4} - \frac{\partial T}{\partial q_4} &= Q_{q_4} \\ (B_4 + m_4 \lambda_4^2) \cdot (\ddot{q}_3 + \ddot{q}_4) + m_4 l_3 \lambda_4 \cos q_4 \cdot \ddot{q}_3 + m_4 l_3 \lambda_4 \sin q_4 \cdot \dot{q}_3^2 \\ &= F_x \cdot l_4 \cdot \cos(q_3 + q_4) - F_z \cdot l_4 \cdot \sin(q_3 + q_4) + g \cdot \sin(q_3 + q_4) \cdot m_4 \lambda_4 + K_{r4} \cdot (\theta_{r4} - q_4) - f_{a4} \cdot \dot{q}_4 \end{aligned}$$

D'où :

$$F_x \cdot L_{4x}(q_3 + q_4) - F_z \cdot L_{4z}(q_3 + q_4) + \tau_{g4}(q_3 + q_4) = f_{a4} \cdot \dot{q}_4 + \tau_{r4} + K_{r4} \cdot (q_4 - \theta_{r4}) + J_{34} \cdot \ddot{q}_3 + J_4 \cdot \ddot{q}_4 + J_{34}(q_4, \dot{q}_3) \cdot \dot{q}_3$$

$$\begin{aligned} \text{Avec :} \quad L_{4x}(q_3, q_4) &= l_4 \cdot \cos(q_3 + q_4) ; & L_{4z}(q_3, q_4) &= -l_4 \cdot \sin(q_3 + q_4) ; \\ \tau_{g4}(q_3, q_4) &= g \cdot \sin(q_3 + q_4) \cdot m_4 \cdot \lambda_4 ; & J_{34}(q_4, \dot{q}_3) &= m_4 \cdot l_3 \cdot \lambda_4 \cdot \sin q_4 \cdot \dot{q}_3 ; \\ J_{34} &= B_4 + m_4 \cdot \lambda_4^2 + m_4 \cdot l_3 \cdot \lambda_4 \cdot \cos q_4 ; & J_4 &= (B_4 + m_4 \cdot \lambda_4^2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T(S/O)}{\partial \theta_{r4}} = 0$$

$$\frac{\partial T(S/O)}{\partial \theta_{r4}} = J_a \cdot \dot{\theta}_{r4} ; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_c(S/O)}{\partial \dot{\theta}_{r4}} \right) = J_a \cdot \ddot{\theta}_{r4}$$

$$Q_{\theta_{r4}} = \frac{\partial P^*}{\partial \dot{\theta}_{r4}} = -f_{v4} \dot{\theta}_{r4} + \tau_{a4} - K_{r4} (\theta_{r4} - q_4)$$

L'équation de Lagrange relative à  $\theta_{r4}$  est :

$$L_{\theta_{r4}} \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_c(S/O)}{\partial \dot{\theta}_{r4}} \right) - \frac{\partial E_c(S/O)}{\partial \theta_{r4}} = Q_{\theta_{r4}}$$

D'où :

$$J_a \cdot \ddot{\theta}_{r4} = K_{r4} \cdot (q_4 - \theta_{r4}) - f_{m4} \cdot \dot{\theta}_{r4} + \tau_{a4}$$

### Question 23

Les équations de Lagrange associées aux angles  $\theta_{r3}$  et  $q_3$  permettent d'obtenir 2 équations similaires, d'où les équations demandées. Le système composé de 4 équations peut alors être mis sous la forme proposée.

### Question 24

Dans le cas d'un robot à articulations rigides,  $\theta_r = q$  ;

L'équation 1+2 devient :  $\tau_a + \tau_{ext} = [J_a] \cdot \ddot{q} + [f_{va}] \cdot \dot{q} + [J_b(q)] \cdot \dot{q} + [C(q, \dot{q})] \cdot \dot{q} + \tau_g(q) + [f_v] \cdot \dot{q}$

Soit :  $J_{rig}(q) \cdot \ddot{q} + H(q, \dot{q}) = \tau + \tau_{ext}$  avec :

$$J_{rig}(q) = J_a + J_b(q) \quad \text{et} \quad C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + \tau_G(q) + \tau_f = H(q, \dot{q})$$

## Partie 5 - Synthèse d'une commande de détection

### Question 25

Pour un robot rigide,  $\tau_a = \widehat{J_{rig, \theta}} \cdot \ddot{q} + \widehat{H_\theta}$  car  $\widehat{J_{rig, \theta}} = J_{rig}(q)$  et  $\widehat{H_\theta} = H(q, \dot{q})$

Donc  $\ddot{q} = u$ .

Or, pour une articulation rigide  $q = \theta_r$ .

Donc  $\frac{\theta_r(p)}{U(p)} = \frac{1}{p^2}$  double intégrateur donc linéaire

### Question 26

L'équation (1)  $\tau_a = [J_a] \cdot \ddot{\theta}_r - [K] \cdot (q - \theta_r) + [f_{vm}] \cdot \dot{\theta}_r$  donne :

$$q = [K]^{-1} [J_a] \ddot{\theta}_r - [K]^{-1} \tau_a + \theta_r + [K]^{-1} [f_{vm}] \dot{\theta}_r$$

La commande compensée est :

$$\tau_a = \widehat{J_{rig,\theta}} \cdot u + \widehat{H_\theta}$$

D'où :

$$q = K^{-1} [J_a] \ddot{\theta}_r - K^{-1} \widehat{J_{rig,\theta}} u - K^{-1} \widehat{H_\theta} + \theta_r + K^{-1} f_{vm} \dot{\theta}_r$$

$$\dot{q} = K^{-1} [J_a] \dot{\theta}_r^{(3)} - K^{-1} \widehat{J_{rig,\theta}} \dot{u} - K^{-1} \dot{\widehat{J_{rig,\theta}}} u - K^{-1} \dot{\widehat{H_\theta}} + \dot{\theta}_r + K^{-1} f_{vm} \ddot{\theta}_r$$

$$\ddot{q} = K^{-1} [J_a] \ddot{\theta}_r^{(4)} - 2K^{-1} \dot{\widehat{J_{rig,\theta}}} \dot{u} - K^{-1} \widehat{J_{rig,\theta}} \ddot{u} - K^{-1} \ddot{\widehat{J_{rig,\theta}}}(q) u - K^{-1} \ddot{\widehat{H_\theta}} + \ddot{\theta}_r + K^{-1} f_{vm} \ddot{\theta}_r^{(3)}$$

L'équation (2)  $\tau_{ext} = 0 = [J_b(q)] \cdot \ddot{q} + [C(q, \dot{q})] \cdot \dot{q} + \tau_g(q) + [K] \cdot (q - \theta_r) + [f_{va}] \cdot \dot{q}$  devient :

$$0 = [J_b] \cdot \left( K^{-1} [J_a] \cdot \ddot{\theta}_r^{(4)} - 2 [K]^{-1} \dot{\widehat{J_{rig,\theta}}} \cdot \dot{u} - [K]^{-1} \widehat{J_{rig,\theta}} \cdot \ddot{u} - [K]^{-1} \ddot{\widehat{J_{rig,\theta}}} \cdot u - [K]^{-1} \cdot \ddot{\widehat{H_\theta}} + \ddot{\theta}_r + [K]^{-1} \cdot f_{vm} \cdot \ddot{\theta}_r^{(3)} \right)$$

$$+ C \cdot \dot{q} + \tau_g(q) + [K] \cdot \left( [K]^{-1} [J_a] \cdot \ddot{\theta}_r - [K]^{-1} \widehat{J_{rig,\theta}} u - [K]^{-1} \cdot \widehat{H_\theta} + \theta_r + [K]^{-1} \cdot [f_{vm}] \cdot \dot{\theta}_r \right) - K \cdot \theta_r$$

$$+ [f_{va}] \cdot \left( [K]^{-1} [J_a] \cdot \dot{\theta}_r^{(3)} - [K]^{-1} \cdot \dot{\widehat{J_{rig,\theta}}} \cdot \dot{u} - [K]^{-1} \cdot \widehat{J_{rig,\theta}} \cdot \dot{u} - [K]^{-1} \cdot \dot{\widehat{H_\theta}} + \dot{\theta}_r + [K]^{-1} \cdot [f_{vm}] \cdot \dot{\theta}_r \right)$$

D'où les expressions demandées.

### Question 27

On a :  $\theta_r = \theta_{r0} + \tilde{\theta}_r$ , et  $u = u_0 + \tilde{u}$

$$\tilde{\theta}_r^{(4)} + A_{30} \cdot \tilde{\theta}_r^{(3)} + A_{20} \cdot \ddot{\tilde{\theta}}_r + A_{10} \cdot \dot{\tilde{\theta}}_r = B_{20} \cdot \ddot{\tilde{u}} + B_{10} \cdot \dot{\tilde{u}} + B_{00} \cdot \tilde{u}$$

Soit  $G(p) = \frac{\theta_r(p)}{U(p)} = A^{-1}(p) \cdot B(p)$

Avec  $B(p) = (B_{00} + B_{10} \cdot p + B_{20} \cdot p^2)$  ;  $A(p) = (A_{10} \cdot p + A_{20} \cdot p^2 + A_{30} \cdot p^3 + I_4 \cdot p^4)$

### Question 28

Le modèle réduit à articulations flexibles montre une grande dispersion des modèles linéarisés en un point de fonctionnement. On observe que ces dispersions sont moindres avec la pré-compensation : celle-ci amoindrit les non-linéarités.

### Question 29

Chaque fonction  $G_{ij}(p)$  modélise la réponse en position de l'axe  $i$  pour une commande de l'axe  $j$ .

En hautes fréquences, on a bien un double intégrateur (-40 dB/décade) ; on observe l'effet des flexibilités couplées pour des fréquences situées entre 5 et 30 Hz.

Ces réponses expérimentales confirment le modèle théorique de la figure 29.

Les inerties et les raideurs varient avec la position.

### Question 30

Le résidu subit de fortes variations à cause des non linéarités, des frottements et des différentes flexibilités ; ces variations intempestives, étant du même ordre de grandeur que le résidu induit par la collision, rendent sa détection impossible.

### Question 31

Ce nouvel algorithme tient compte des flexibilités et des frottements pour déterminer un seuil dynamique prenant en compte ces phénomènes. Cette fois, les résidus induits par les flexibilités ne déclenchent plus d'alarme intempestive.

### Question 32

La détection de collision se fait par la détermination en temps réel du résidu, écart entre le couple moteur théorique et le couple moteur mesuré.

Un modèle doit donc être élaboré pour déterminer ce couple théorique en fonction des angles moteurs.



Un premier modèle à articulation rigide a été élaboré, mais n'est pas validé : des flexibilités sont induites essentiellement par l'allongement des câbles des actionneurs.

L'identification expérimentale des flexibilités et du frottement est nécessaire pour l'obtention des divers paramètres de ce modèle dynamique.

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

## 1. Présentation du sujet

Le sujet s'appuie sur un bras de robot, élément constitutif d'un robot collaboratif évoluant à proximité d'humains dans un environnement domestique. Dans cet environnement, le robot doit adopter un comportement à compliance élevée permettant d'assurer la sécurité des usagers. La commande du robot doit donc détecter avec la plus grande finesse toutes les situations imprévues gênant les mouvements du bras.

Les problématiques proposées visent à établir un modèle de comportement du bras de robot permettant à la commande de comparer en temps réel les couples théoriques attendus sur chaque articulation du bras aux couples mesurés sur les différentes motorisations embarquées.

Dans cette étude, la démarche d'élaboration du modèle proposée au candidat est progressive et permet de l'étudier selon différents niveaux de complexité en mobilisant principalement des compétences d'analyse, de modélisation et de communication.

La partie 1 du sujet permet de découvrir la structure matérielle du bras de robot étudié, de justifier les choix technologiques réalisés et d'établir les modèles géométriques. La partie 2 permet de déterminer les modèles articulaires et dynamiques dans l'hypothèse d'un robot à articulation rigide et de vérifier la validité de ces modèles. La partie 3 permet d'affiner les modèles articulaires et dynamiques en identifiant les origines des flexibilités. Cette partie analyse le comportement de la structure propre du bras puis du câble de l'actionneur, afin d'établir le modèle d'une articulation flexible. La partie 4 porte sur l'étude du modèle dynamique du bras de robot pour une structure flexible simplifiée à 2 degrés de liberté. Enfin, la partie 5, synthèse du sujet, permet d'analyser différentes méthodes de détection de collision.

## 2. Analyse globale des résultats

L'analyse de la structure matérielle du robot et l'étude des modèles de comportement à articulation rigide ont été traitées par une très grande majorité de candidats. La clarté des propos tenus, la rigueur dans la description des modèles demandés et l'utilisation de démarches de résolution adéquates ont permis à de nombreux candidats de tirer profit des questionnements proposés.

L'étude du modèle de comportement dynamique du bras de robot a permis à quelques 20 % des candidats de pleinement valoriser leur préparation au concours. Le jury recommande aux candidats de ne pas négliger ces points du programme pour lesquels la maîtrise des concepts est indispensable à ce niveau de recrutement.

Le jury note globalement un manque de persévérance dans le traitement et la résolution des problématiques proposées. Les candidats démontrant un bon esprit de synthèse et une rigueur scientifique et technologique dans la résolution de ces problématiques ont systématiquement été valorisés.

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

### *Partie 1 - Présentation du bras ASSIST et justification des choix technologiques réalisés*

Cette première partie aux candidats de restituer leur compréhension de solutions technologiques. Le jury attendait ici des réponses claires, précises, en utilisant un vocabulaire technique approprié. Trop de

candidats ont fait une simple énumération des caractéristiques cinématiques et dynamiques alors qu'il était attendu de cibler ces caractéristiques en rapport avec la problématique du sujet. Le schéma cinématique attendu nécessitait pour le candidat de choisir, pour cette modélisation, l'objectif pour conduire cette étude. La modélisation cinématique attendue abordait quant à elle la notion de point vue selon lequel on souhaite l'exploiter dans l'étude. Un trop grand nombre de candidats a proposé un modèle erroné et/ou entaché d'erreurs graves inacceptables à ce niveau de recrutement. Peu de candidats ont modélisé correctement la chaîne cinématique et mis en avant le couplage cinématique, alors qu'il s'agit d'une question classique pour une épreuve de spécialité IM.

Le jury recommande aux candidats de maîtriser parfaitement les techniques de modélisation cinématique et de paramétrage.

#### *Partie 2 - Validation de l'hypothèse « robot à articulation rigide »*

L'objectif était de modéliser le comportement cinématique et dynamique d'un axe, avec les hypothèses d'une articulation dite rigide. La modélisation cinématique n'a pas posé de problème particulier aux candidats. Cependant, trop de candidats n'ont pas su établir le modèle dynamique, pourtant classique dans ce cas.

Le jury recommande aux candidats d'améliorer leur maîtrise de la modélisation par schéma bloc. Sur la validité du modèle, les questions posées avaient pour but d'invalider l'hypothèse d'articulations rigides et de proposer une évolution du modèle de comportement. L'analyse a été globalement bien menée même si peu de candidats proposent finalement un modèle de comportement correct pour l'articulation.

#### *Partie 3 - Analyse des flexibilités*

L'objectif était de quantifier l'influence de la déformation de la structure. L'étude théorique a été dans l'ensemble correctement menée, mais peu de candidats ont comparé le résultat expérimental aux résultats de la simulation. Cette démarche de caractérisation des écarts est pourtant au cœur de la démarche de l'ingénieur.

Les flexibilités introduites par les câbles ont été abordées par peu de candidats. Les candidats, les ayant traitées, ont été valorisés.

Le reste de l'étude proposée n'a été que trop peu abordée. Il s'agissait, d'une part de modéliser le comportement flexible d'une articulation, et d'autre part de mettre en évidence les causes de non-linéarités. Si les candidats ont abouti pour la flexibilité, peu ont su prendre le recul nécessaire pour critiquer le modèle linéaire proposé.

#### *Partie 4 - Modèles articulaire et dynamique dans le cas d'une articulation flexible*

Cette partie, pourtant classique à ce niveau de concours a été mal traitée par les candidats. Le jury conseille aux candidats de parfaire leur maîtrise des méthodes d'analyse énergétique.

#### *Partie 5 - Synthèse d'une commande de détection*

L'objectif de la partie 5 était d'analyser le rôle des modèles définis dans la commande du robot et de valider l'efficacité de la commande. Les candidats ayant abordé les questions ont proposé des réponses cohérentes. Il était attendu de montrer sa capacité de synthèse.

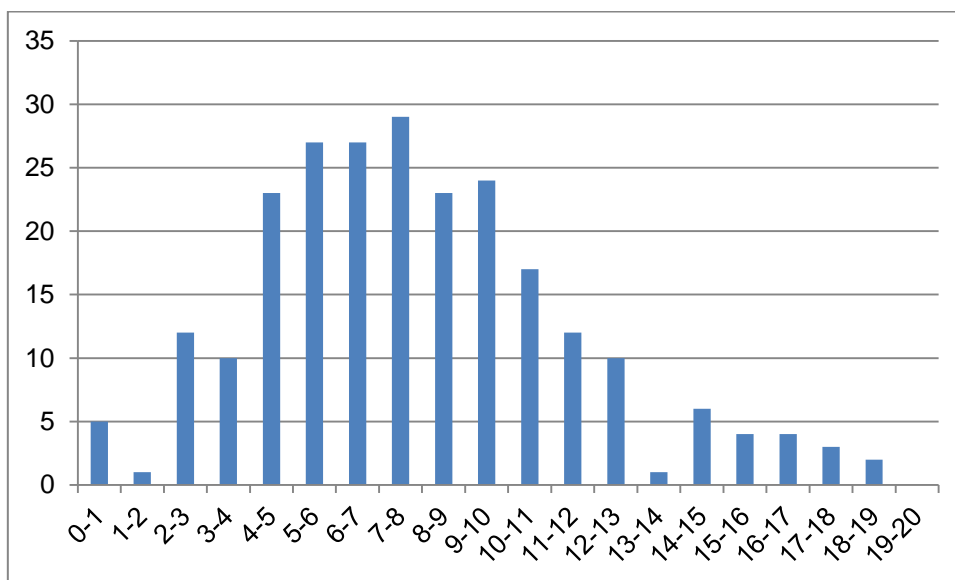
#### 4. Conclusion

Composer sur des sujets de concours, et en particulier à l'agrégation externe, nécessite indéniablement une réelle expertise disciplinaire. À cela, s'ajoutent les capacités à gérer son temps et à produire un discours d'une qualité rédactionnelle irréprochable. Le jury invite les candidats à prendre connaissance de l'arrêté du 1<sup>er</sup> juillet 2013 relatif au référentiel des compétences professionnelles des métiers du professorat et de l'éducation. La maîtrise de la langue française à des fins de communication est un des facteurs de réussite au concours. 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

240 copies ont été évaluées, dont 44 pour les candidats à l'agrégation marocaine. La moyenne des notes obtenues est 7,9/20 et l'écart-type est de 3,7 avec :

- 18,3 comme meilleure note ;
- 0 comme note la plus basse.



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

## Partie A – Étude de la remplisseuse (M2)

### Partie A1. Dimensionnement du poste de chargement des tubes vides

#### Question 1

Le cahier des charges impose que la course du système {manivelle (3) + bielle (4)} soit de 110 mm au minimum (figure a). La course du système réelle est de 120 mm (longueur de la manivelle de 60 mm). Le système permet donc un dégagement suffisant du système de positionnement.

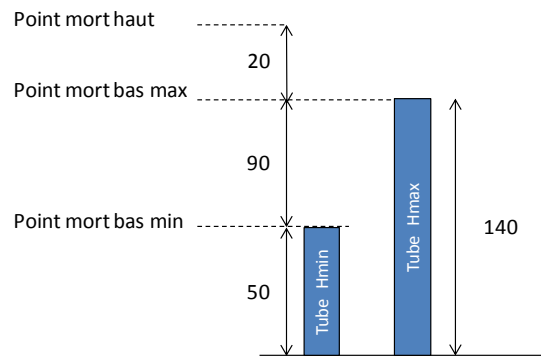


Figure a. Représentation du dégagement nécessaire

#### Question 2

La fermeture géométrique OAB donne :

$$\vec{OB} - \vec{OA} = \vec{AB} \Rightarrow z \cdot \vec{z}_0 - r \cdot \vec{z}_1 = L \cdot \vec{z}_2$$

Soit en élevant au carré :

$$z^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot z \cdot \vec{z}_0 \cdot \vec{z}_1 = L^2$$

$$z^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot z \cdot \cos \theta = L^2 \Rightarrow z = r \cdot \cos \theta + \sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2}$$

La condition de roulement sans glissement au contact des dents donne la relation suivante :

$$r_4 \cdot \Delta \beta = -r_1 \cdot \Delta \theta$$

Au vu de la position de référence du dispositif bielle-manivelle ( $\theta = 0^\circ$ ) et de la géométrie du secteur denté (4) qui autorise un débattement angulaire maximal de  $2 \cdot \beta_{\max}$  :

$$\Delta z = z_{\text{point mort haut}} - z_{\text{point mort bas}} = z_{(\theta=0)} - z_{(\theta=-2 \cdot \beta_{\max})}$$

$$\Delta z = [r + L] - \left[ r \cdot \cos \left( (2 \cdot \beta_{\max}) \cdot \frac{r_4}{r_1} \right) + \sqrt{L^2 - \left( r \cdot \sin \left( (2 \cdot \beta_{\max}) \cdot \frac{r_4}{r_1} \right) \right)^2} \right]$$

$$\Delta z = [60 + 120] - \left[ 60 \cdot \cos \left( (2 \cdot 40) \cdot \frac{75}{30} \right) + \sqrt{120^2 - \left( 60 \cdot \sin \left( (2 \cdot 40) \cdot \frac{75}{30} \right) \right)^2} \right] = 118,2 \text{ mm}$$

Le cahier des charges est donc respecté puisque le secteur denté permet d'obtenir une course de 118,2 mm pour une valeur minimale souhaitée de 110 mm.

### Question 3

La fréquence de rotation maximale de l'arbre à cames est de  $150 \cdot 8/11 = 109 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ . À chaque tour de came, un cycle de montée-descente du dispositif bielle-manivelle est effectué. Puisque les postes de travail sont dédoublés, la cadence du poste de travail n°1 est donc de :  $109 \cdot 2 = 218 \text{ tubes} \cdot \text{min}^{-1}$ . Le mécanisme utilisé permet donc de répondre à l'exigence Id 1.6 du cahier des charges qui impose une cadence de  $140 \text{ tubes} \cdot \text{min}^{-1}$ .

### Question 4

Détermination de l'énergie cinétique  $T_{\Sigma/0} = \sum_{i=1}^3 T_{i/0}$  de l'ensemble  $\Sigma\{1, 2, 3\}$  :

- $T_{1/0} = \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \dot{\theta}^2$  car solide en liaison pivot d'axe  $(O, \bar{x}_0)$  par rapport au bâti supposé galiléen ;
- $T_{2/0} = 0$  car on néglige la masse de (2) ;
- $T_{3/0} = \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot \dot{z}^2$  car solide en liaison glissière d'axe  $\bar{z}_0$  par rapport au bâti supposé galiléen.

D'après le résultat de la question 2 :

$$z = r \cdot \cos \theta + \sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2}$$

D'où :

$$\dot{z} = -r \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta - \frac{r^2 \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta}{\sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2}}$$

Soit :

$$T_{(1 \cup 2 \cup 3)/0} = \frac{1}{2} \cdot J_{\Sigma}(\theta) \cdot \dot{\theta}^2 = \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_3 \cdot \left( -r \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta - \frac{r^2 \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta}{\sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2}} \right)^2$$

$$J_{\Sigma}(\theta) = J_1 + m_3 \cdot (r \cdot \sin \theta)^2 \cdot \left( 1 + \frac{r \cdot \cos \theta}{\sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2}} \right)^2$$

La valeur maximale est définie pour :

$$\frac{d J_{\Sigma}(\theta)}{d \theta} = 0$$

$$\frac{d J_{\Sigma}(\theta)}{d \theta} = 2 \cdot m_3 \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot \left\{ \cos \theta \cdot \left( 1 + \frac{r \cdot \cos \theta}{\sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2}} \right) + \frac{r \cdot \sin^2 \theta \cdot (r^2 - L^2)}{(L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2)^{3/2}} \right\} \cdot \left( 1 + \frac{r \cdot \cos \theta}{\sqrt{L^2 - (r \cdot \sin \theta)^2}} \right)$$

La valeur maximale est alors de  $J_{\Sigma_{MAX}} = 11871 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$  pour une dérivée s'annulant pour  $\theta \approx -1,18 \text{ rad}$ . Une résolution à la calculatrice permet également d'arriver à ce résultat sans calculer la dérivée.

### Question 5

Par rapport à la question précédente, la démarche est une application du TEC à  $\Sigma = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  :

$$\frac{d T(\Sigma/0)}{dt} = \sum P_{ext} + \sum P_{int}$$

Énergie cinétique : le moment d'inertie du solide 6 autour de l'axe  $(O_6, \bar{z}_0)$  est noté  $J_6$  et le solide 5 est en translation suivant  $\bar{z}_0$  :

$$T(\Sigma/0) = \frac{1}{2} \cdot J_{\Sigma}(\theta) \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_5 \cdot (-L \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi)^2 + \frac{1}{2} \cdot J_6 \cdot \dot{\varphi}^2$$

Les autres énergies cinétiques sont supposées nulles.

Puissance interne : liaisons parfaites :  $P_{int}(i \leftrightarrow j) = 0$ .

### Puissances externes

- puissance exercée par le bâti supposé galiléen et liaisons parfaites :  $P_{ext}(0 \rightarrow i/0) = 0$  ;
- pesanteur sur piston :  $P_{ext}(g \rightarrow 3/0) = -m_3 \cdot g \cdot \dot{z}$  ;
- pesanteur sur vérin :  $P_{ext}(g \rightarrow 5/0) = m_5 \cdot g \cdot L \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi$  ;
- pesanteur sur levier :  $P_{ext}(g \rightarrow 6/0) = m_6 \cdot g \cdot \frac{L}{2} \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi$  ;
- puissances nulles : solides à masse négligée ou centre de gravité supposé fixe ;
- tube sur piston (3) : action supposée négligeable (action non fournie) ;
- galet (7) sur levier (6) :  $P_{ext}(7 \rightarrow 6/0) = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_E(7 \rightarrow 6) \\ \vec{0} \end{array} \right\}_E \otimes \left\{ \begin{array}{c} \vec{\Omega}(6/0) \\ \vec{V}(E \in 6/0) \end{array} \right\}_E$ .

$$P_{ext}(7 \rightarrow 6/0) = \vec{F}_E(7 \rightarrow 6) \cdot \vec{V}(E \in 6/0) = -\vec{F}_E(7 \rightarrow 6) \cdot \vec{z}_6 \cdot e \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi$$

Soit :

$$\frac{d\left(\frac{1}{2} \cdot J_\Sigma(\theta) \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_5 \cdot (-L \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi)^2 + \frac{1}{2} \cdot J_6 \cdot \dot{\varphi}^2\right)}{dt} = -m_3 \cdot g \cdot \dot{z} + m_5 \cdot g \cdot L \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi + m_6 \cdot g \cdot \frac{L}{2} \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi - \vec{F}_E(7 \rightarrow 6) \cdot \vec{z}_6 \cdot e \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi$$

Application du PFD au galet (7) au point E suivant  $\vec{z}_6$  : sa masse étant négligeable, le torseur dynamique du galet (7) par rapport au référentiel galiléen est nul.

$$\vec{F}_{F(8 \rightarrow 7)} \cdot \vec{z}_6 + \vec{F}_{E(6 \rightarrow 7)} \cdot \vec{z}_6 = 0$$

L'expression littérale de  $\vec{F}_{F(8 \rightarrow 7)} \cdot \vec{z}_6$  est déduite des deux équations obtenues ci-dessus.

### Question 6

Hypothèses concernant la géométrie des corps en contact :

- représentation locale des surfaces par des portions de cylindre, dont les axes sont parfaitement parallèles ;
- contact suivant une génératrice commune.

Hypothèses concernant les matériaux :

- corps homogènes et isotropes ;
- corps au comportement élastique linéaire.

Hypothèses concernant le chargement

- effort normal parfaitement réparti le long de la génératrice de contact (pas d'effet de bord) ;
- chargement purement normal (pas de frottement).

### Question 7

Pour déterminer si le contact entre le galet et la came s'effectue sur la piste intérieure (point F) ou extérieure (point F') de la came, il faut considérer les cinq configurations angulaires possibles du point de contact :

	$0 < \psi < 30^\circ$	$30 < \psi < 77^\circ$	$77 < \psi < 283^\circ$	$283 < \psi < 330^\circ$	$330 < \psi < 360^\circ$
Vitesse	positive	positive	0	négative	négative
Accélération	positive	négative	0	négative	positive
Mouvement du bras	vers le haut (direction $\vec{z}_0$ )	vers le haut (direction $\vec{z}_0$ )	immobile	vers le bas (direction $-\vec{z}_0$ )	vers le bas (direction $-\vec{z}_0$ )
Contact sur piste	extérieure	intérieure	intérieure	intérieure	extérieure

Il existe donc

- deux phases d'accélération (norme de la vitesse qui augmente) :
  - $0 < \psi < 30^\circ$  - contact sur piste extérieure ;
  - $283 < \psi < 330^\circ$  - contact sur piste intérieure ;
- deux phases de décélération (norme de la vitesse qui diminue) :
  - $30 < \psi < 77^\circ$  - contact sur piste intérieure ;
  - $330 < \psi < 360^\circ$  - contact sur piste extérieure ;
- une phase où l'accélération est nulle (norme de la vitesse constante) :
  - $77 < \psi < 283^\circ$  - contact sur piste intérieure.

Comme la came est symétrique et que les efforts fournis en phase d'accélération sont supérieurs à ceux obtenus en phase de décélération, le cas le plus critique est obtenu lors d'une phase d'accélération. Comme la piste intérieure est convexe (courbure positive), et que la piste extérieure est concave (courbure négative), la pression maximale sera obtenue sur la piste intérieure.

<p><b>Courbure positive</b></p> $\rho_{\max} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{q}{k_{\text{galet}} + k_{\text{came}}} \cdot \frac{R_{\text{galet}} + R_{\text{came}}}{R_{\text{galet}} \cdot R_{\text{came}}}}$		<p><b>Courbure négative</b></p> $\rho_{\max} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{q}{k_{\text{galet}} + k_{\text{came}}} \cdot \frac{R_{\text{galet}} - R_{\text{came}}}{R_{\text{galet}} \cdot R_{\text{came}}}}$
---	--	---

avec :

$$k_{\text{galet}} = \frac{1 - \nu_{\text{galet}}^2}{\pi \cdot E_{\text{galet}}} \qquad k_{\text{came}} = \frac{1 - \nu_{\text{came}}^2}{\pi \cdot E_{\text{came}}} \qquad q = \frac{F_n}{L}$$

Il n'y a donc plus qu'un cas à considérer :  $283 < \psi < 330^\circ$  .

Le rayon de courbure du galet étant constant, la pression est maximale quand le rayon de courbure de la came est minimal (courbure maximale).

Application numérique :

$\rho_{\text{came}} = 21,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$	$F_n = 2100 \text{ N}$
$R_{\text{came}} = 46 \text{ mm}$	$E_{\text{galet}} = E_{\text{came}} = 200 \text{ GPa}$
$R_{\text{galet}} = 8 \text{ mm}$	$\nu_{\text{galet}} = \nu_{\text{came}} = 0,3$
$L = 10 \text{ mm}$	

D'où :  $\rho_{\max} = 1040 \text{ MPa}$

### Question 8

Détermination de  $Z_{VM \max}$  selon le critère de Von Mises :

$$Z_{VM \max} = (0,195 + 2,470 \cdot \nu - 2,576 \cdot \nu^2) \quad \text{car } \nu > 0,194$$

$$Z = \frac{Z}{b} \quad \text{avec} \quad b = 2 \cdot \sqrt{(k_{\text{came}} + k_{\text{galet}}) \cdot q \cdot \frac{R_{\text{came}} \cdot R_{\text{galet}}}{R_{\text{came}} + R_{\text{galet}}}}$$

Application numérique :

$$b = 0,128 \text{ mm} \qquad Z_{VM \max} = 0,70 \text{ mm} \qquad Z_{VM \max} = 0,09 \text{ mm}$$

Détermination de  $\sigma_{\text{eq VM}}$  :

$$\sigma_{\text{eq VM}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}$$



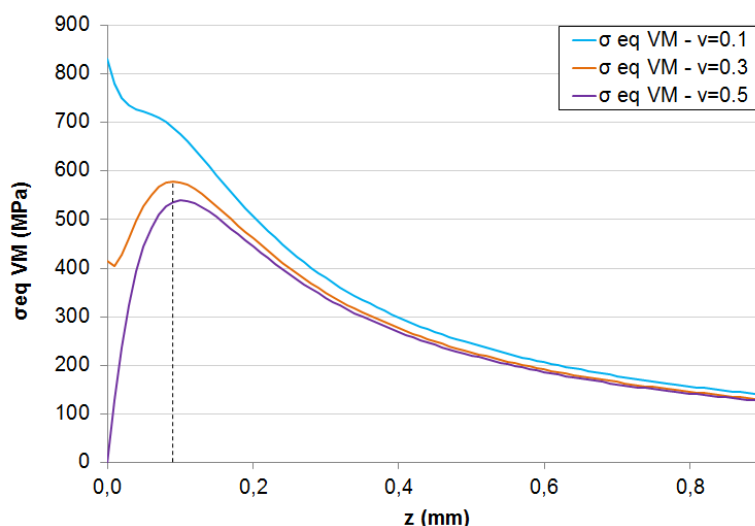


Figure b. Évolution de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de la profondeur

Application numérique :

En  $z = z_{VM \max} = 0,09 \text{ mm}$ , on a :  $\sigma_{xx} = -324 \text{ MPa}$        $\sigma_{yy} = -229 \text{ MPa}$        $\sigma_{zz} = -849 \text{ MPa}$

Soit  $\sigma_{eq \text{ VM } \max} = 580 \text{ MPa}$

Détermination de la valeur du  $R_{e \min}$  du matériau de la came selon le critère de Von Mises :

$$R_e \geq \sigma_{eq \text{ VM } \max}$$

$$R_e \geq 580 \text{ MPa}$$

### Question 9

La contrainte maximale de Von Mises est atteinte à 0,09 mm de profondeur et vaut 580 MPa. Au-delà de 1 mm de profondeur, elle chute à des valeurs inférieures à 120 MPa (figure b).

La résistance élastique d'un acier 18CrMo4 est d'environ 300 MPa (document technique DT3 - figure 1). Au regard de l'effort local appliqué sur la came, la nuance 18CrMo4 répond donc au cahier des charges en ce qui concerne la résistance élastique à cœur, mais pas à celle de surface.

### Question 10

Comme l'illustrent les figures 1 et 2 du document technique DT3, la résistance mécanique et la dureté d'un acier faiblement allié de la série 4100 augmentent quand sa résistance élastique augmente. Le traitement de cémentation proposé permet ainsi d'augmenter la dureté superficielle, mais également la résistance élastique et la résistance mécanique en surface, tout en conservant une ductilité et une ténacité intéressante à cœur.

La trempe à l'eau n'est pas réalisée directement à la suite du traitement de cémentation pour permettre de réaliser une reprise d'usinage de la came (opération de finition) entre le traitement de cémentation et le traitement de durcissement (austénitisation suivie de la trempe à l'eau).

Le revenu de détensionnement permet quant à lui d'adoucir la structure en relâchant les contraintes résiduelles dans le matériau, et améliorer ainsi la résistance aux chocs de la pièce.

### Question 11

Une trempe à l'eau sera réalisée après l'opération d'austénitisation. Conformément au diagramme TRC du 25CrMo4, la dureté de la martensite atteinte sera alors de 535 HV (document technique DT4, figure 2). Celle-ci est largement suffisante pour répondre au cahier des charges, même si la dureté chutera légèrement avec le détensionnement. Il faudra tout de même vérifier la pénétration de la trempe (essai Jominy). Une concentration de 0,25 % m de carbone à 1 mm de profondeur est donc visée.

Application numérique :

$$C_x = 0,25 \% \text{ m}$$

$$C_0 = 0,18 \% \text{ m}$$

$$C_s = 1 \% \text{ m}$$

$$T = 1173 \text{ °K}$$

$$D = 5,91 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$x = 10^{-3} \text{ m}$$

La durée de cémentation doit être de 8 h et 15 min.

### Question 12

Modélisation et hypothèses :

- le problème est ramené dans le plan  $R_6 = (O_6, \bar{x}_6, \bar{z}_6)$  ;
- le pivot d'axe  $(O_6, \bar{y}_0)$  entre le bras (6) et le bâti (0) est modélisé par une articulation ;
- la rotule de centre D avec le vérin (5) est modélisée par un appui simple (déplacement selon  $\bar{x}_6$  négligé devant celui suivant  $\bar{z}_6$ ) ;
- l'effort du galet sur le bras appliqué au point E est porté par  $\bar{z}_6$  tel que  $\bar{F}_{7 \rightarrow 8} = -2100 \cdot \bar{z}_6$  (cas le plus critique).

Le théorème du moment statique effectué sur le système {bras} au point  $O_6$  nous amène à l'expression suivante de l'effort appliqué au point D :

$$Z_D = \frac{F \cdot e}{L_6}$$

L'expression du moment fléchissant sur le bras (6) est présentée ci-dessous :

- sur la portion  $O_6E$

$$Mf_1 = F_{7 \rightarrow 8} \cdot \left( \frac{e}{L_6} - 1 \right) \cdot x$$

- sur la portion ED

$$Mf_2 = F_{7 \rightarrow 8} \cdot \left( \frac{x}{L_6} - 1 \right) \cdot e$$

Par conséquent, l'expression de la contrainte maximale dans le bras (point E) est la suivante :

$$\sigma_{\max} = \left| \frac{F_{7 \rightarrow 8}}{I_{Gy}} \cdot \left( \frac{e}{L_6} - 1 \right) \cdot \frac{e \cdot h}{2} \right|$$

### Question 13

Expression du moment quadratique  $I_{Gy}$  de la section ayant subi une homothétie, en fonction du moment quadratique de la section initiale  $I_{Gy0}$  :

$$I_{Gy0} = \iint_S z_0^2 \cdot dy_0 \cdot dz_0 \quad \text{et} \quad I_{Gy} = \iint_S z^2 \cdot dy \cdot dz$$

$$I_{Gy} = \iint_S \alpha^2 \cdot z_0^2 \cdot \alpha \cdot dy_0 \cdot \alpha \cdot dz_0$$

$$I_{Gy} = \alpha^4 \cdot I_{Gy0}$$

Expression de la contrainte normale maximale en fonction de la variable de conception :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{7 \rightarrow 8}}{\alpha^3 \cdot I_{Gy0}} \cdot \left( 1 - \frac{e}{L_6} \right) \cdot e \cdot \frac{h_0}{2}$$

### Question 14

Afin de répondre à la contrainte C1 :  $\sigma_{\max} = 0,8 \cdot \sigma_e$

$$\alpha = \left( \frac{F_{7 \rightarrow 8}}{0,8 \cdot \sigma_e \cdot I_{Gy0}} \cdot \left( 1 - \frac{e}{L_6} \right) \cdot e \cdot \frac{h_0}{2} \right)^{1/3}$$

### Question 15

$$m = \rho \cdot S \cdot L_6 \quad \text{donc} \quad m = \rho \cdot \alpha^2 \cdot S_0 \cdot L_6$$

$$m = \left[ \frac{1}{0,8} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \underbrace{\left[ S_0 \cdot L_6 \cdot \left( \frac{e}{I_{Gy0}} \cdot \left( 1 - \frac{e}{L_6} \right) \cdot \frac{h_0}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \right]}_{f_1} \cdot \underbrace{\left[ \frac{\rho}{\sigma_e^{\frac{2}{3}}} \right]}_{f_2} \cdot \underbrace{\left[ F_{7 \rightarrow 8} \right]^{\frac{2}{3}}}_{f_3}$$

L'indice de performance  $I$  à maximiser est donc :

$$I = \frac{\sigma_e^{\frac{2}{3}}}{\rho}$$

### Question 16

Tous les matériaux situés sur une même droite de pente 3/2 ont le même indice de performance. L'objectif consistant à maximiser cet indice, le polypropylène chargé à 30 % de fibres de verre est le matériau qui permet d'obtenir le meilleur compromis.

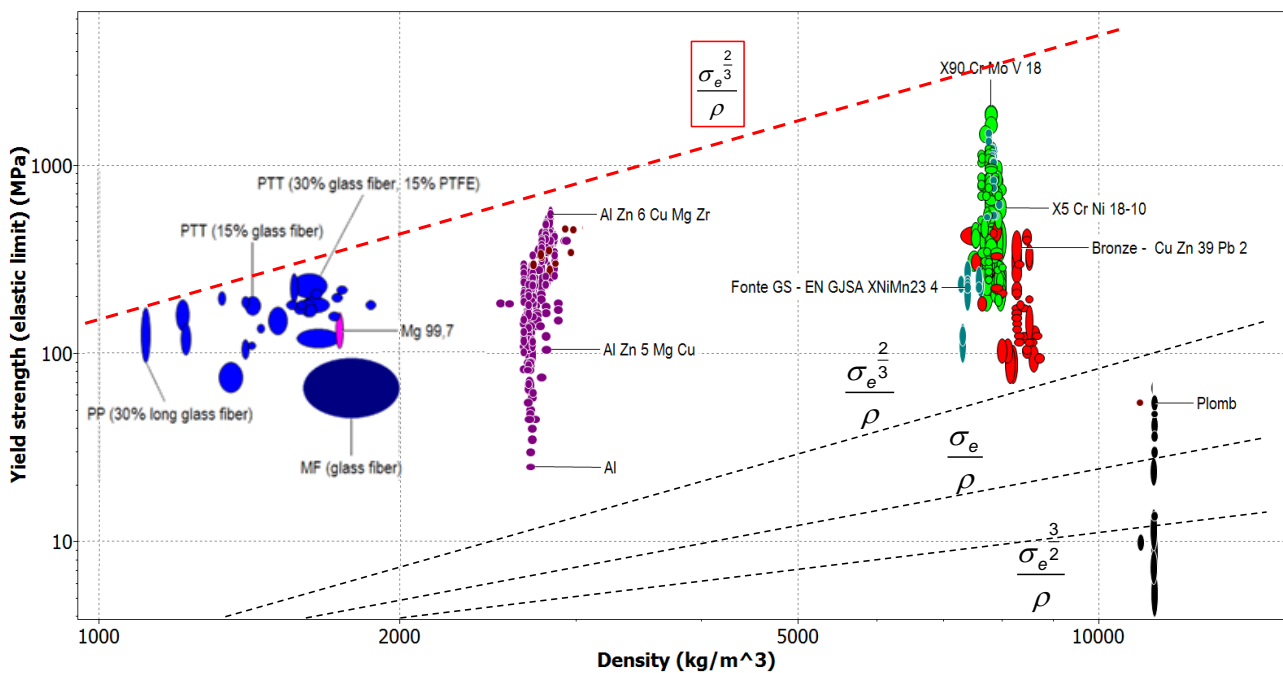


Figure d. Évolution de la résistance élastique  $\sigma_e$  en fonction de la masse volumique  $\rho$

### Partie A2. Étude du poste d'indexation en rotation des tubes

#### Question 17

Validation de la vitesse maximale du moteur : le cas le plus défavorable est celui où le repère est juste à côté du capteur optique dans le mauvais sens de rotation. Il faut alors réaliser un premier tour pour détecter le repère puis un second pour caler le tube, soit 2 tours complets en 0,3 s. Avec une accélération constante puis une décélération identique, nous avons :

$$\theta(t) = \frac{1}{2} \cdot \ddot{\theta}_{\min} \cdot t^2$$

D'où :

$$\ddot{\theta}_{\min} = \frac{2 \cdot (2 \cdot \pi)}{0,15^2} = 558 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\dot{\theta}(t) = \ddot{\theta}_{\min} \cdot t = 83,7 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} = 800 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$$

Compte tenu du rapport de transmission  $k$ , la fréquence de rotation minimale requise du moteur est de  $1173,3 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ . Le moteur choisi permet donc de répondre à la cadence souhaitée puisque sa fréquence maximale est de  $1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Validation du couple minimal à fournir par le moteur pour atteindre l'accélération minimale souhaitée :

- inertie équivalente de l'ensemble des pièces entraînées en rotation, ramenée à l'arbre moteur

$$\frac{1}{2} \cdot J_{eq} \cdot \omega_m^2 = \Sigma T_{(i/0)} = \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \omega_m^2 + \frac{1}{2} \cdot (J_2 + J_{34} + J_5) \cdot \dot{\theta}^2$$

Soit, en introduisant le rapport de transmission du train d'engrenages

$$J_{eq} = J_1 + k^2 \cdot (J_2 + J_{34} + J_5)$$

- théorème de l'énergie cinétique (hypothèses : liaisons parfaites, toutes charges résistantes négligées)

$$\frac{d\left(\frac{1}{2} \cdot J_{eq} \cdot \omega_m^2\right)}{dt} = C_m \cdot \omega_m \quad \Rightarrow \quad C_m = J_{eq} \cdot \frac{d\omega_m}{dt}$$

En utilisant les résultats précédents, nous obtenons :  $C_m = J_{eq} \cdot \frac{\ddot{\theta}}{k}$ .

Application numérique :

$$C_m = \left[ \frac{J_1}{k} + k \cdot (J_2 + J_{34} + J_5) \right] \cdot \ddot{\theta}_{\min}$$

$$C_m = \left[ \frac{4,4 \cdot 10^{-4} \cdot 40}{30} + \frac{30}{40} \cdot (7 + 2,33 + 0,17) \cdot 10^{-4} \right] \cdot 558$$

$$C_m = 0,72 \text{ N} \cdot \text{m}$$

L'accélération minimale à atteindre pour satisfaire la cadence peut être atteinte grâce au couple moteur maximal déployé de  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ , supérieur au  $0,72 \text{ N} \cdot \text{m}$  minimal requis.

### Question 18

Une étude de dynamique permet de déterminer le couple à transmettre.

Hypothèse : le moment suivant  $\vec{Z}_0$  exercé par la butée sur le tube est négligé.

Théorème des moments dynamiques suivant l'axe de rotation par rapport au bâti :  $C_{23} = J_{23} \cdot \ddot{\theta}$ .

On note  $f$  le coefficient d'adhérence entre le plateau (2) et le support (4), et  $F_a$  l'effort appliqué par (2) sur (4). En supposant que le contact est plan sur un disque de rayon extérieur  $r_{\text{ext}} = 31 \text{ mm}$ , de rayon intérieur  $5 \leq r_{\text{int}} \leq 20 \text{ mm}$  (cahier des charges), et que la pression de contact est uniforme, le couple transmissible sans glissement est défini par l'expression :

$$C_{\text{transmis}} = \frac{2}{3} \cdot f \cdot \frac{r_{\text{ext}}^3 - r_{\text{int}}^3}{r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2} \cdot F_a$$

L'effort  $F_a$  correspond au poids de l'ensemble (3+4) auquel on ajoute l'effort de compression sur le tube. L'effort de compression sur le tube correspond à l'action du ressort et du poids de (5) sur le tube (3). Le système {3+4+5} est isolé.

Le frottement limite est donné par la relation :

$$\frac{2}{3} \cdot f \cdot \frac{r_{\text{ext}}^3 - r_{\text{int}}^3}{r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2} \cdot (m_{34} \cdot g + F_{\text{compression}}) = (J_{34} + J_5) \cdot \ddot{\theta}_{\min}$$

$$f = \frac{3}{2} \cdot \frac{(J_{34} + J_5) \cdot \ddot{\theta}_{\min}}{\frac{r_{\text{ext}}^3 - r_{\text{int}}^3}{r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2} \cdot (m_{34} \cdot g + F_{\text{compression}})}$$

La masse du tube, vide à ce moment du cycle, est négligée.

La masse du support (4) est définie par :

$$m_4 = \rho_4 \cdot \left[ \left( \frac{55 \cdot \Pi \cdot \frac{72,5^2 + 62^2 + 72,5 \cdot 62}{4}}{\text{Cone tronque}} \right) + \left( \frac{44 \cdot \Pi \cdot 45^2}{4} \right) - \left( \frac{99 \cdot \Pi \cdot r_{int}^2}{\text{perçage passage tube}} \right) \right] \quad m_4 \in [223g; 418g]$$

Soit :  $0,73 \leq f \leq 0,75$ .

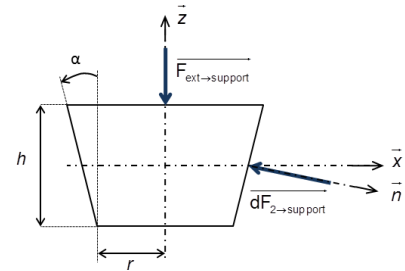
Ce coefficient d'adhérence est très élevé et donc peu envisageable. Il faudrait de plus prévoir un centrage du support.

### Question 19

Projection sur  $\vec{z}$  des efforts :

$$F_{ext \rightarrow sup port} = \int dF = \sin \alpha \cdot \int dF_{2 \rightarrow sup port} = \sin \alpha \cdot \int_{\theta=0}^{3 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{18}} \int_{r=r_{min}}^{r_{max}} p \cdot \frac{r}{\sin \alpha} \cdot d\theta \cdot dr$$

$$F_{ext \rightarrow sup port} = 3 \cdot \frac{\pi}{18} \cdot p \cdot (r_{max}^2 - r_{min}^2)$$



Expression littérale de la pression de contact :

$$p = \frac{6 \cdot (m_{34} \cdot g + F_{compression})}{\pi \cdot (r_{max}^2 - r_{min}^2)}$$

Expression littérale du couple transmissible :

$$dC_{transmis} = f \cdot r \cdot dF_{2 \rightarrow sup port} = f \cdot p \cdot \int_{\theta=0}^{3 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{18}} \int_{r=r_{min}}^{r_{max}} \frac{r^2}{\sin \alpha} \cdot d\theta \cdot dr$$

$$C_{transmis} = \frac{2}{3} \cdot f \cdot \frac{(m_{34} \cdot g + F_{compression})}{\sin \alpha} \cdot \frac{r_{max}^3 - r_{min}^3}{r_{max}^2 - r_{min}^2}$$

avec  $r_{min} = r = 31 mm$  et  $r_{max} = r + h \cdot \tan \alpha = 31,57 mm$

En reprenant l'expression du couple transmis de la question précédente, l'expression littérale du coefficient de frottement minimal pour accélérer l'ensemble {3+4+5} donne :

$$f_{min} = \frac{3}{2} \cdot \frac{(J_{34} + J_5) \cdot \sin \alpha}{(m_{34} \cdot g + F_{compression})} \cdot \frac{r_{max}^2 - r_{min}^2}{r_{max}^3 - r_{min}^3} \cdot \ddot{\theta}_{min} \quad \text{soit} \quad 0,046 \leq f_{min} \leq 0,059$$

Ce type de coefficient de frottement est tout à fait envisageable. L'emmanchement conique assurera donc le maintien en position du support afin de garantir l'indexation du tube.

## Partie B – Étude du robot de transfert (M3)

### Partie B1. Dimensionnement des actionneurs

#### Question 20

Par définition :  $\vec{OP} = Y_p \cdot \vec{y}_0 + Z_p \cdot \vec{z}_0 = L_1 \cdot \vec{y}_1 + L_2 \cdot \vec{y}_2 - H_4 \cdot \vec{z}_0$

Par projection, il vient alors :

- sur  $\vec{y}_0$ ,  $Y_p = L_1 \cdot \cos \theta_1 + L_2 \cdot \cos \theta_2$  ;
- sur  $\vec{z}_0$ ,  $Z_p = L_1 \cdot \sin \theta_1 + L_2 \cdot \sin \theta_2$ .

Résolution du système avec  $Z_p = 0$ , en élevant au carré :

$$L_1^2 = (Y_p - L_2 \cdot \cos \theta_2)^2 + (H_4 - L_2 \cdot \sin \theta_2)^2$$

Une résolution de cette équation permet d'obtenir  $\theta_2$  et de le réinjecter dans le système d'équations afin d'obtenir  $\theta_1$ . Compte tenu des dimensions :

	Prise	Dépose 1	Dépose 2
$Y_P$ (mm)	560	190	340
$\theta_1$ (°)	45,8	112,1	82,6
$\theta_2$ (°)	-15,6	-27,5	-31,4

Les valeurs sont comprises dans les plages de variations des angles ( $40^\circ \leq \theta_1 \leq 115^\circ$  et  $-35^\circ \leq \theta_2 \leq 10^\circ$ ). Le robot de transfert est donc capable de prélever et de déposer les tubes sur les emplacements définis.

### Question 21

Le convoyeur doit avancer de 150 mm toutes les 857 ms (cadence de  $140 \text{ tubes} \cdot \text{min}^{-1}$  et dépose simultanée de deux tubes). La vitesse moyenne de défilement du convoyeur n°2 en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  est donc  $\dot{Y}_P = -0,175 \cdot \dot{y}_0$ .

Par dérivation du système d'équations :

$$\begin{aligned} - \quad \dot{Y}_P &= -L_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin \theta_1 - L_2 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin \theta_2 \\ - \quad 0 &= L_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos \theta_1 + L_2 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos \theta_2 \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{aligned} - \quad \dot{\theta}_1 &= \frac{\dot{Y}_P}{L_1 \cdot (\cos \theta_1 \cdot \tan \theta_2 - \sin \theta_1)} \\ - \quad \dot{\theta}_2 &= \frac{\dot{Y}_P}{L_2 \cdot (\cos \theta_2 \cdot \tan \theta_1 - \sin \theta_2)} \end{aligned}$$

La résolution du système dans la zone de prise donne :  $\dot{\theta}_1 = 0,60 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  ;  $\dot{\theta}_2 = -0,40 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Dans la zone de transfert, les vitesses de rotation sont :  $\dot{\theta}_1 = 6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  ;  $\dot{\theta}_2 = -4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

En prenant en compte le réducteur de rapport 1/70, on obtient les plages de variation suivantes :  $42 \leq \dot{\theta}_1 \leq 420 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $-278 \leq \dot{\theta}_2 \leq -27,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ . La capacité des moteurs est validée puisque leur fréquence maximale de rotation est de  $524 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Question 22

La période nécessaire pour réaliser un cycle complet (étape 1 à étape 3) est de  $2,1 - 0,4 = 1,7 \text{ s}$ . Quatre tubes étant saisis à chaque cycle, la cadence atteinte par le robot de transfert est de  $141 \text{ tubes} \cdot \text{min}^{-1}$ . Puisque la cadence imposée par le CdC est de  $140 \text{ tubes} \cdot \text{min}^{-1}$ , le robot est capable de répondre à cette exigence.

### Question 23

L'effort de préhension d'une ventouse sur le tube est donné par l'expression (PFD) :

$$\begin{aligned} \vec{F}_{4 \rightarrow \text{tube}} + m_{\text{tube}} \cdot \vec{g} &= m_{\text{tube}} \cdot \vec{\Gamma}_{P \in 4/0} \\ m_{\text{tube}} &= \frac{\vec{F}_{4 \rightarrow \text{tube}}}{(\vec{\Gamma}_{P \in 4/0} - \vec{g})} = \frac{p \cdot S}{\vec{\Gamma}_{P \in 4/0} \cdot \vec{z}_0 + g} \end{aligned}$$

Le cas le plus contraignant est celui de l'accélération maximale positive :

$$m_{\text{tube}} = \frac{0,2 \cdot 10^5 \cdot \Pi \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2}{(20 + 9,81)} \cdot 10^3 \approx 19 \text{ g}$$

Il y a un risque de non préhension concernant les tubes de masse maximale (20 g). Dans cette configuration, la section des ventouses et/ou la dépression devront être augmentée, le profil d'accélération pourra également être modifié.

**Partie B2. Conformité de la cotation fonctionnelle au vu de la précision exigée sur le positionnement des tubes**

**Question 24**

Le triangle de renvoi est une pièce maîtresse du robot puisqu'elle assure la jonction entre ses différents parallélogrammes, au travers de 3 liaisons pivots d'axe (A,  $\overline{x_0}$ ), (D,  $\overline{x_0}$ ) et (E,  $\overline{x_0}$ ). La position et l'orientation de ces trois axes les uns par rapport aux autres sont donc primordiales pour garantir la position, mais surtout la verticalité de la tête de préhension. Il est donc nécessaire d'assurer la mise en position :

- MIP1 du triangle de renvoi (3) par rapport au bras primaire (1) ;
- MIP2 des tirants secondaire (7) et supérieur (6) par rapport au triangle de renvoi (3).

Le triangle de renvoi (3) est positionné par rapport au bras primaire (1) par l'intermédiaire de deux roulements (MIP1). Les références A et B correspondent aux axes respectifs des surfaces cylindriques permettant d'accueillir ces deux roulements. Ces derniers sont montés glissants sur la bague extérieure ce qui explique les tolérances dimensionnelles utilisées (correspondant à des ajustements de type H7). Une référence commune A-B est utilisée pour prendre en compte l'axe commun de ces deux cylindres, intervenant dans la localisation de la liaison pivot d'axe (A,  $\overline{x_0}$ ). Les axes des deux autres liaisons pivots doivent ensuite être positionnés par rapport à cette référence (MIP2) :

- comme l'illustre la figure 22, un axe permet d'assurer la liaison pivot d'axe (E,  $\overline{x_0}$ ) avec le tirant secondaire (7). Sa mise en position par rapport au triangle de renvoi (3) est assurée par un centrage court sur la surface cylindrique de  $\varnothing 10$  mm; d'où le choix de la référence C. Une cote de 90 mm permet de positionner cette référence C par rapport à la référence commune A-B ;
- de la même façon, un axe permet d'assurer la liaison pivot d'axe (D,  $\overline{x_0}$ ) avec le tirant supérieur (6). Sa mise en position par rapport au triangle de renvoi (3) est assurée par un centrage court sur la surface cylindrique de  $\varnothing 10$  mm. La spécification 2 permet de localiser l'axe de cette surface par rapport à la référence commune A-B et la référence C (côte de 50 mm et angle de  $85^\circ$ ).

**Question 25** : cf. document réponse DR1.

**Question 26**

La figure f représente le positionnement des roulements (11) et (12) dans les alésages de  $\varnothing 30^{+21}_0 \mu\text{m}$  du triangle de renvoi (3).

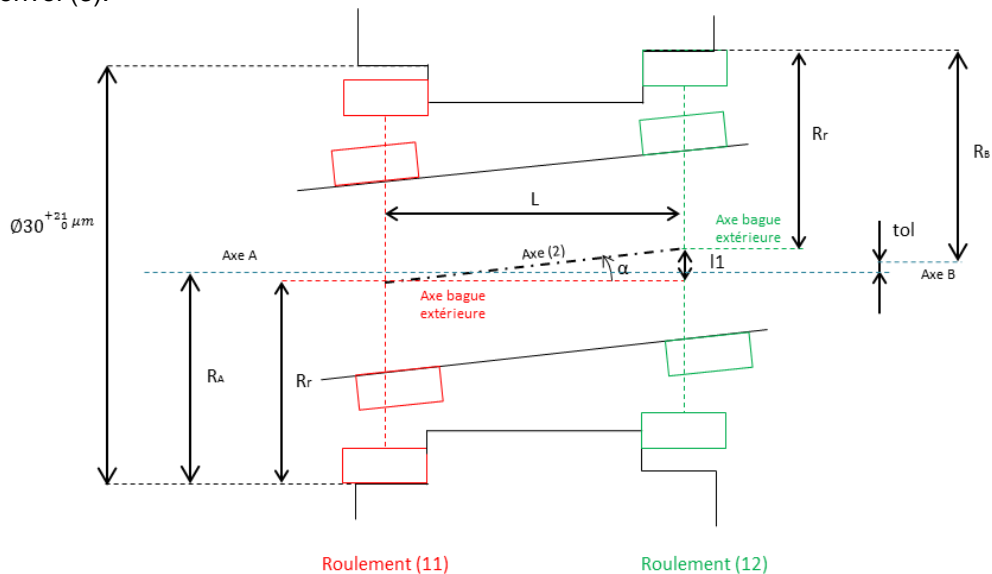


Figure f. Chaîne de côtes pour le montage des roulements

$R_r$  correspond au rayon des roulements,  $\alpha$  à leur angle de rotulage,  $l_1$  au désalignement entre les deux roulements,  $tol$  au défaut de coaxialité entre les deux alésages de  $\varnothing 30_{0}^{+0.021} \mu\text{m}$ ,  $R_A$  et  $R_B$  au rayon des alésages référencés A et B.

La zone de tolérance associée au défaut maximal de coaxialité autorisé est de  $\varnothing 0,05 \text{ mm}$ . La valeur de  $tol_{\text{max}}$  est donc de  $0,025 \text{ mm}$ .

Pour réussir à monter le second roulement dans les meilleures conditions, on utilise le jeu minimal offert entre le roulement et l'alésage (plus grand des roulements et plus petit des alésages) pour récupérer partiellement le défaut de coaxialité (considéré ici comme maximal) et ainsi tendre à réaligner les deux roulements ( $\alpha_{\text{max}}$  autorisé) :

$$tol_{\text{max}} = l_{\text{max}} + (R_{A \text{ min}} + R_{B \text{ min}} - R_{r \text{ max}} - R_{r \text{ max}})$$

Or 
$$\alpha_{\text{max}} = \arctan\left(\frac{l_{\text{max}}}{L_{\text{min}}}\right)$$

D'où 
$$\alpha_{\text{max}} = \arctan\left(\frac{tol_{\text{max}} - R_{A \text{ min}} - R_{B \text{ min}} + R_{r \text{ max}} + R_{r \text{ max}}}{L_{\text{min}}}\right)$$

$$\alpha_{\text{max}} = \arctan\left(\frac{0,025 - 15 - 15 + 14,9965 + 14,9965}{20,9 - 8,1 \cdot 2 + 3,97 \cdot 2}\right)$$

D'où  $\alpha_{\text{max}} \geq 0,082^\circ$  soit 4,9 minutes d'angle

La tolérance associée à la spécification n°1 est donc suffisante puisque les roulements autorisent un angle de rotulage de 10 minutes d'angle.

### Question 27

Positionnement de la pièce : la pièce doit être orientée de façon à ce que la référence D soit globalement perpendiculaire au marbre, et suffisamment dégagée de ce dernier pour ainsi permettre l'accès à l'ensemble des éléments tolérancés et des éléments de référence (opérations de palpage).

Gamme de contrôle pour les spécifications 1 et 2

- 1- palpage de la surface réputée cylindrique A : 12 points (sur 3 niveaux, 2 aux extrémités et 1 central) ;
- 2- palpage de la surface réputée cylindrique B : 12 points (sur 3 niveaux, 2 aux extrémités et 1 central) ;
- 3- palpage de la surface réputée cylindrique C : 12 points (sur 3 niveaux, 2 aux extrémités et 1 central) ;
- 4- palpage de la surface réputée cylindrique de  $\varnothing 10 \text{ mm}$  (spécification 2) : 12 points (sur 3 niveaux, 2 aux extrémités et 1 central) ;
- 5- palpage de la surface réputée plane D : 8 points ;
- 6- construction du cylindre des moindres carrés tangent extérieur matière associé au nuage de points issus du palpage 1 : récupération de l'axe A (référence spécifiée A) ;
- 7- construction du cylindre des moindres carrés tangent extérieur matière associé aux nuages de points issus du palpage 1 et 2 : récupération de l'axe AB (référence spécifiée A-B) ;
- 8- construction du cylindre, d'axe parallèle à la référence spécifiée A-B, tangent extérieur matière, distant de 90 mm de cette même référence, et minimisant la somme des écarts au carré par rapport au nuage de points issu du palpage 3 : récupération de l'axe C (référence spécifiée C) ;
- 9- construction du plan contenant les axes construits aux étapes 7 et 8 : plan ABC ;
- 10- construction du plan contenant l'axe AB et orienté de  $85^\circ$  par rapport au plan ABC : plan ABD ;
- 11- construction de l'axe parallèle à la référence spécifiée A-B, distant de 50 mm de cette référence, et appartenant au plan ABD : axe E.

### Spécification 1

- 12- construction du cylindre des moindres carrés associé au nuage de points de l'étape 2, tangent extérieur matière, et minimisant la somme des écarts au carré : récupération de son axe (Axe 1) ;

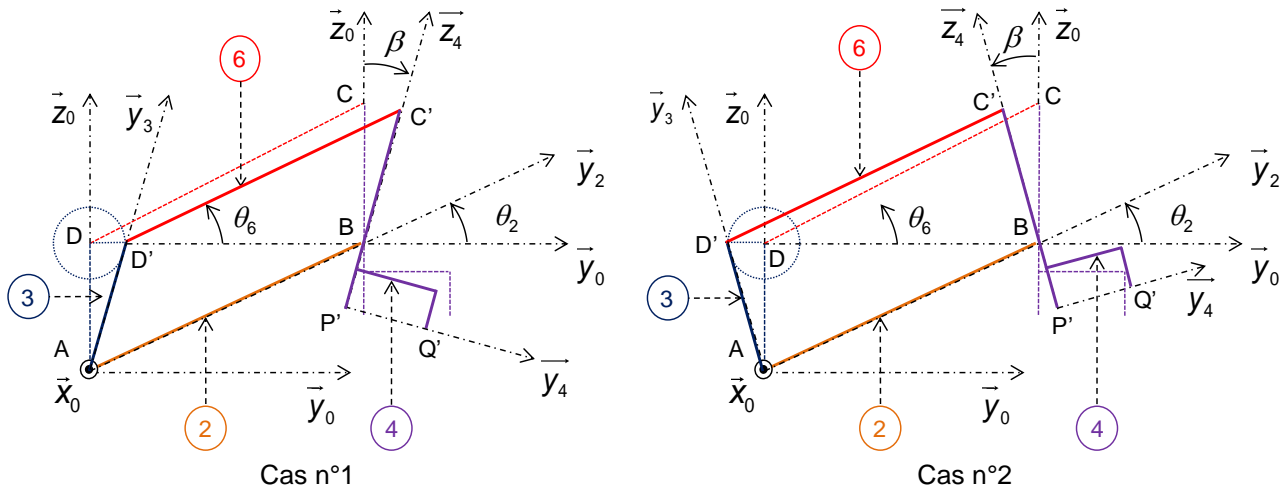


- 13- projection des points palpés à l'étape 2 sur l'Axe 1 (projection normale à l'Axe 1) : P1 à P12 ;
- 14- détermination des points les plus éloignés parmi les points P1 à P12 : récupération de deux points (P13 et P14) ;
- 15- calcul des distances respectives entre l'Axe A et ces deux points (P13 et P14). CONFORMITE : si quel que soit  $1 \leq i \leq 2$ ,  $d_i \leq 0,025$  mm .

**Spécification 2**

- 16- construction du cylindre des moindres carrés associé au nuage de points de l'étape 4, tangent extérieur matière, et minimisant la somme des écarts au carré : récupération de son axe (Axe2) ;
- 17- construction du plan perpendiculaire à l'Axe 2, et tangent extérieur matière au nuage de points palpé à l'étape 5 : plan 1 ;
- 18- construction d'un plan parallèle à plan 1 et distant de 25 mm : plan 2 ;
- 19- construction du point d'intersection entre l'Axe 2 et le plan 1 : P15 ;
- 20- construction du point d'intersection entre l'Axe 2 et le plan 2 : P16 ;
- 21- calcul des distances respectives entre l'Axe E et ces deux points (P15 et P16). Conformité : si quel que soit  $1 \leq i \leq 2$ ,  $d_i \leq 0,05$  mm .

**Question 28**



Fermeture de la boucle AD'C'BA

	Cas n°1	Cas n°2
sur $\vec{y}_0$	$\frac{0,1}{2} + L_6 \cdot \cos \theta_6 - L_4 \cdot \sin \beta - L_2 \cdot \cos \theta_2 = 0$	$-\frac{0,1}{2} + L_6 \cdot \cos \theta_6 - L_4 \cdot \sin \beta - L_2 \cdot \cos \theta_2 = 0$
sur $\vec{z}_0$	$50 + L_6 \cdot \sin \theta_6 - L_4 \cdot \cos \beta - L_2 \cdot \sin \theta_2 = 0$	$50 + L_6 \cdot \sin \theta_6 - L_4 \cdot \cos \beta - L_2 \cdot \sin \theta_2 = 0$

La résolution du système de 2 équations à 2 inconnues ( $\beta$  et  $\theta_6$ ) dans la zone de dépose n°2 ( $\theta_2 = -31^\circ$ ) fournit  $\beta = 0,057^\circ$  dans le cas n°1, et  $\beta = -0,057^\circ$  dans le cas n°2.

Erreur de positionnement (fermeture de la boucle BPP')

	Cas n°1	Cas n°2
$\overline{PP'}$	$-H_4 \cdot \sin \beta \cdot \vec{y}_0 + H_4 \cdot (1 - \cos \beta) \cdot \vec{z}_0$	$H_4 \cdot \sin \beta \cdot \vec{y}_0 + H_4 \cdot (1 - \cos \beta) \cdot \vec{z}_0$
$\overline{PP'}$	$-0,135 \cdot \vec{y}_0 + 6,75 \cdot 10^{-5} \cdot \vec{z}_0$	$0,135 \cdot \vec{y}_0 + 6,75 \cdot 10^{-5} \cdot \vec{z}_0$

Dans le cas le plus défavorable de la position du point D sur le triangle de renvoi, les tubes seront positionnés sur le convoyeur n°3 avec un décalage maximal de  $\pm 0,135$  mm sur la direction  $\vec{y}_0$ . Le décalage selon la direction  $\vec{z}_0$  est totalement négligeable.

### Question 29

La chaîne globale doit être considérée pour déterminer l'erreur de positionnement maximale :

$$\begin{aligned}\overline{OP'} &= \overline{OA'} + \overline{A'B'} + \overline{B'P'} \\ &= \left( L_1' \cdot \cos \theta_1 + L_2' \cdot \cos \theta_2 - H_4' \cdot \sin \beta \right) \cdot \overline{y_0} + \left( L_1' \cdot \sin \theta_1 + L_2' \cdot \sin \theta_2 - H_4' \cdot \cos \beta \right) \cdot \overline{z_0}\end{aligned}$$

Avec :  $L_{i \min} \leq L_i' \leq L_{i \max}$  et  $H_{i \min} \leq H_i' \leq H_{i \max}$

D'où :

$$\overline{PP'} = \left( (L_1' - L_1) \cdot \cos \theta_1 + (L_2' - L_2) \cdot \cos \theta_2 - H_4' \cdot \sin \beta \right) \cdot \overline{y_0} + \left( (L_1' - L_1) \cdot \sin \theta_1 + (L_2' - L_2) \cdot \sin \theta_2 - H_4' \cdot \cos \beta + H_4 \right) \cdot \overline{z_0}$$

$$\overline{PP'} \cdot \overline{y_0} = (L_1' - L_1) \cdot \cos \theta_1 + (L_2' - L_2) \cdot \cos \theta_2 - H_4' \cdot \sin \beta$$

$$\overline{PP'} \cdot \overline{z_0} = (L_1' - L_1) \cdot \sin \theta_1 + (L_2' - L_2) \cdot \sin \theta_2 - H_4' \cdot \cos \beta + H_4$$

Erreur maximale sur  $\overline{y_0}$  :

$$\Delta y_{\max} = 0,2 \cdot \cos \theta_1 + 0,2 \cdot \cos \theta_2 - 135,2 \cdot \sin \beta = 1,93 \quad \text{quand } L_1 = 320,2 \text{ mm et } H = 135,2 \text{ mm}$$

$$\Delta z = 0,2 \cdot \sin \theta_1 + 0,2 \cdot \sin \theta_2 - 135,2 \cdot \cos \beta + 135 = -0,09$$

Erreur maximale sur  $\overline{z_0}$  :

$$\Delta z_1 = 0,2 \cdot \sin \theta_1 + 0,2 \cdot \sin \theta_2 - 134,8 \cdot \cos \beta + 135 = 0,31 \quad \text{quand } L_1 = 320,2 \text{ mm et } H = 134,8 \text{ mm}$$

$$\Delta z_2 = -0,2 \cdot \sin \theta_1 + 0,2 \cdot \sin \theta_2 - 135,2 \cdot \cos \beta + 135 = -0,49 \quad \text{quand } L_1 = 319,8 \text{ mm et } H = 135,2 \text{ mm}$$

$$\Delta z_{\max} = -0,49$$

$$\Delta y = -0,2 \cdot \cos \theta_1 + 0,2 \cdot \cos \theta_2 - 135,2 \cdot \sin \beta = 1,88$$

Le décalage du point de dépose est essentiellement dû aux tolérances dimensionnelles des bras et des tirants du robot de transfert : la part liée au défaut de localisation du point D dans le triangle de renvoi est très faible (<10 %).

La cotation fonctionnelle mise en place sur le triangle de renvoi permet d'assurer :

- d'une part, le montage des roulements ;
- d'autre part, l'exigence de positionnement des tubes, puisque l'erreur maximale de positionnement est égale à 1,93 mm, donc inférieure aux  $\pm 3$  mm spécifiés dans le cahier des charges ;

### Partie B3. Industrialisation du triangle de renvoi

#### B3.1. Étude du scénario actuel : usinage dans la masse sur un centre d'usinage 5 axes

**Question 30** : cf. document réponse DR2.

**Question 31** : cf. document réponse DR2.

La maximisation de la productivité impose le débit copeau maximal. Les vitesses de coupe et les avances par dent seront donc maximisées, au détriment par exemple de la durée de vie des outils.

#### Question 32

La fréquence de rotation de la broche est de :

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D} = 8594 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$$

La puissance disponible à la broche à cette fréquence de rotation est de 35 kW maximum (critère limitant).

$$\text{Or : } P = \frac{a_p \cdot a_e \cdot V_f \cdot K_c}{60 \cdot 10^6}$$

Application numérique :

$$a_g = 0,8 \cdot D = 40 \text{ mm}$$

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot N = 9024 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$K_c = K_{c1} \cdot (h_m)^{-0,25} = 1125 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$\text{D'où } a_{p \text{ max}} = 5,17 \text{ mm}$$

**Question 33** : cf. document réponse DR3.

#### Question 34

Le CU2 offre logiquement le temps de fabrication le plus court (-22 % par rapport au CU1 et -27 % par rapport au CU3) puisqu'il permet de minimiser équitablement le temps d'usinage (puissance de broche élevée) et les temps improductifs grâce à ses axes supplémentaires (changement outil, posage). Le CU3 ne dégrade que légèrement ce temps de fabrication (-6 % par rapport au CU1) puisque la perte de temps engendrée par le manque de puissance de coupe de la broche (+20 % par rapport au CU1) est compensée par le gain de temps lié à la diminution des temps improductifs (-23 % par rapport au CU1).

Le CU3 offre le coût de fabrication le plus faible (-13 % environ par rapport au CU1 et au CU2). En dépit du coût horaire plus élevé d'une MOCN 5 axes, et du temps d'usinage plus élevé sur cette machine (lié à la broche disponible), un gain important est effectué sur le coût outils (-41 %) au regard de l'augmentation de leur durée de vie (dégradation des conditions de coupe).

Comme l'industriel souhaite augmenter sa productivité en raison de la faible disponibilité de ces moyens de production, l'utilisation du CU2 semble préférable : gain de temps de 22 % par rapport à CU1. De plus, cela engendre un très faible surcoût de 0,6 % sur la fabrication de la pièce.

### B3.2. Modification du procédé actuel : obtention du brut par moulage sable

#### Question 35

Les différentes raisons ayant amené au choix d'un brut de fonderie obtenue par moulage sable à vert – coulée gravité sont les suivantes :

- les alliages aluminium-silicium ont une très bonne coulabilité ;
- les tolérances dimensionnelles sur les surfaces non fonctionnelles peuvent être obtenues brutes de fonderie (diamètre 26 mm, surfaces extérieures, nervures) ;
- la série de pièces est insuffisante pour justifier la fabrication d'un outillage métallique permanent ;
- les épaisseurs locales des pièces (4 mm mini) autorisent un serrage du sable à la machine.

Les différents outillages nécessaires à la fabrication de cette pièce sont présentés sur les figures h à j.



Figure h. Modèle pour la fabrication du moule supérieur (à gauche) et du moule inférieur (à droite), intégrant les portées de noyau

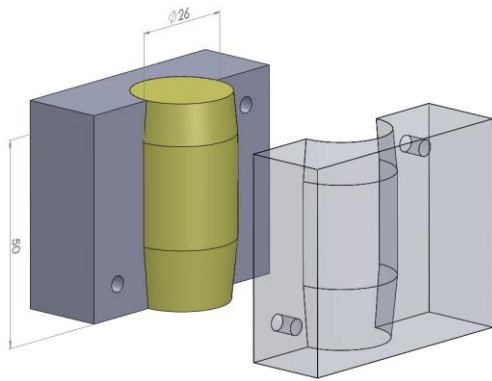


Figure i. Géométrie de la boîte à noyaux

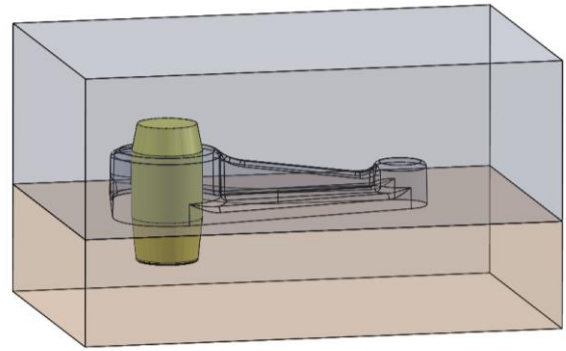


Figure j. Moule en position avant la coulée

### Question 36

Les défauts mis en évidence sont les multiples retassures sur les surfaces extérieures, mais aussi à l'intérieur de la pièce. Ces dernières sont dues à la contraction volumique globale (CVG) du métal lors de la phase de refroidissement (retrait à l'état liquide et contraction de solidification).

La partie supérieure de la pièce, en charge par rapport aux autres parties, joue le rôle de masselotte ce qui explique la présence de retassures dans cette zone. Cette partie se solidifie rapidement puisque son module thermique est faible (rapport volume/surface d'échange).

Par la suite, différentes poches de métal liquide se retrouvent isolées thermiquement, au niveau des différents points chauds (parties massives). Chacune de ces poches subit alors la CVG du métal, qui se traduit localement par un manque de matière, appelé retassure, dans la pièce finale.

### Question 37

Les surfaces et les volumes sont définis sur la figure k.

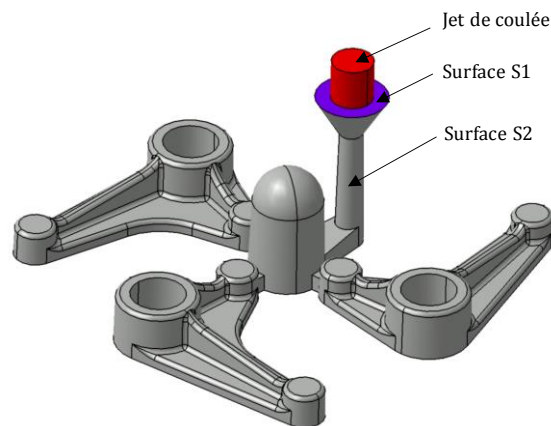


Figure k. Définition des surfaces pour la simulation numérique

#### Conditions initiales

- température alliage dans le jet de coulée (rouge) : 700 °C ;
- température initiale du moule : 20 °C.

#### Conditions aux limites

- pression atmosphérique sur la surface S1 (violette) ;
- pression du métal sur la surface supérieure du jet de coulée :  $P = \rho \cdot g \cdot H = 1500 \text{ Pa}$  ;
- perméabilité du moule (surfaces grises S2) : 120 indice GF (volume d'air qui passe à travers une colonne de sable en un temps donné) ;
- coefficient de transfert thermique entre l'alliage et le moule (surfaces grises S2) :  $H = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

### Question 38

Grappe n°1 : les masselottes positionnées sont efficaces puisqu'elles sont toujours à l'état liquide tant que la zone qu'elles masselottent n'est pas solidifiée (figure 2). Aucun volume n'est donc isolé thermiquement de sa masselotte au cours du refroidissement. Le système proposé permet donc de masselotter les points chauds des différentes zones isolées thermiquement (mais aussi de s'auto-masselotter). Aucune retassure ni malvenue est observée dans la pièce : seules des retassures apparaissent dans chacune des masselottes (Figure 1) ; cette grappe est donc éligible pour obtenir des pièces en bonne santé.

Au vu de leur module thermique, l'ensemble des masselottes se solidifie (quasiment) en même temps que les zones qu'elles masselottent. Une diminution de leur volume paraît donc difficile, puisque ceci pourrait engendrer leur solidification précoce. Une optimisation de la mise au mille semble donc impossible.

L'opération d'ébarbage associée à cette solution nécessite de réaliser neuf traits de coupe pour séparer le système d'alimentation des pièces.

Grappe n°2 : les remarques effectuées sur la santé de la grappe n°1 sont toujours valables. Grâce à l'utilisation d'une masselotte centrale commune, une amélioration notable de la mise au mille est effectuée par rapport à la grappe précédente : gain de 9 %. De plus, celle-ci semble pouvoir encore être optimisée (cf. explication grappe 1). Pour finir, l'opération d'ébarbage sera facilitée puisque seulement trois traits de coupe devront être réalisés. Cette solution est donc celle à privilégier.

### Question 39

Les notations utilisées dans le document réponse DR2 pour désigner les surfaces, sont reprises dans les paragraphes ci-dessous :

- au vu des spécifications géométriques et/ou des tolérances dimensionnelles imposées par le dessin de définition, les surfaces A, B, D, S2, S3, S4, S5, S6 et S7 doivent être reprises en usinage. C'est pourquoi des surépaisseurs d'usinage ont été ajoutées sur ces surfaces (repérées en bleu sur la figure I),

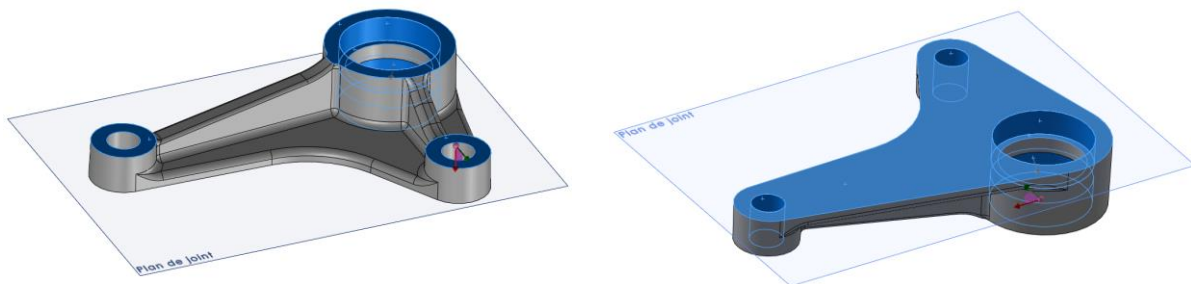


Figure I. Surépaisseurs d'usinage

- la surface S1 sera réalisée par le biais d'un noyau. La tolérance dimensionnelle associée ( $\varnothing 26 \pm 0,2$  mm) permet d'obtenir cette surface brute de fonderie ;
- en ce qui concerne les surfaces extérieures (S9, S10 et S11), seule la présence de dépouille pourrait compromettre le respect des tolérances dimensionnelles. La configuration la plus critique à ce sujet concerne la tolérance de  $\varnothing 40 \pm 0,5$  mm (figure m). Les surépaisseurs d'usinages de 2 mm sont représentées en rouge. La zone verte représente la zone de tolérance.

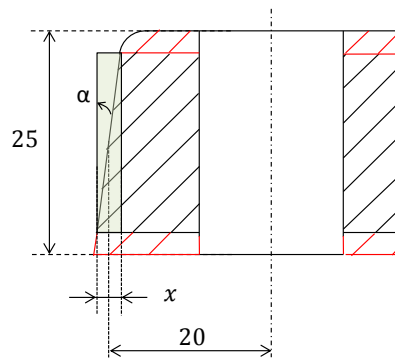


Figure m. Dépouille

La dépouille étant de 2 %, la distance  $x$  est égale à  $21 \cdot 2/100 = 0,42$  mm. Comme l'intervalle de tolérance au diamètre est de 1 mm, et que la dépouille impose une variation du diamètre de 0,84 mm entre le haut et le bas de la pièce, il n'est pas nécessaire d'effectuer une phase de finition pour ces surfaces.

Les réponses sont précisées dans le document réponse DR3.

Les temps d'usinage des différentes entités géométriques sont repris directement des données fournies pour l'usinage sur le centre 5 axes. Les temps associés respectivement à la réalisation du perçage de  $\varnothing 26$  mm, des phases d'ébauche et de finition des surfaces extérieures ne sont pas intégrés au calcul, puisque ces surfaces sont obtenues directement sur le brut de fonderie. Le temps de finition des opérations de surfaçage de S5 et S7 est par contre ajouté. Il en est de même pour le calcul des coûts d'outil.

Le nombre de changements d'outils est réduit à 6 et le nombre de posage à 1

#### Reprise du brut de fonderie (finition) - Gamme d'usinage 5 axes

---

Sous-phase 1 (montage A)

---

Surfaçage finition plan D

Perçage ébauche S3 et S4

Alésage finition S3 et S4

Contournage semi-finition A et finition plan S2

Rotation A de  $180^\circ$

Contournage semi-finition B et finition plan S6

Surfaçage finition S5 et S7

Alésage finition B

Rotation A de  $180^\circ$

Alésage finition A

Le coût matière est fortement diminué puisque la masse totale de la grappe pour 3 pièces est de 600 g, au lieu des 1 000 g pour le brut d'une pièce avec le scénario actuel (usinage dans la masse). On considère le cas le plus critique, où la matière du système de masselottage et du système de remplissage ne serait pas recyclée (ceci afin de se mettre dans un cas similaire à l'usinage), ce qui ne sera pas le cas dans la réalité.

Le coût de la reprise d'usinage s'élève à 4,7 €. Le scénario « obtention du brut de fonderie + finition usinage » est donc économiquement valable si le coût du brut de fonderie est inférieur à 9,5 €. Le coût de cette pièce est évalué dans l'industrie à 4 €.

Remarque : les coûts calculés pour les opérations d'usinage n'intègrent pas le coût de débitage du brut, le coût des montages d'usinage, le coût des porte-outils, le coût de mise en production (jauges outils...). Quel que soit le scénario envisagé, ces derniers sont quasiment similaires. Les coûts calculés ne sont donc pas les coûts complets, mais sont suffisants dans le cadre d'une étude comparative.

### B3.3. Synthèse sur l'industrialisation du triangle de renvoi

#### Question 40

Le fournisseur de la ligne de conditionnement doit évaluer les procédés d'obtention des pièces afin de minimiser leur impact environnemental, tout en garantissant un coût et un délai de fabrication raisonnables. Concernant l'impact environnemental, le scénario 2 conduit à une empreinte carbone plus faible de 9 % par rapport au scénario 1, et un gain de 6 % sur la consommation énergétique. Ceci s'explique principalement par la grande quantité de matière utilisée pour le brut dans le cas du scénario 1 (inconvenient des procédés par enlèvement de matière par rapport aux procédés par ajout de matière).

Au vu des conclusions apportées précédemment sur la viabilité en termes de coût et de délai du scénario 2, ce dernier semble cumuler les avantages sur les 3 critères étudiés.

La totalité des pièces du robot de transfert est aujourd'hui usinée. Au vu de leur typologie, la majorité des pièces utilisées dans le robot de transfert a un intérêt à suivre cette gamme de fabrication : les deux flans évidés du bras primaire (1), le tirant supérieur (6) et les tirants secondaires (7) et (8). Une reconception totale du bras secondaire (2) et de la tête de prélèvement (4) devra être effectuée pour que le procédé de fonderie soit viable.

#### Partie C. Synthèse

#### Question 41

Changements à effectuer sur :

- le poste de travail n°1 - modification des supports de tube (en fonction des dimensions du bouchon), du diamètre des enfonceurs de tubes (3) et de la longueur de la bielle (2) ;
- le poste de travail n°2 - modification des supports de tube, de la hauteur et du diamètre du centreur de la butée (5) et de la hauteur du capteur optique ;
- le robot de transfert - modifier le programme de commande des deux moteurs afin d'ajuster la position des zones de prise et de dépose des tubes (préhension au niveau du centre de gravité du tube) et sa vitesse de déplacement (en fonction de la cadence), modification du réglage de la pompe à vide pour ajuster le niveau de dépression nécessaire à la saisie des tubes sans les détériorer.

Ces postes répondent bien à l'exigence de flexibilité imposée par le cahier de charges puisque la mise en place d'outillages réglables et/ou modulaires permet une adaptation aux dimensionnels du tube. La méthode SMED (Single Minute Exchange of Dies) pourra avantageusement être mise en place afin d'optimiser les temps de changement et de réglage d'outillages entre deux références de tubes différentes.

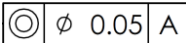
#### Question 42

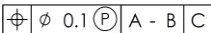
Au niveau de la remplisseuse, la totalité des tâches est menée en parallèle. La condition temporelle d'avancement du carrousel est donc donnée par la tâche la plus lente. La question 3 du sujet nous a permis de déterminer la valeur de  $T_{1 \text{ min}} = 550 \text{ ms}$ . Sur les postes de travail n°1, n°2, n°5 à n°7, les dimensions du tube n'influent en rien sur la durée de la tâche (contrairement aux postes de travail n°3 et n°4). Les tâches les plus longues sont donc celles associées aux postes de travail n°1, n°5 à n°7.

Le cahier des charges est ainsi respecté ( $140 \text{ tubes} \cdot \text{min}^{-1}$ ), puisque la cadence de fabrication est de  $(60/0,55) \cdot 2 = 218 \text{ tubes} \cdot \text{min}^{-1}$  dans la configuration la plus défavorable (car les postes sont dédoublés).

La remplisseuse permet donc d'alimenter à la cadence souhaitée le robot de transfert. Comme démontré à la réponse 22, ce dernier a une dynamique suffisamment importante pour suivre la cadence imposée, et peut donc ainsi alimenter correctement l'étuyeuse.

### DR1. Spécifications géométriques

Type de spécification Position	Élément(s) tolérancé(s)	Élément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance et condition de conformité
	Unique	Unique	Simple	Simple
<b>Spécification 1 :</b> 	Axe réel de la surface réputée cylindrique B ( $\varnothing 30_{0}^{0,021\mu\text{m}}$ )	Ligne A : surface réputée cylindrique A ( $\varnothing 30_{0}^{0,021\mu\text{m}}$ )	Droite A : axe du plus grand cylindre inscrit à la surface réputée cylindrique de $\varnothing 30$ mm, minimisant les écarts (critère min/max)	Zone de tolérance ZT : volume compris à l'intérieur d'un cylindre de $\varnothing 0.05$ mm Contraintes de la ZT : l'axe de ce cylindre est confondu à la référence spécifiée A Condition de conformité : l'élément tolérancé doit être contenu dans la zone de tolérance

Type de spécification Position	Élément(s) tolérancé(s)	Élément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance et condition de conformité
	Unique	Multiples	Commune Système	Simple
<b>Spécification 2 :</b> 	Segment de droite de longueur 25 mm, de direction l'axe du plus grand cylindre inscrit à la surface réputée cylindrique de $\varnothing 10$ mm minimisant les écarts (critère min/max) (Cyl1), et mesurée à partir de la surface de référence de l'alésage $\varnothing 10_{0}^{0,015\mu\text{m}}$ (cette surface de référence est un plan perpendiculaire à l'axe du Cyl1, et tangent extérieur matière à la surface réputée plane D).	Ligne A : surface réputée cylindrique A ( $\varnothing 30_{0}^{0,021\mu\text{m}}$ ) Ligne B : surface réputée cylindrique B ( $\varnothing 30_{0}^{0,021\mu\text{m}}$ ) Ligne C : surface réputée cylindrique C ( $\varnothing 10_{0}^{0,015\mu\text{m}}$ )	Droite A-B : axe (commun) des deux plus grands cylindres coaxiaux inscrits aux surfaces réputées cylindriques de $\varnothing 30$ mm (A et B), et minimisant les écarts (critère min/max) Droite C : axe du plus grand cylindre inscrit, parallèle à la référence spécifiée A-B, distant de 90 mm de cette référence, et minimisant les écarts (critère min/max) (par rapport à la surface réputée cylindrique de $\varnothing 10$ mm)	Zone de tolérance ZT : volume compris à l'intérieur d'un cylindre de $\varnothing 0.1$ mm et de longueur 25 mm Contraintes de la ZT : l'axe de ce cylindre est parallèle à la référence spécifiée A-B, distant de 50 mm de cette référence, et orienté de $85^\circ$ par rapport au plan contenant les références spécifiées A-B et C. Il est positionné à partir de la surface de référence de l'alésage $\varnothing 10_{0}^{0,015\mu\text{m}}$ . Condition de conformité : l'élément tolérancé doit être contenu dans la zone de tolérance



## DR2. Contrats de phase (1/3)

Phase n°10	Sous-phase N°1	DMU 65 Broche 35 kW Fraiseuse 5 axes vertical	Désignation pièce Triangle de renvoi	Matière AlSi7	Cadence 30 pièces /mois			
Désignation des opérations	Vc m/min	fz mm/dt	Z dt	Vf mm/min	ap mm	ae mm	N tr/min	P kW
<b>Opération n°1 : Surfaçage finition plan D</b>								
<b>Opération n°2 : Perçage finition S1 (Ø 26)</b> Profondeur : 22,5 mm <b>Porte outil</b> Corodrill 880 (Ø12 à 63,5) Foret à plaquettes indexables Diamètre : 26 mm Taille de plaquette : 5mm Réf : 880-D2600L32-02 <b>longueur utile max : 52 mm</b> <b>Coupe au centre</b> <b>Plaquettes</b> Réf plaquette centre : 880-05 03 05H-C-LM Réf plaquette périp : 880-05 03 W08H-P-LM	<b>350</b>	(mm/tr) <b>0,18</b>	<b>2</b>	<b>771</b>			<b>4285</b>	<b>7,7</b>
<b>Opérations n°3 et 4 : Perçage ébauche S3 et S4</b>								
<b>Opérations n°5 et 6 : Alésage finition S3 et S4</b>								

## DR2. Contrats de phase (2/3)

Phase n°10	Sous-phase N°1	DMU 65 Broche 35 kW Fraiseuse 5 axes vertical	Désignation pièce Triangle de renvoi			Matière AlSi7	Cadence 30 pièces /mois		
Désignation des opérations		Vc m/min	fz mm/dt	Z dt	Vf mm/min	ap mm	ae mm	N tr/min	P kW
<b>Opération n°7 : Contournage semi-finition A et finition plan S2</b> Coromill Plura Fraise en carbure monobloc ( (Ø0,1 à 25) Diamètre : 12 mm Réf : R216.32-12025-AK38A ap max : 38 mm Surépaisseur uniquement sur le diamètre Coupe au centre		520	0,036	2	993	8	1,8	13793	0,4
		Rmq: Vc max= 1000 pour la plaquette, mais limitation N broche							
		Rmq : limitation N broche							
<b>Rotation A de 180°</b>									
<b>Opération n°8 : Contournage semi-finition B et finition plan S6</b> <b>Outil</b> Coromill Plura Fraise en carbure monobloc ( (Ø0,1 à 25) Diamètre : 12 mm Réf : R216.32-12025-AK38A ap max : 38 mm Surépaisseur uniquement sur le diamètre Coupe au centre		520	0,036	2	993	8,0	1,8	13793	0,4
		1000 max pour la plaquette, mais limitation N broche							
		Rmq : limitation N broche							
<b>Opération n°9 : Surfacing finition S5</b>									
<b>Opération n°10 : Alésage finition B</b> <b>Porte outil</b> Corobore 825 Diamètre : 30 mm Réf : R825A-AF11STUC06T1A (Ø28 à 36) κr : 92° longueur utile max : <b>158 mm</b> <b>Plaquettes</b> Réf : TCGX 06 T1 04-AL Nuance H10 (N15) - carbure non revêtu		1200	0,8	1	10186	0,2		12732	2,3
		1200 max pour le porte-outil, 2500 max pour la plaquette							
		Rmq : limitation Vc porte-outil							
<b>Rotation A de 180°</b>									
<b>Opération n°11 : Alésage finition A</b> <b>Porte outil</b> Corobore 825 Diamètre : 30 mm Réf : R825A-AF11STUC06T1A (Ø28 à 36) κr : 92° longueur utile max : <b>158 mm</b> <b>Plaquettes</b> Réf : TCGX 06 T1 04-AL Nuance H10 (N15) - carbure non revêtu		1200	0,8	1	10186	0,2		12732	2,3
		1200 max pour le porte-outil, 2500 max pour la plaquette							
		Rmq : limitation Vc porte-outil							

Phase n°10	Sous-phase N°2	DMU 65 Broche 35 kW Fraiseuse 5 axes vertical	Désignation pièce Triangle de renvoi	Matière AlSi7	Cadence 30 pièces /mois			
<p>4-5 : Centreur sur référence A 6 : Locating sur référence C Bridage par un système vis+rondelle passant au travers du perçage Ø 26, et en appui plan sur S5</p>								
Désignation des opérations	Vc m/min	fz mm/dt	Z dt	Vf mm/min	ap mm	ae mm	N tr/min	P kW
Opérations n°1 à 5 : Surfaçage ébauche S7 à S10 et finition S11								
Opérations n°6 à 9 : Surfaçage finition S7 à S10								

### CU 5 axes DMU 65 - Broche de 35kW - N=14 000 tr/min

	Tps Usinage effectif (s)	Tps usinage HM (s)	Coût outil (€)
Plan D	14	5	0,19
Ø 26 mm	5	1,5	0,03
2 trous de Ø 10 mm ébauche	4,5	1,5	0,2
2 trous de Ø 10 mm finition	11	2	0,04
Référence A ébauche	3,5	3,5	0,31
Référence A finition	1,5	1	0,01
Référence B ébauche	3,5	3,5	0,31
Référence B finition	1,5	1	0,01
Ébauche surface extérieure	28,2	8	0,55
Finition surface extérieure	74	24	6,58

N° Phase	Nombre Chgt outil	Nombre Chgt posage	Nombre rotation table
SS-phase 1	7	1	2
SS-phase 2	2	1	

	Temps occupation machine (s)
Usinage	198
Chgt outil	45
Chgt posage	40
Rotation table	3
TOTAL	286

	Coût de fabrication (€)
Occupation machine	4
Outil	8,2
Matière	2
TOTAL	14,2

### Finition du brut de fonderie - CU 5 axes DMU 65 - Broche de 35kW - N=14 000 tr/min

	Tps Usinage effectif (s)	Tps usinage HM (s)	Coût outil (€)
Plan D	14	5	0,19
Ø 26 mm	0	0	0
2 trous de Ø 10 mm ébauche	4,5	1,5	0,2
2 trous de Ø 10 mm finition	11	2	0,04
Référence A ébauche	3,5	3,5	0,31
Référence A finition	1,5	1	0,01
Référence B ébauche	3,5	3,5	0,31
Référence B finition	1,5	1	0,01
Ébauche surface extérieure	0	0	0
Finition surface extérieure	15	9	1,33

N° Phase	Nombre Chgt outil	Nombre Chgt posage	Nombre rotation table
SS-phase 1	6	1	2

	Temps occupation machine (s)
Usinage	81
Chgt outil	30
Chgt posage	20
Rotation table	3
TOTAL	134

	Coût de fabrication (€)
Occupation machine	1,9
Outil	2,4
Matière	0,4
TOTAL	4,7

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

## 1. Présentation du sujet

Les auteurs du sujet remercient la société Dior (site de Saint-Jean-de-Braye) et particulièrement messieurs Arnaud Dourlens, responsable conditionnement UP soin, et Patrick Pellé, référent technique ligne de production, pour leur accueil et pour les renseignements communiqués.

Le sujet de cette épreuve s'appuie sur une unité autonome de production (UAP) assurant le conditionnement de produits cosmétiques pour l'entreprise Dior. Les études proposées se focalisent sur deux moyens de production de cette UAP : le carrousel d'une remplisseuse et le robot de transfert qui lui est associé.

La problématique principale développée dans le sujet consiste à évaluer les solutions constructives mises en place sur ces moyens de production au regard des exigences de cadence et de flexibilité imposées par le cahier des charges, et à comparer des solutions technologiques afin d'optimiser conjointement performances environnementales et budgétaires.

Cette épreuve, composée de parties indépendantes, a permis de tester chez les candidats les compétences dans les champs suivants :

- validation de performances cinématiques et dynamiques d'un système au regard d'un cahier des charges ;
- dimensionnement de solutions technologiques (actionneur, entraînement par adhérence) ;
- choix de matériau et de gamme de traitements à partir de modélisations de systèmes mécaniques ;
- analyse de spécifications géométriques et élaboration d'une gamme de contrôle ;
- élaboration d'une gamme d'usinage ;
- analyse critique de résultats issus d'un logiciel métier de simulation numérique ;
- comparaison de gammes de fabrication sur des critères technico-économiques et environnementaux.

## 2. Analyse globale des résultats

Dans leur ensemble, les candidats se sont bien appropriés le support et en ont compris la problématique. La grande majorité des candidats a abordé le sujet de façon linéaire. La progressivité de la difficulté dans le questionnement de chacune des parties du sujet a permis d'identifier les candidats les plus performants.

Les candidats ayant bien réussi l'épreuve ont démontré leurs compétences transversales dans les champs disciplinaires des sciences industrielles de l'ingénieur, et plus spécifiquement de l'ingénierie mécanique. Ils ont par ailleurs traité, même partiellement, la totalité des parties du sujet. En dépit de l'indépendance des parties et des résultats intermédiaires fournis, beaucoup de candidats semblent faire l'impasse sur des pans entiers du sujet, liés spécifiquement à certaines disciplines fondamentales en ingénierie mécanique, ce qui ne peut aboutir à un résultat convenable.

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

#### **Partie A. Étude de la remplisseuse**

##### **Partie A1. Dimensionnement du poste de chargement des tubes vides**

###### **A1.1. Validation de la solution constructive au vu de la cinématique souhaitée**

Dans cette première partie du sujet, relativement simple car purement géométrique, les questions 1 à 3 ont été traitées par la majorité des candidats de façon satisfaisante. Beaucoup vont cependant chercher des difficultés en ne respectant pas l'ordre proposé des questions, se retrouvant ainsi à valider le profil de la came dès la question 1.

###### **A1.2. Choix de matériau pour la came**

Cette partie débutait par une approche énergétique du système bielle-manivelle et a fait émerger beaucoup de lacunes dans ce domaine chez trop de candidats. Ainsi, la question 4 mettait en place la notion d'inertie équivalente d'un système devant servir de base de réflexion lors de la question 5. Il ressort dans nombre de copies que l'approche énergétique est totalement inconnue pour certains qui, soit ne traitent pas la question, soit le font de façon erronée. La question 4 se terminait par un calcul d'extremum assez délicat qui a été intelligemment résolu de façon numérique par certains candidats ayant ainsi limité le temps consacré à cette question.

Dans la question 5, beaucoup de candidats ont préféré utiliser des méthodes vectorielles liées au Principe Fondamental de la Dynamique plutôt que la méthode énergétique qui découlait de la question précédente : ceci était effectivement possible. Cette question fait ressortir un manque de démarche scientifique chez certains candidats qui ne présentent pas les différentes étapes de calcul : systèmes isolés, théorèmes utilisés et résultats obtenus. Il ressort également que de nombreux candidats font abstraction de la notion de dynamique en n'utilisant que le PFS ou en confondant les deux.

Très peu de candidats ont traité correctement la question 7 : les systèmes utilisant des cames ne semblent pas maîtrisés. Le repérage, effectué par les candidats, des phases d'accélération et de décélération du galet, à partir de l'évolution respective de sa vitesse et de son accélération, est très souvent inexact. Le signe du vecteur-accélération permet de déterminer la piste en contact avec le galet.

Le choix inexact du rayon de came pour le calcul de la pression maximale dans le galet est l'erreur la plus fréquemment effectuée sur les questions concernant la théorie de Hertz : le contact critique est de type convexe/convexe (piste intérieure) et non concave/convexe (piste extérieure). De trop nombreux candidats ne connaissent pas le module d'Young d'un acier ni son coefficient de Poisson, et/ou se trompent dans les unités. Cela conduit parfois à des résultats numériques aberrants, ce qui ne semble pas perturber certains candidats. Le choix du critère de résistance mécanique à la place de celui de résistance élastique est également une erreur fréquente.

La justification de la gamme de traitement a été abordée par la majorité des candidats. Cependant, toutes les notions concernant ces traitements sont confuses : intérêts de la cémentation, raison pour laquelle la cémentation doit être effectuée avant la trempe... Ces confusions expriment clairement le manque de compréhension des candidats quant aux mécanismes régissant ces traitements et la façon dont ils impactent les caractéristiques mécaniques macroscopiques des aciers étudiés. Cependant, les quelques candidats ayant traité la question sur les paramètres opératoires de la cémentation ont conduit les calculs sans problème particulier.

### **A1.3. Choix de matériau pour le bras de levier**

Cette partie s'appuyait sur un modèle poutre afin de mettre en place les contraintes subies par le bras de transmission pour arriver sur un choix de matériau. La démarche proposée dans le sujet a été globalement bien suivie par nombre de candidats. Les notions de RdM sont très souvent validées et les candidats ont réussi à mettre en place l'indice de performance attendu. Il est cependant surprenant que certains s'arrêtent en cours de démarche sans conclure sur le choix du matériau, ou n'utilisent pas correctement le diagramme fourni.

### **Partie A2. Étude du poste d'indexation en rotation des tubes**

Cette partie, totalement indépendante de la précédente, a permis à beaucoup de candidats de raccrocher au sujet en revenant sur des notions de mécanique générale. Il est cependant dommage que le manque de rigueur soit encore présent dans de nombreuses copies. Même si la loi horaire de la question 17 est maîtrisée, son application fait souvent défaut et ne permet pas de valider la fréquence de rotation du moteur utilisé. La validation du couple est quant à elle sujette à la mise en place de l'inertie équivalente qui fait défaut chez trop de candidats.

Concernant les questions 18 et 19, il est surprenant de constater les difficultés que certains candidats ont pour calculer la masse d'un solide voire la surface d'un disque. D'autres ne sont pas surpris d'obtenir un coefficient de frottement supérieur à 1 et valident la solution technique présentée.

### **Partie B. Étude du robot de transfert**

#### **Partie B1. Dimensionnement des actionneurs**

Cette partie consacrée au robot de transfert débutait par une étude mécanique. La première étape consistant à écrire les coordonnées de P en fonction des angles a été bien réussie, même si certains candidats font des approximations assez surprenantes du type « scalaire = vecteur ». En revanche, l'inversion de ces relations afin de compléter le tableau fourni et de valider les butées a été nettement moins bien traitée. De ce fait, la question 21, y faisant suite d'un point de vue cinématique, n'a été abordée que par peu de candidats.

Les questions 22 et 23 étaient indépendantes par rapport à cette première approche, mais nombre de candidats n'y ont pas consacré de temps ou ont proposé des solutions très surprenantes pour garantir le maintien des tubes pendant leur transfert, démontrant un manque de culture technologique.

#### **Partie B2. Conformité de la cotation fonctionnelle au vu de la précision exigée sur le positionnement des tubes**

La majorité des candidats a traité les questions concernant l'étude des spécifications géométriques associées au triangle de renvoi. La qualité des réponses apportées est très hétérogène. Tout comme stipulé dans le rapport de l'année précédente, les candidats confondent très souvent l'explication de la norme et les raisons fonctionnelles qui justifient la présence de ces spécifications. Il est regrettable de voir que certains candidats considèrent que les spécifications sont définies à partir de la gamme de fabrication d'un produit. Les réponses apportées manquent souvent de rigueur ou sont incomplètes : absence de critère d'association entre élément idéal et non idéal, non prise en compte de la zone de tolérance projetée... Seulement 35 % des candidats ont proposé une gamme de contrôle sur une MMT. Les candidats ayant défini correctement les éléments construits, et pas seulement les éléments palpés, sont très rares. Les croquis effectués pour expliquer les spécifications géométriques ont été appréciés, mais ne peuvent à eux seuls expliciter la totalité de la norme.

Aucun candidat n'a su traiter correctement la question concernant le montage du roulement. Les erreurs les plus fréquentes sont associées à la non-prise en compte des intervalles de tolérances des alésages et/ou des bagues extérieures des roulements et/ ou des longueurs associées à leur logement respectif dans le triangle de renvoi.

Les questions 28 et 29 ont été bien abordées par les rares candidats qui sont arrivés à ces questions.

### **Partie B3. Industrialisation du triangle de renvoi**

#### **B3.1. Étude du scénario actuel : usinage dans la masse sur un centre d'usinage 5 axes**

L'élaboration de la gamme d'usinage du triangle de renvoi n'a pas posé de problèmes majeurs aux candidats ayant traité cette partie, malgré le manque de rigueur dans le vocabulaire utilisé pour définir les opérations d'usinage. La difficulté majeure de cette typologie de pièce, usinée dans la masse, consistait principalement à définir correctement les systèmes de mise et de maintien en position lors des phases d'usinage (MIP-MAP). Ces points ont été omis ou mal traités par la quasi-totalité des candidats. La cotation fonctionnelle n'est que trop rarement utilisée pour définir la gamme d'usinage et les différents posages. La majorité des candidats n'a pas exploité les 5 axes de la machine pour satisfaire au mieux les exigences imposées par la cotation fonctionnelle.

Les candidats ayant pris le soin d'étudier les documents techniques mis à leur disposition, pour choisir les outils et définir les paramètres opératoires associés à l'obtention finale des alésages, ont abouti sans problème aux résultats souhaités. Quelques candidats ont tout de même omis de prendre en compte la puissance maximale disponible à la broche. Le calcul d'une puissance de coupe pour une opération de fraisage semble tout de même inconnu pour plus de 90 % des candidats.

L'évaluation technico-économique de cette gamme d'usinage a été souvent mal traitée. Les erreurs les plus fréquemment effectuées sont les suivantes : non prise en compte de la durée de vie des outils de coupe, oubli de l'intégration des temps hors matière pour le calcul du temps d'occupation machine, non-connaissance de la masse volumique de l'aluminium. Il est regrettable que les candidats ayant obtenu des résultats aberrants (coût de fabrication parfois bien supérieur à 1000 €/pièce) n'aient pas pris du recul pour critiquer les résultats obtenus.

Finalement, le choix du centre d'usinage effectué a été traité par la majorité des candidats. La moitié d'entre eux n'a cependant pas su expliquer les différences de temps et de coût de fabrication entre ces différents moyens de production.

#### **B3.2. Modification du procédé actuel : obtention du brut par moulage sable**

Les candidats ont des connaissances très généralistes sur les procédés de moulage. Les justifications effectuées pour le choix du procédé ont été, dans la majorité des cas, erronées (le moulage sable à vert n'est pas dédié qu'à la fabrication de pièces de petites séries et de petites dimensions). Le vocabulaire utilisé est confus et nuit à la compréhension des réponses apportées par les candidats, parfois totalement hors sujet.

La majorité des candidats, ayant abordé la partie sur la simulation numérique de fonderie, a su analyser les résultats de solidification. L'explication des phénomènes physiques expliquant la présence de retassures est cependant très hétérogène. Les défauts liés au mauvais écoulement du fluide et ceux d'ordre thermique sont souvent confondus. Le petit nombre de candidats, ayant proposé des conditions aux limites et des conditions initiales à cette simulation, l'a fait correctement, sans pour autant proposer des valeurs



numériques de ces paramètres. Hormis quelques exceptions, la question traitant du choix de la grappe a été correctement traitée.

Le peu de candidats, ayant abordé la partie concernant la reprise du brut de fonderie par usinage, n'a eu aucun problème pour la réaliser.

### **B3.3. Synthèse sur l'industrialisation du triangle de renvoi**

La majorité des candidats a sélectionné la gamme d'usinage uniquement sur le critère environnemental. Quant à la généralisation de la nouvelle gamme de fabrication proposée aux autres pièces du robot, le jury déplore l'absence quasi-systématique de justifications aux réponses apportées.

### **Partie C. Synthèse**

Moins de 15 % des candidats ont abordé cette partie. La moitié d'entre eux a déterminé la cadence de fabrication en sommant la durée des tâches par postes de travail au lieu de prendre en compte le poste critique dans le carrousel. La totalité des candidats a statué sur la capacité de la remplisseuse quant à la cadence imposée par le cahier des charges. Aucun candidat n'a statué sur celle du robot de transfert.

### **Conseils aux futurs candidats**

Le jury encourage les candidats à traiter toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble des domaines des sciences industrielles de l'ingénieur. Le jury n'est pas insensible aux copies, dans lesquelles les candidats tentent de répondre à la globalité du sujet.

Le jury apprécie les candidats, trop peu nombreux, dont la démarche de résolution est précisée. Chaque réponse apportée doit être justifiée et exposée avec rigueur. Les hypothèses et les choix adoptés doivent clairement être explicités. Il paraît tout de même important de rappeler que les réponses doivent être pertinentes et que les candidats doivent aller à l'essentiel afin de répondre uniquement à la question posée.

Si la majorité des candidats présente des copies claires, il est regrettable de voir des copies dont la lisibilité est fortement compromise au vu de la mauvaise qualité graphique. Les notations utilisées doivent scrupuleusement respecter celles imposées dans le sujet. Un résultat numérique sans unité n'est pas considéré comme un résultat acceptable.

### **4. Conclusion**

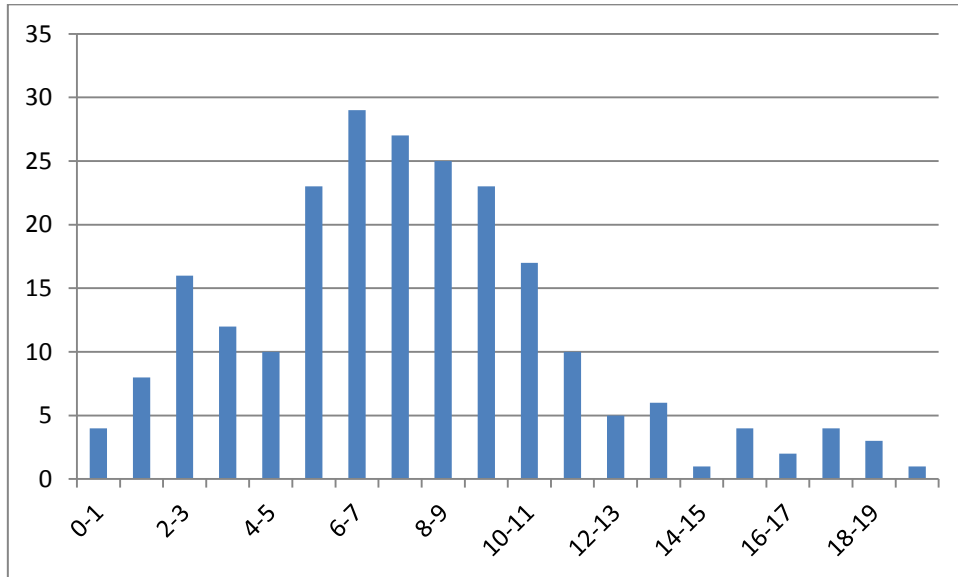
L'étendue des compétences mises en œuvre dans cette épreuve était large ce qui a permis aux candidats de pouvoir exprimer leur potentiel. Certaines parties du sujet, pourtant classiques, ont abouti à des résultats en dessous de ceux escomptés (étude de la cinématique d'un système, métrologie...). Les candidats doivent être conscients que la réussite à cette épreuve est conditionnée à la maîtrise de certaines méthodologies et outils propres au champ de l'ingénierie mécanique.

Il est par ailleurs nécessaire d'intégrer le caractère pluridisciplinaire de cette épreuve pour réussir à traiter une problématique dans sa globalité, et effectuer les liens naturellement existants entre les différents champs d'expertises. La démarche de résolution de problèmes pluridisciplinaires doit être au cœur même des préoccupations des futurs enseignants dans le domaine des sciences industrielles de l'ingénieur. Ainsi, le jury invite vivement les candidats à se préparer avec rigueur à ce concours pour acquérir les compétences scientifiques et techniques nécessaires, ainsi qu'une plus forte culture technologique en s'appropriant la réalité des systèmes industriels actuels.

## 5. Résultats

230 copies ont été évaluées, dont 44 pour les candidats à l'agrégation marocaine. La moyenne des notes obtenues est 7,8/20 et l'écart-type est de 3,8 avec :

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



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

L'objectif de la première épreuve d'admission de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur est d'évaluer chez les candidats leurs compétences à s'inscrire dans la démarche d'enseignant titulaire du grade d'agrégé. Ils doivent être capables de réaliser une exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique.

De fait, une problématique pédagogique à caractère expérimental est proposée au candidat. Ce dernier doit alors préparer la trame détaillée de sa séquence, en s'aidant des manipulations nécessaires et en précisant et validant un ou plusieurs protocoles de mesure permettant de répondre à la problématique.

Pour la session 2016, les compétences attendues par le jury sont scientifiques, comportementales et pédagogiques. Le candidat doit montrer ses aptitudes à :

- s'approprier un système réel ou un équipement et son environnement ;
- élaborer, justifier, conduire et exploiter un protocole expérimental ;
- analyser le comportement d'un système à partir d'un modèle ;
- maîtriser, conduire et exploiter une simulation numérique ;
- formuler des conclusions pour choisir et décider ;
- savoir mener des démarches avec rigueur et évoluer avec autonomie ;
- concevoir, organiser et décrire une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné.

## **Étude des gains énergétiques d'un chauffe-eau thermodynamique individuel et plus spécifiquement de la pompe à chaleur qui est un des constituants du système.**

**L'évaluation du candidat s'effectue en trois phases.**

### **Première phase – Manipulation expérimentale au laboratoire (durée 4h00)**

Cette première phase d'une durée totale de 4h00 se déroule en trois parties.

#### **Première partie (durée ≈ 0h30)**

Pour cette partie, les manipulations et les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système. À la fin de cette première partie, l'examineur s'assure que le candidat s'est bien approprié le support de l'activité pratique, dans l'optique de l'épreuve, en vérifiant une ou plusieurs performances du support.

#### **Deuxième partie (durée ≈ 2h00)**

Pour cette partie, après la présentation du système à l'examineur, le candidat doit répondre au questionnement proposé pour atteindre les objectifs de formation qu'il aura à satisfaire dans la troisième partie. Cette partie, permet au candidat, par la mobilisation de compétences caractéristiques du niveau de

l'agrégation, de résoudre les problèmes posés, d'en exploiter les résultats obtenus (hypothèses, modèles, valeurs numériques...) et de mettre en évidence les écarts entre le comportement souhaité, le comportement mesuré et le comportement simulé et d'éventuellement de proposer des solutions pour les réduire.

### **Troisième partie (durée ≈ 1h30)**

Pour cette troisième partie, une problématique pédagogique expérimentale étant proposée, le candidat doit préparer la trame détaillée de sa séquence pédagogique :

- positionnement de la séquence dans la progression pédagogique annuelle ;
- objectifs et prérequis de la séquence ;
- modalités pédagogiques (activités pratiques, activités dirigées, cours, projet) ;
- organisation matérielle et pédagogique des activités (nombre d'élèves, systèmes utilisés, travail en ilots) ;
- évaluation et remédiation.

De plus, le candidat devra décrire plus particulièrement une séance en précisant les expérimentations nécessaires. Il devra :

- identifier les compétences et les connaissances associées visées de la séance ;
- mettre en adéquation les objectifs visés de la séance et la séquence ;
- exploiter des informations, des données et des résultats issus des activités ou des investigations conduites au cours des travaux pratiques ;
- faire une synthèse et une structuration des connaissances.

### **Deuxième phase – Préparation de l'exposé (durée 1h00)**

Le candidat prépare son intervention devant le jury permanent. Le candidat n'a plus accès au système et modèles associés, mais conserve à sa disposition l'ensemble des ressources associées au sujet.

### **Troisième phase – Exposé oral et entretien avec le jury en salle (durée 1h00)**

L'exposé du candidat devant le jury a une durée de 40 minutes maximum. Il est suivi d'un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes). Le jury n'intervient pas au cours de l'exposé qui doit comporter :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- la synthèse des activités menées dans la deuxième partie de la première phase du TP (durée maximale 5 minutes) ;
- l'exploitation pédagogique (durée maximale 30 minutes).

Un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes) suit l'exposé oral du candidat.

Au cours de l'entretien, le candidat est conduit plus particulièrement à préciser certains points de sa présentation ainsi qu'à expliquer et justifier les choix de nature didactique et pédagogique qu'il a opérés dans la construction de la séquence de formation présentée ainsi qu'à détailler la prise en compte des valeurs de la République.

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

## **Étude des gains énergétiques d'un chauffe-eau thermodynamique individuel et plus spécifiquement de la pompe à chaleur qui est un des constituants du système.**

### **Première phase – Manipulation expérimentale au laboratoire**

Dans le contexte actuel de la construction neuve et notamment de l'application de la RT 2012 sur les maisons individuelles, les besoins de chauffage vont être réduits de manière importante alors que les besoins d'eau chaude sanitaire (ECS) resteront, eux, quasiment constants.

Des solutions de production d'ECS de plus en plus performantes sont donc appelées à se développer sur le marché, et le chauffe-eau thermodynamique individuel (CETI) en fait partie.

La performance d'un chauffe-eau thermodynamique, c'est-à-dire la quantité d'énergie utile qu'il fournit par rapport à celle qu'il consomme, est caractérisée par un Coefficient de Performance (COP). La partie « pompe à chaleur » est le composant qui consomme l'énergie électrique et la caractérisation de sa consommation permet de déterminer le COP du CETI.

Le but de l'étude est de :

- découvrir, comprendre le fonctionnement de la pompe à chaleur ;
- proposer une analyse externe et interne (partielle) de la pompe à chaleur ;
- déterminer la consommation énergétique de certaines chaînes d'énergie ;
- étudier les éléments influant sur le coefficient de performance et d'efficacité énergétique ;
- valider le ou les modèles au regard de la performance du système simulé et réel de la pompe à chaleur et du bac de stockage de l'eau.

Le candidat dispose, en plus du sujet, des éléments suivants :

- une pompe à chaleur didactisée ;
- une interface de pilotage ;
- un dossier technique ;
- un matériel de mesure (sonde de température) ;
- un logiciel multi physique ;
- le tableur EXCEL offrant une aide au calcul et au tracé de courbes.

### **Problématique**

Valider le gain énergétique de la PAC dans le cadre d'un CETI et identifier l'influence des composants et des paramètres sur la performance de la pompe à chaleur et du CETI.

### **Partie 1 : comprendre le fonctionnement global (≈ 0h30)**

*Objectif : découvrir la pompe à chaleur, support de l'épreuve de travaux pratiques. Présenter de manière appropriée une analyse externe et interne (partielle) du système.*

En manipulant le système à l'aide du dossier technique et ressource, effectuer les activités ci-dessous :

- prendre possession de l'ensemble en effectuant une mise en fonctionnement par l'intermédiaire du serveur WEB sur une durée de moins de cinq minutes, en notant les valeurs de chaque sonde de température et en lisant le dossier technique de la page 1 à 11.
- présenter brièvement, à l'examineur de salle sous forme de schémas à main levée à votre convenance, une analyse structurelle du système, et une analyse qualitative de la nature et de l'état du fluide dans les différents éléments de la structure ;
- indiquer l'adresse de base du réseau auquel appartient la PAC, ainsi que le nombre de machines

- connectables sur ce même réseau ;
- préciser les adresses « réservées » sur un tel réseau (le masque de sous réseau est 255.255.255.0) ;
- proposer la fonction des différents capteurs présents sur le système.

## Partie 2 : questionnement aidant à répondre aux problèmes techniques proposés (≈2h00)

*Objectif : caractériser les chaînes d'énergie du point de vue de leurs consommations. Identifier des paramètres d'état du système. Comparer le ou les modèles, les résultats de simulations à ceux mesurés sur le système réel. Valider le ou les modèles.*

### 2.1. Proposer un protocole permettant de caractériser les coefficients de performance de la pompe à chaleur (PAC).

2.1.1. Procéder, à une série de 6 mesures sur 30 minutes permettant de déterminer le COefficient de Performance COP expérimental de la pompe à chaleur, et son évolution en fonction du temps. Relever, lors des mesures, la température d'eau du bac.

2.1.2. Comparer sur le diagramme de Mollier (P, h) le cycle Rankine fourni représentant le fonctionnement en régime permanent de la PAC avec vos mesures.

2.1.3. Mettre en évidence et justifier les écarts entre les COP mesurés et ceux déterminés à partir des modèles de comportement thermodynamique choisis : modèle de Rankine.

Conclure quant à la pertinence de ces modèles pour décrire le comportement réel de la PAC.

### 2.2. Caractériser l'influence des composants et des paramètres sur la performance de la pompe à chaleur.

Les informations nécessaires sont présentes dans les documents « SchémaelecPAC+S7-1200.pdf » et « S71200\_easybook.fr.pdf » page 266.

2.2.1. Identifier le type de capteur permettant la mesure de la température en entrée de l'échangeur, le type de montage (2/3 ou 4 fils).

L'équation modélisant le comportement du capteur dans la plage de mesure donnée par le constructeur est  $R = R_0 (1 + \alpha \cdot \theta)$  avec  $\alpha = 0,003850$  en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Tracer la courbe correspondante.

2.2.2. À l'aide des fichiers de simulation MatLab « 2\_fils » et « 4\_fils », réaliser une simulation permettant de mettre en évidence le(s) avantage(s) du montage 4 fils par rapport au montage 2 fils dans le cas fictif où la sonde de température PT 100 serait implantée à 50 m de l'électronique reliée par un câble AWG24 résistivité linéique de  $85 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$  pour une mesure de température à  $0^{\circ}\text{C}$  et un courant  $I_{\text{mesure}} = 0,01$  A. Justifier vos résultats par la théorie.

Valider le choix technologique fait pour la PAC fournie.

Le modèle « PACsanscuve.slx » nécessaire à cette étude est fourni dans le répertoire « Dossier Matlab ».

2.2.3. Modifier les paramètres externes : température des médias chaud et froid, observer leur influence sur le COP et interpréter les résultats sur le diagramme de Mollier.

### 2.3. Analyse d'un modèle global de la pompe à chaleur.

Afin de prévoir les performances d'un chauffe-eau thermodynamique, on utilise un modèle global de la pompe à chaleur intégrant notamment le volume d'eau à chauffer. Voir modèle « PACaveccuve.slx » dans le répertoire « Dossier Matlab ». Quelles que soient les valeurs trouvées, utiliser le fichier « exploitation des mesures candidat ».

2.3.1. Identifier les différents blocs du modèle MatLab Simulink du bac à eau permettant de décrire le stockage du chauffe-eau thermodynamique.

Compléter le modèle à l'aide du coefficient de transfert thermique de la cuve (100, 50 et 10) de manière à simuler le fonctionnement de la maquette SPEN.

2.3.2. Effectuer des simulations et comparer les résultats de ces dernières aux valeurs mesurées.

Indiquer la provenance des écarts entre le modèle et la maquette.

### 2.4. Modélisation d'un chauffe-eau thermodynamique.

Un modèle « Matlab » d'un chauffe-eau thermodynamique « Aéraulix 2 » est fourni : « ChauffeEauThermo.slx ». En exploitant ce modèle et les caractéristiques techniques proposées par le constructeur :

- identifier les écarts entre la maquette et ce produit industriel ;
- justifier de l'intérêt d'utiliser un tel chauffe-eau par rapport à un chauffe-eau électrique traditionnel.

## Partie 3 : Problématique pédagogique expérimentale (≈ 1h30)

### Objectifs de cette partie

*Créer une séquence pédagogique dans laquelle une séance à caractère expérimental sera explicitée.*

*Niveau : terminale STI2D en enseignement technologique transversal, premier semestre.*

*Connaissance du matériel : Les élèves ont déjà manipulé le système.*

Activité : concevoir la trame de la séquence pédagogique, réaliser les manipulations et simulations à destination des élèves.

Le candidat s'appuie sur les points ci-dessous :

- positionnement de la séquence dans la progression pédagogique annuelle ;
- objectifs, compétences ou capacités visées du référentiel, et prérequis de la séquence ;
- modalités et organisation pédagogiques de la séquence (activités pratiques, activités dirigées, cours, projet...);
- description détaillée de la séance à caractère expérimental
  - situer la séance à caractère expérimental dans la séquence pédagogique ;
  - préciser l'organisation matérielle et pédagogique des activités ;
  - décrire la (ou les) démarche(s) pédagogique(s) retenue(s) (démarche d'investigation, de résolution de problème technique, de projet...);
  - détailler le scénario des activités que doivent réaliser les élèves, ainsi que les données de départ et le matériel dont ils disposent pour répondre à la problématique choisie.
- évaluation et remédiation.

## Objectifs de formation :

- décoder l'organisation fonctionnelle, structurelle et logicielle d'un système ;
- utiliser un modèle de comportement pour prédire un fonctionnement ou valider une performance.

## Compétences attendues (programme sous forme numérique) :

- CO4.1. Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un système ainsi que ses entrées/sorties ;
- CO4.4. Identifier et caractériser des solutions techniques relatives aux matériaux, à la structure, à l'énergie et aux informations (acquisition, traitement, transmission) d'un système ;
- CO5.1. Expliquer des éléments d'une modélisation proposée relative au comportement de tout ou partie d'un système ;
- CO5.2. Identifier des variables internes et externes utiles à une modélisation, simuler et valider le comportement du modèle ;
- CO5.3. Évaluer un écart entre le comportement du réel et le comportement du modèle en fonction des paramètres proposés.

## Connaissances visées

2.3 Approche comportementale				
2.3.1 Modèles de comportement				
Principes généraux d'utilisation Identification et limites des modèles de comportements, paramétrage associé aux progiciels de simulation		1ère	2	<i>Il s'agit de proposer une approche simple permettant de justifier l'utilisation d'un modèle de comportement, pouvant s'appuyer sur une simulation, permettant de justifier le paramétrage, les objectifs associés (justification de performance, prédiction d'un comportement) et la comparaison avec le réel.</i>
Identification des variables du modèle, simulation et comparaison des résultats obtenus au système réel ou à son cahier des charges	M(2)	1ère/T	2	<i>Il s'agit de faire une analyse permettant de mettre en évidence l'influence du paramétrage sur la pertinence des résultats de la simulation.</i>
2.3.2 Comportement des matériaux				
Physique-chimie : matériaux métalliques, matières plastiques, céramiques. Comportement physico-chimiques (électrique, magnétique, oxydation, corrosion)				<i>Privilégier une approche qualitative par comparaison à partir d'expérimentations permettant de retenir des ordres de grandeur. Toutes les familles de matériaux sont expérimentées en lien avec les domaines d'emplois caractéristiques.</i>
Matériaux composites, nano matériaux. Classification et typologie des matériaux		T	2	<i>Les matériaux composites sont ceux de tous les systèmes.</i>
Comportements caractéristiques des matériaux selon les points de vue				<i>La progression pédagogique est à coordonner avec celle de physique sur les points complémentaires des programmes.</i>
Mécaniques (efforts, frottements, élasticité, dureté, ductilité)	*	1ère/T	2	
Thermiques (échauffement par conduction, convection et rayonnement, fusion, écoulement)	*	T	2	
Électrique (résistivité, perméabilité, permittivité)	*	1ère	2	

## Problématique technique proposée lors de l'activité pratique

« Dans le cadre d'une séance d'activités pratiques de deux heures, préparer une activité dédiée à l'efficacité énergétique des systèmes utilisant, entre autres, la maquette de pompe à chaleur ».

## Démarches pédagogiques

Consulter le document ressources pour le cycle terminal, enseignements technologiques transversaux et enseignements spécifiques (série STI2D) pages 112 à 162.

## Rappel :

L'exposé du candidat devant le jury a une durée de 40 minutes maximum. Il est suivi d'un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes). Le jury n'intervient pas au cours de l'exposé qui doit comporter :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- la synthèse des activités menées dans la deuxième partie de la première phase du TP (durée maximale 5 minutes) ;
- la trame détaillée de la séquence pédagogique (durée maximale 30 minutes).



**Remarque : les fichiers remis aux candidats pour la phase expérimentale sont en ligne sur le réseau national de ressources à l'adresse suivante :**

[http://eduscol.education.fr/sti/ressources\\_pedagogiques/deux-tp-de-preparation-pour-agregation-s2i-option-im-2016](http://eduscol.education.fr/sti/ressources_pedagogiques/deux-tp-de-preparation-pour-agregation-s2i-option-im-2016)

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

## 1. Présentation de l'épreuve

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

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

L'exploitation pédagogique proposée, directement liée aux activités pratiques réalisées, est relative aux enseignements technologiques transversaux du cycle terminal « sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D) » et/ou sciences de l'ingénieur de la voie scientifique (SSI) du lycée et des classes préparatoires aux grandes écoles.

### Déroulement de l'épreuve

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

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

**Cette première phase se décompose en trois temps.**

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

#### **Premier temps (durée ≈ 0h30)**

Une étude fonctionnelle et structurale permet au candidat de s'approprier la problématique proposée et le système pluritechnologique support de l'activité pratique. À la fin de cette première partie, l'examinateur s'assure que le candidat a bien atteint cet objectif.

### **Deuxième temps (durée ≈ 2h00)**

Ce deuxième temps est consacré à la résolution de la problématique posée. Le questionnement du sujet et les échanges avec l'examineur permettent de mobiliser des compétences, des connaissances technologiques et scientifiques, communes aux trois options, caractéristiques du niveau de l'agrégation.

### **Troisième temps (durée ≈ 1h30)**

Ce dernier temps est destiné à la construction d'une trame de séquence pédagogique à un niveau imposé et à l'élaboration d'une séance détaillée de travaux pratiques. La trame de séquence et la séance doivent permettre de répondre aux attendus de la présentation orale de la phase 3. À ce stade, le candidat dispose des travaux déjà réalisés qu'il peut compléter par des manipulations ou des mesures pertinentes destinées à valider ses choix pédagogiques et à étayer la conception détaillée des activités proposées.

### **La phase 2 – préparation de la présentation orale (durée 1 h).**

Le candidat prépare, en loge, la présentation qu'il effectuera devant le jury. Durant cette phase de préparation de l'exposé, le candidat n'a plus accès au système pluritechnologique, support de l'activité pratique et aux logiciels de simulation. Il dispose d'un poste informatique relié à l'internet, des logiciels courants de bureautique et de ses résultats obtenus lors de la phase 1.

### **La phase 3 – présentation des travaux devant le jury (durée 1 h).**

L'exposé du candidat devant le jury a une durée de 40 minutes maximum. Il est suivi d'un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes). Le jury n'intervient pas au cours de l'exposé qui doit comporter :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- la synthèse des activités menées dans la deuxième partie de la première phase du TP (durée maximale 5 minutes) ;
- l'exploitation pédagogique (durée maximale 30 minutes).

Un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes) suit l'exposé oral du candidat.

Au cours de l'entretien, le candidat est conduit plus particulièrement à préciser certains points de sa présentation ainsi qu'à expliquer et justifier les choix de nature didactique et pédagogique qu'il a opérés dans la construction de la séquence de formation présentée ainsi qu'à détailler la prise en compte des valeurs de la République.

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

Le candidat est amené au cours de sa présentation orale à :

- mettre en évidence les informations, les données et les résultats issus des investigations conduites au cours des activités dans la perspective de la séquence et séance pédagogique demandée ;
- positionner la séquence dans la progression pédagogique annuelle ;
- présenter et justifier la structure de la séquence pédagogique ;
- définir les objectifs de formation ;
- identifier les prérequis et les conditions matérielles nécessaires pour la séance ;

Le candidat doit également s'attacher à :

- définir précisément les compétences abordées lors de la séance détaillée ;
- mettre en adéquation les objectifs visés de la séance et la séquence ;
- exploiter et adapter au niveau de formation demandé (STI2D, S-SI et CPGE) les informations, les données et les résultats issus des activités ou des investigations conduites au cours de l'activité pratique ;

- détailler les activités proposées aux élèves lors de la séance ;
- présenter une synthèse ou une structuration des connaissances ;
- définir les stratégies d'évaluation des acquis des élèves.

Le jury peut être amené à interroger le candidat en vue d'apprécier, d'une part sa connaissance du fonctionnement d'un EPLE (établissement public local d'enseignement), et d'autre part ses capacités à faire partager aux élèves les valeurs et principe de la République.

Au cours de l'entretien, le candidat est amené à :

- préciser certains points de sa présentation ;
- expliquer et justifier les choix de nature didactique et/ou pédagogique qu'il a opérés.

Lors de la présentation devant le jury, le candidat dispose d'un tableau, d'un vidéoprojecteur et d'un poste informatique relié à l'Internet, doté des logiciels courants de bureautique. Le candidat accède à toutes ses productions numériques réalisées pendant l'épreuve.

Les supports retenus lors de la session 2016 sont :

- banc d'étude sismique ;
- banc de transmission thermique ;
- robot collaboratif ;
- monture de télescope ;
- ventilation mécanique contrôlée double flux ;
- compacteur de déchets ;
- banc de pompe à chaleur ;
- maquette de pont levant.

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

- élaboration d'un protocole expérimental ;
- identification des comportements de constituants ou d'un système ;
- mesure de comportement de constituants ou d'un système ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne de mesure ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne d'énergie ;
- détermination des paramètres significatifs d'une modélisation ;
- recalage d'un modèle ;
- choix des modèles de comportement ou de connaissance ;
- validation de modèles ;
- simulation et prédiction de performance ;
- évaluation des écarts.

## **2. Analyse des résultats**

Le jury observe une grande disparité dans les prestations des candidats.

Les candidats pertinents mobilisent à bon escient leurs compétences pour répondre à la problématique demandée en positionnant correctement leur future exploitation pédagogique. Les prérequis, objectifs, démarches pédagogiques et d'évaluation sont bien assimilés et correctement décrits lors de l'exposé oral. Ces candidats ont généralement produit une présentation orale de qualité.

Une majorité des candidats est bien préparée à la conduite des expérimentations et à l'exploitation des résultats au plus haut niveau d'expertise. La présentation du système et des résultats lors de la présentation orale se résumant à un compte-rendu sans que soit mis en perspective le ou les liens entre les

manipulations effectuées et la séquence pédagogique. Les candidats n'abordent que très partiellement l'exploitation pédagogique des manipulations.

Un nombre très restreint de candidats réalise quelques rares manipulations liées généralement à une connaissance parcellaire des champs scientifiques et techniques à mobiliser. De plus, la qualité de raisonnement et la rigueur ne sont pas au niveau que l'on peut attendre d'un candidat à l'agrégation. L'exploitation pédagogique associée est souvent décevante.

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

#### **Compréhension du système pluritechnologique support des activités pratiques**

Pour cette partie, les manipulations ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système, de s'approprier le support du travail pratique et de la problématique proposée. Les candidats disposent pour cette phase de compréhension du système d'un dossier technique, d'un dossier ressource ainsi que diverses ressources numériques. Le système proposé au candidat peut être le système réel ou un système didactisé à partir d'un système réel.

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

- l'extraction des informations pertinentes dans les ressources mises à disposition constitue un préalable indispensable à l'appropriation du système et de la problématique ;
- la contextualisation des activités et supports proposés, souvent omise, permet de correctement appréhender le fil directeur des activités et manipulations proposées ;
- les analyses externes et internes des systèmes gagnent en pertinence lorsqu'elles sont appuyées sur des outils formalisés.

#### **Résolution des problèmes posés et exploitation des résultats**

Pour cette partie de l'épreuve, le candidat est amené à :

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

Une aide à l'utilisation est fournie et le jury assiste le candidat en cas de difficultés matérielles ou de mise en œuvre des différents outils informatiques. La maîtrise de ces logiciels n'est pas exigée.

Les activités permettent aux candidats de mobiliser l'ensemble des compétences fondamentales des sciences de l'ingénieur.

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

- lire et analyser l'ensemble du sujet proposé ;
- maîtriser la durée consacrée à chaque activité ;
- maîtriser les outils d'analyse courants (structurels et fonctionnels) ;
- exploiter l'ensemble des résultats des expérimentations et des mesures et à les interpréter dans leur totalité et de façon rigoureuse ;
- corréler les résultats des simulations et des expérimentations en les associant à des phénomènes physiques et à des solutions technologiques ;
- effectuer une analyse critique des résultats expérimentaux et vérifier la cohérence et la pertinence de ceux-ci ;
- mettre en œuvre une démarche de résolution du problème technique posé ;

- proposer aux examinateurs une présentation et/ou justification des protocoles ;
- présenter les résultats de façon claire et précise.

Le jury précise que les supports de travaux pratiques sont principalement issus des laboratoires des filières SSI, STI2D, STS, CPGE et couvrent l'ensemble des champs disciplinaires transversaux des sciences industrielles de l'ingénieur.

### **Conception d'une activité pédagogique à caractère expérimental**

Une problématique pédagogique expérimentale étant proposée, le candidat doit préparer la trame détaillée de sa séquence pédagogique dans laquelle il devra décrire plus particulièrement une séance pédagogique à caractère expérimental en s'aidant des manipulations nécessaires, et en précisant et validant un ou plusieurs protocoles de mesure permettant de répondre à la problématique.

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

- définir la place de la séquence proposée dans le plan de formation annuel pour le niveau proposé ;
- préciser de façon argumentée la place de l'exploitation pédagogique dans la séquence ;
- connaître les horaires officiels, les épreuves du baccalauréat relatives aux classes de STI2D, S-SI et de classes préparatoires aux grandes écoles ;
- dégager et formaliser les objectifs pédagogiques (compétences à faire acquérir et connaissances à transmettre) ;
- analyser le choix de la modalité pédagogique en vue de répondre à l'objectif de formation de la séance ;
- structurer une démarche cohérente conduisant à la transmission de compétences nouvelles au niveau imposé et identifier les centres d'intérêt associés au système étudié ;
- proposer des protocoles expérimentaux ;
- connaître les différents modes d'évaluation et leurs finalités pédagogiques ;
- respecter la durée de préparation de l'exploitation pédagogique.

Le jury conseille aux futurs candidats d'étudier préalablement et attentivement les programmes et les objectifs de formation des baccalauréats S (option sciences de l'ingénieur), STI2D, et des CPGE, ainsi que les commentaires associés. Cette étude, ainsi que la lecture des documents « ressources pour faire la classe » et des guides d'équipement, leur permettra de proposer une exploitation pédagogique en adéquation avec le niveau imposé. Une réflexion pédagogique sur les objectifs de formation de ces séries et classes post bac est indispensable pour réussir cette partie de l'épreuve.

### **Présentation orale devant un jury**

Le jury attend lors de cette phase de restitution des investigations menées et de présentation de la séquence pédagogique que le candidat soit capable :

- de décrire le système en présentant sa pertinence par rapport à la séquence pédagogique demandée ;
- de décrire les mesures effectuées en rappelant la problématique donnée et en précisant la démarche mise en œuvre et les conclusions obtenues ;
- de proposer, de justifier et de valider des protocoles expérimentaux en cohérence avec la séquence pédagogique demandée ;
- de situer la séquence dans une progression pédagogique cohérente ;
- de situer l'activité expérimentale dans la séquence pédagogique ;
- d'explicitier les compétences, et les connaissances associées, visées par la séance, les moyens de leur évaluation et de s'assurer du respect des textes officiels en vigueur ;
- de définir l'enchaînement des activités réalisées par les élèves dans la séance ;

Le jury attend également du candidat qu'il mette en œuvre des compétences professionnelles :

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

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

Le jury a été extrêmement attentif au positionnement du professeur sur les valeurs de la République. Ces points ont été systématiquement abordés et ont fait l'objet de questions au travers de mise en situation pédagogique ou de conduite de classe.

### **Comportement des candidats**

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

Les candidats se doivent d'avoir un vocabulaire et un comportement en adéquation avec le métier d'enseignant.

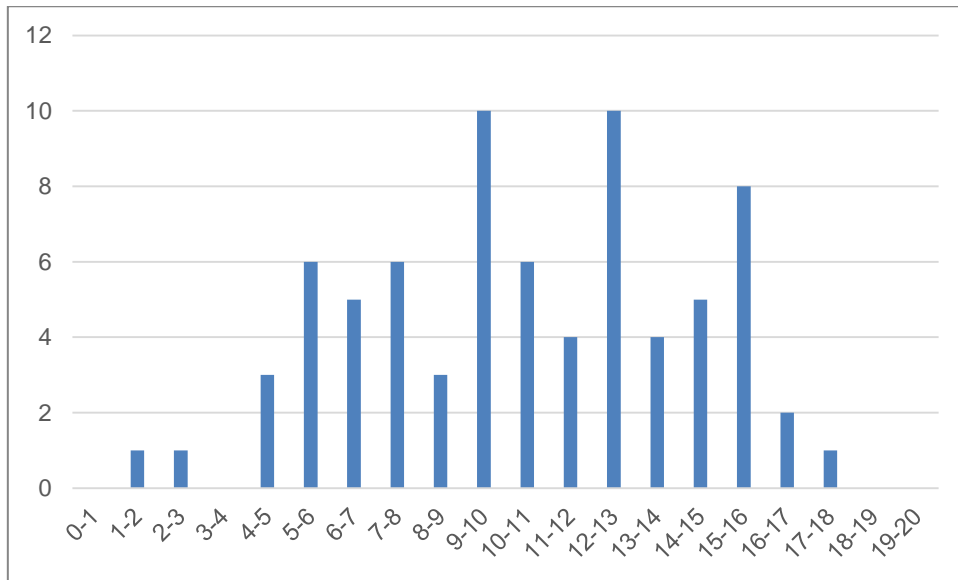
## **4. Conclusion**

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

## **5. Résultats**

75 candidats ont été évalués lors de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est 10,3/20 et l'écart-type est de 3,8 avec :

- 17,6 comme meilleure note ;
- 1,7 comme note la plus basse.





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

## SUPPORT ÉTUDIÉ : CHÂTEAU D'EAU



Thème pédagogique	ÉTUDES PROPOSÉES
<i>Systèmes vibrants à un degré de liberté</i>	<b>Étude 1 : valider une démarche d'analyse scientifique et technique.</b> <b>Étude 2 : élaborer une séquence pédagogique.</b>

### OBJECTIFS DE L'ÉPREUVE

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

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

- évaluer les progrès et les acquisitions des élèves.

Le candidat est évalué sur sa capacité à développer les aptitudes suivantes :

- s'approprier un matériel ou équipement et son environnement associé si besoin à des systèmes informatiques de pilotage, de traitement, de simulation, de représentation ;
- conduire une expérimentation, une analyse de fonctionnement d'une solution, d'un procédé, d'un processus ;
- analyser le comportement d'une solution, d'un procédé, ou d'un processus à partir d'un modèle ;
- maîtriser, conduire et exploiter une simulation numérique ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- mener des démarches avec rigueur et évoluer avec autonomie (savoir être) ;
- concevoir et organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé (compétences visées et savoirs associés) à un niveau de classe donné ;
- savoir communiquer.

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

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

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

## Libellé de la séquence pédagogique

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

**Niveau DUT « Génie Mécanique et Productique »** pages 16,18, 68 et 84.

### Compétences :

- modéliser des systèmes simples et les liaisons entre ces systèmes ;
- comprendre et effectuer des calculs mécaniques préalables aux problèmes de vérification ou de dimensionnement de systèmes ;
- comprendre les notions d'énergie en mécanique et appliquer les méthodes de résolution associées ;
- comprendre les paramètres qui gouvernent le comportement d'un système vibratoire.

### Savoirs associés :

		<b>MÉCANIQUE</b>
S1	M1103	<b>Principe Fondamental de la Statique</b>
		Modéliser un système et réaliser son étude statique.
S2	M2103	<b>Dynamique du solide : cinématique, cinétique, principe fondamental de la dynamique (PFD)</b>
		Modéliser un système et réaliser son étude cinématique et dynamique.
S3	M3103	<b>Dynamique et énergétique</b>
		Résoudre un problème de dynamique en utilisant soit le PFD soit les méthodes énergétiques. Application à l'étude des systèmes vibratoires à un degré de liberté.

		<b>CONCEPTION MÉCANIQUE ET DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES</b>
S4	M4105C	<b>Conception mécanique et dimensionnement des structures</b>
		Ce module transversal utilise les connaissances acquises notamment en mécanique, DDS, SDM et bureau d'étude pour modéliser des mécanismes réels en vue de leur pré-dimensionnement.

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

## **Première phase – Activités pratiques de laboratoire (durée 4h00)**

### **Première partie (durée ≈ 0h30)**

Pour cette partie, les manipulations ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système. À la fin de cette première partie, l'examineur s'assure que le candidat s'est bien approprié le support de l'activité pratique, dans l'optique de l'épreuve, en vérifiant une ou plusieurs performances du support, ainsi que la problématique proposée.

### **Deuxième partie (durée ≈ 2h00)**

Pour cette partie, après la présentation du système à l'examineur, le candidat doit réaliser des expérimentations, des manipulations et des essais afin de répondre aux problématiques proposées dans l'activité pratique. Cette partie permet au candidat, par la mobilisation de compétences caractéristiques du niveau de l'agrégation, de résoudre les problèmes posés, d'exploiter les résultats obtenus (hypothèses, modèles, valeurs numériques...) et de mettre en évidence les écarts entre le souhaité, le mesuré et le simulé, puis d'éventuellement proposer des solutions pour les réduire.

### **Troisième partie (durée ≈ 1h30)**

Pour cette troisième partie, le candidat doit préparer la trame détaillée de sa séquence pédagogique dans le cadre de la problématique pédagogique expérimentale proposée :

- positionnement de la séquence dans la progression pédagogique annuelle ;
- compétences visées et les connaissances associées de la séquence ;
- objectifs et prérequis de la séquence ;
- modalités pédagogiques (activités pratiques, activités dirigées, cours, projet) ;
- organisation matérielle et pédagogique des activités (nombre d'élèves, systèmes utilisés, travail en îlots) ;
- critères d'évaluation et remédiation.

De plus, le candidat devra décrire plus particulièrement une séance en précisant les expérimentations effectuées. Il devra notamment :

- identifier les compétences abordées durant la séance et les connaissances nouvelles associées ;
- mettre en adéquation les objectifs visés de la séance et la séquence ;
- exploiter des informations, des données et des résultats issus des activités ou des investigations conduites au cours des travaux pratiques ;
- faire une synthèse et une structuration des connaissances.

## **Deuxième phase – Préparation de l'exposé (durée 1h00)**

Le candidat prépare son intervention devant le jury permanent. Il n'a plus accès au système et modèles associés, mais conserve à sa disposition l'ensemble des ressources associées au sujet.

*Remarque : Il n'y a plus d'accès aux matériels durant cette heure de préparation.*

### **Troisième phase – Exposé oral et entretien avec le jury en salle (durée 1h00)**

L'exposé du candidat devant le jury a une durée maximale de 40 minutes. Il est suivi d'un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes). Le jury n'intervient pas au cours de l'exposé qui doit comporter :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- la synthèse des activités menées dans la deuxième partie de la première phase de l'activité pratique (durée maximale 5 minutes) ;
- l'exploitation pédagogique (durée maximale 30 minutes).

Un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes) suit l'exposé oral du candidat.

Au cours de l'entretien, le candidat est conduit plus particulièrement à préciser certains points de sa présentation. Il doit notamment expliquer et justifier les choix de nature didactique et pédagogique qu'il a opérés dans la construction de la séquence de formation présentée. Le candidat peut également être amené à préciser la manière dont il participe à la transmission des valeurs de la République.

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

## MISE EN SITUATION



L'illustration choisie porte sur la tenue des châteaux d'eau aux sollicitations sismiques dans les régions à risque. Lorsqu'un séisme tel que celui d'Haïti en janvier 2010 ravage une ville, la catastrophe humanitaire est d'une part liée à la destruction immédiate des immeubles et d'autre part, dans les semaines qui suivent, au manque de ressources de base comme la nourriture ou l'eau potable, l'énergie, les télécommunications, suite à la destruction des réseaux de distribution. Ce second effet est beaucoup plus meurtrier que le tremblement de terre lui-même, bien qu'il soit moins médiatique.

Pour cette raison, il est indispensable de dimensionner les châteaux d'eau aux sollicitations sismiques de façon à ce qu'après un tremblement de terre, ils puissent toujours assurer leur rôle de distribution d'eau potable à la population, et éviter les épidémies.

À propos de cette illustration, divers éléments sont mis à disposition :

- un banc permettant de reproduire à échelle réduite le comportement d'un château d'eau, pour différents paramètres de construction (masse, amortisseurs, raidisseurs) et de mesurer la réponse impulsionnelle, vibratoire en régime libre ou vibratoire en régime forcé ;
- des outils de simulation permettant de calculer la réponse statique, modale ou dynamique d'une structure telle que celle du banc ou celle d'un château d'eau.
- un dossier technique permettant de trouver les caractéristiques techniques du banc et du château d'eau réel ;
- un dossier « ressources ».

## PREMIÈRE PHASE : PREMIÈRE PARTIE (DURÉE ≈ 0H30)

*Remarque : cette partie propose quatre manipulations guidées dont le seul objectif est de prendre en main le support et les outils logiciels. L'analyse des résultats est proposée dans la seconde partie. Le candidat est invité à poser toutes les questions relatives à la prise en main durant cette première demi-heure, de façon à être autonome par la suite.*

### *Mesure et traitement de la réponse libre de la structure*

Protocole :

Allumer la table vibrante (interrupteur à gauche de la façade) ;

Lancer le logiciel *PGF* ;

Cliquer sur le module « *Analyse Temporelle du mouvement* » et régler un temps d'acquisition à 16 s.

Écarter la plaque de 5 cm environ, lancer l'acquisition en cliquant sur « *START!* » puis lâcher de façon à la laisser osciller.

À la fin de l'enregistrement, la courbe temporelle est affichée. Copier l'image dans le presse-papier (symbole appareil photo), ouvrir un logiciel de traitement de texte puis coller l'image. Il est possible de cette façon d'enregistrer les résultats de mesure. Cliquer droit sur la courbe et sélectionner *Exporter* puis *Exporter les données vers le presse papier*.

Lancer le logiciel *Scilab*. Après chargement des modules, le menu de la console propose entre autres 2 menus propres au TP : *Simulation\_EF* et *Mesures*. Par ailleurs, deux fichiers de paramètres s'ouvrent et seront utilisés ultérieurement.

Sélectionner *Mesure, Traitement* *Mesure banc DMS*. Les données temporelles du presse-papier sont alors affichées dans *Scilab* ainsi que la transformée de Fourier (module et phase).

Dans la fenêtre graphique du module de la transformée de Fourier, sélectionner *Fichier, Copier dans le presse-papier*. Il est ensuite possible d'inclure le graphique à une présentation. Plus simplement, *Alt+ImprEcran* permet de copier la fenêtre active dans le presse-papier.

### *Mesure et traitement d'une vibration forcée de la structure*

Relever la gamme de vitesse autorisée par la table vibrante (en tournant le bouton « *SPEED* »).

Dans le logiciel *PGF*, cliquer sur le module « *Analyse Fréquentielle du mouvement* ». Choisir une vitesse de rotation de la table vibrante puis la mettre en mouvement en appuyant sur le bouton « *TIME* ». Cliquer sur « *START* » puis relever la fréquence indiquée dans le logiciel d'acquisition.

*Relier l'information de vitesse de rotation affichée sur la table vibrante et la fréquence indiquée dans le logiciel d'acquisition.*

Arrêter la table vibrante en appuyant sur le bouton « *TIME* ».

Dans le logiciel *PGF*, cliquer sur « *Analyse Temporelle du mouvement* » et régler un temps d'acquisition à 30 s.

Régler la vitesse de rotation à 350 tr/min. Cliquer sur « *START* » puis appuyer sur le bouton « *TIME* » pour amorcer le mouvement de la table vibrante.

Copier les valeurs dans le presse-papier et lancer le traitement *Scilab* pour visualiser la transformée de Fourier.

### *Simulation du comportement dynamique de la structure en régime forcé*

Un certain nombre de modèles de simulation est à la disposition des candidats dans le logiciel *Scilab*. Le dossier « *ressources* » précise les conditions de simulation pour chaque modèle.

Dans le logiciel *Scilab*, sélectionner dans le menu *Simulation\_EF* la simulation en *réponse dynamique à une excitation au sol*. Sélectionner dans la boîte de dialogue le *banc, sans amortisseur*, en excitation *sinusoïdale* et avec *animation* de la réponse. Indiquer une fréquence de 2 Hz.

Après affichage du mouvement de la structure en figure 1, les courbes de déplacement du sol et du haut du château d'eau sont affichées en figure 2. Par la suite, pour éviter d'attendre, il est possible de réaliser la simulation *sans animation* : seules les courbes de déplacement sont affichées. Les deux fichiers de paramètres correspondent aux paramètres de calcul du modèle du banc et du modèle du château d'eau.

#### *Simulation de la réponse à un séisme d'un système à 1 degré de liberté*

Dans un niveau d'approximation simple, un système vibrant peut éventuellement être assimilé à un système masse-ressort-amortisseur à 1 degré de liberté.

Lancer Scilab sur l'ordinateur de gauche. Après chargement des modules, le menu de la console propose entre autres trois menus propres au TP : *Simulation\_EF*, *Simulation\_1ddl* et *Mesures*.

Sélectionner dans le menu *Simulation\_1ddl* la simulation *château d'eau soumis à un séisme*. Une fenêtre Xcos s'ouvre avec un modèle acausal présentant un solide à déplacement imposé, une liaison ressort-amortisseur et une masse. Les paramètres peuvent être changés en cliquant sur les blocs.

Lancer la simulation en cliquant sur la flèche dans le menu (ou encore en sélectionnant *simulation* puis *démarrer*). Les courbes du déplacement imposé et du déplacement de la masse sont affichées. À noter que pour mieux analyser le signal du déplacement imposé par le séisme, il est possible de tracer ses propriétés temporelles et fréquentielles en sélectionnant dans la console *Mesures*, puis *Traitement mesure séisme*.



## PREMIÈRE PHASE : DEUXIÈME PARTIE (DURÉE ≈ 2H00)

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

### *Analyse expérimentale du comportement dynamique de la structure type « château d'eau » (40')*

Une structure mécanique présente généralement un certain nombre de modes de vibration. La simplification consistant à adopter un modèle à un seul degré de liberté peut être critiquable. À partir des mesures faites en première partie (réponse libre et forcée), évaluer la pertinence d'un modèle à 1ddl et, le cas échéant, caractériser le domaine de validité.

La structure est modélisée par un système masse – ressort - amortisseur à 1 ddl. Préciser les grandeurs d'entrée et de sortie (correspondant aux transformées de Fourier mesurées en régime libre et forcé) puis déterminer la valeur numérique de la pulsation propre.

À partir d'une mesure statique au dynamomètre, déterminer la raideur de la structure puis proposer un modèle de type masse - ressort. Comparer les résultats à ceux du modèle précédent. Peut-on évaluer la fréquence propre du château d'eau ?

La structure étant très peu amortie, une solution envisagée est d'ajouter des amortisseurs en élastomère au niveau de la liaison au sol. Par des mesures expérimentales, établir un bilan des modifications du comportement de la structure suite à l'implantation d'amortisseurs.

Les mesures expérimentales permettent-elles de conclure sur le problème technique (la tenue de la structure aux séismes) ?

### *Analyse numérique du comportement dynamique de la structure type « château d'eau » (40')*

Dans Scilab, sous le menu *simulation\_EF*, sont proposées des modélisations sous forme de poutres de la structure du château d'eau : un modèle de déformation statique, un modèle d'analyse modale, et un modèle de déformation dynamique. Le dossier « ressources pédagogiques » précise les hypothèses à la base du modèle. Les fichiers textes *paramètres\_banc.sce* et *paramètres\_chateau\_eau.sce* comportent les paramètres des simulations numériques.

Lancer la simulation du modèle de comportement statique « *modele\_statique* » et comparer le résultat à la mesure faite sur le banc (les résultats numériques s'affichent dans la console).

Lancer la simulation *réponse modale* du modèle d'analyse modale et comparer les résultats à ceux issus des mesures expérimentales. La gamme de fréquences de la table permet-elle d'exciter plusieurs modes ? Combien de modes, la fréquence d'échantillonnage de 0,5 ms permet-elle de visualiser ?

L'apparition des modes de résonance sur une mesure dépend fortement de la localisation de l'excitation. En effet, si la sollicitation est appliquée sur un nœud de vibration, le mode n'apparaît pas sur la transformée de Fourier de la réponse. Proposer un nouveau protocole expérimental (simple) permettant de mieux solliciter les modes 2 et 3, et mettre en œuvre le protocole de façon à visualiser sur la transformée de Fourier la présence de ces modes dans le comportement fréquentiel de la structure.

Lancer la simulation dynamique, sans amortisseur, avec sollicitation sismique, du banc et proposer une analyse critique au regard des résultats des simulations précédentes et des expérimentations (la vitesse du séisme a été augmentée d'un facteur 50 correspondant au rapport des premiers modes du banc et du château d'eau).

#### *Modélisation de la structure par un système à 1ddl*

Les fichiers inclus dans le dossier « *simulation/modèle\_1ddl* » proposent des modélisations à 1ddl de la structure du château d'eau (sous forme de fonction de transfert), pour une entrée en échelon ou une entrée correspondant au relevé accélérométrique mesuré lors du tremblement de terre d'Haïti. Évaluer la pertinence de ces modèles simplifiés 1ddl au regard des analyses théoriques et expérimentales précédentes.

Les simulations proposées permettent-elles de conclure sur le problème technique (la tenue de la structure aux séismes) ?

## PREMIÈRE PHASE : TROISIÈME PARTIE (DURÉE ≈ 1H30)

*Remarque : il n'y a plus d'accès possible ni au banc, ni aux logiciels de simulations, lors de l'heure de préparation (deuxième phase). Le candidat est invité à réaliser prioritairement durant les 1heure et 30mn de la troisième partie les mesures et simulations qui lui permettront d'organiser et d'illustrer la présentation orale.*

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

Le candidat est amené au cours de sa présentation orale à expliciter sa démarche méthodologique, à mettre en évidence les informations, données et résultats issus des investigations conduites au cours des activités pratiques qui lui ont permis de construire sa séquence de formation, à décrire et situer la séquence de formation qu'il a élaborée.

La présentation orale du candidat devra comporter :

- la présentation du système (durée maximale 5 minutes) ;
- le compte-rendu des manipulations effectuées dans la deuxième partie de la première phase de l'activité pratique (durée maximale 5 minutes) ;
- l'exploitation pédagogique (durée maximale 30 minutes).

Un entretien avec le jury (durée maximale 20 minutes) suit l'exposé du candidat. Au cours de cet entretien, le candidat est conduit à préciser certains points de sa présentation ainsi qu'à expliquer et justifier les choix de nature didactique et pédagogique qu'il a opérés dans la construction de la séquence de formation présentée.

Plus précisément, l'exposé oral de l'exploitation pédagogique doit permettre au candidat de :

- présenter la pertinence du système par rapport à la séquence pédagogique demandée (à partir des activités menées dans la première partie) ;
- présenter le ou les protocoles expérimentaux mis en œuvre, analyser succinctement les résultats obtenus en cohérence avec la séquence demandée (à partir des activités de la deuxième partie) ;
- situer la séquence de formation en l'inscrivant dans la formation au niveau requis ;
- expliciter les connaissances et les compétences visées par la séance ;
- situer l'activité expérimentale dans la séquence pédagogique ;
- définir l'enchaînement des activités réalisées par les élèves dans la séance ;
- présenter les moyens de l'évaluation des connaissances et compétences acquises par les élèves ou étudiants.

**Remarque : les fichiers remis aux candidats pour la phase expérimentale sont en ligne sur le réseau national de ressources à l'adresse suivante :**

[http://eduscol.education.fr/sti/ressources\\_pedagogiques/deux-tp-de-preparation-pour-agregation-s2i-option-im-2016](http://eduscol.education.fr/sti/ressources_pedagogiques/deux-tp-de-preparation-pour-agregation-s2i-option-im-2016)

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

## 1. Présentation de l'épreuve

Cette épreuve permet d'évaluer l'aptitude des candidats à :

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

L'exploitation pédagogique proposée, directement liée aux activités pratiques réalisées, est relative à l'enseignement spécifique de spécialité ITEC du cycle terminal sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D) du lycée, et des programmes de BTS et DUT relatifs aux champs couverts par l'option Ingénierie Mécanique.

## Déroulement de l'épreuve

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

### La phase 1 – Manipulation expérimentale au laboratoire (durée 4h00)

Cette phase, d'une durée totale de 4 h, se déroule en trois parties dans le laboratoire où sont mis à disposition des candidats les différents supports<sup>1</sup> qui permettent à chaque candidat de proposer une séquence pédagogique. Celle-ci est liée aux activités pratiques réalisées par le candidat.

#### Première partie (durée ≈ 0h30)

Pour cette partie, les manipulations ainsi que les activités proposées ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système. À la fin de cette première partie, l'examineur s'assure que le candidat s'est bien approprié le support de l'activité pratique ainsi que la problématique proposée.

---

<sup>1</sup> systèmes réels distants ou non avec éventuellement sous-ensembles et composants industriels ; systèmes réels instrumentés ; systèmes didactisés ; systèmes sous forme de maquette et systèmes simulés.

### **Deuxième partie (durée ≈ 2h00)**

Pour cette partie, après la présentation du système à l'examineur, le candidat doit suivre le questionnement proposé afin de répondre à la problématique proposée dans l'activité pratique. Cette partie permet au candidat, par la mobilisation de compétences caractéristiques du niveau de l'agrégation, de résoudre les problèmes posés, puis d'en exploiter les résultats obtenus (hypothèses, modèles, expérimentations, mesures, résultats numériques, etc.).

### **Troisième partie (durée ≈ 1h30)**

Le candidat doit préparer la trame détaillée de sa séquence, en s'aidant des manipulations, investigations et analyses effectuées ou d'autres qu'il a la possibilité de concevoir, en précisant et en validant un ou plusieurs protocoles de simulation et/ou de mesure permettant de répondre à la problématique.

Cette phase 1 se déroule dans le laboratoire dans lequel se trouve le support utilisé. Celui-ci doit permettre de proposer des séquences pédagogiques. L'exploitation pédagogique proposée est liée aux activités pratiques réalisées.

Les candidats disposent de l'ensemble des moyens nécessaires à l'expérimentation et d'un poste informatique, relié à Internet, doté des logiciels courants de bureautique et des logiciels plus spécifiques liés au sujet qui leur est proposé.

### **La phase 2 – préparation de la présentation (durée 1h00)**

Durant cette phase d'une heure, le candidat s'appuie sur la trame de la séquence qu'il a construite dans la troisième partie de la phase 1 et prépare l'intervention qu'il fera devant le jury. Il dispose d'un poste informatique relié à l'Internet doté des logiciels courants de bureautique et de tous les résultats de mesures, analyses ou investigations issus de la phase 1.

### **La phase 3 – présentation des travaux devant le jury (durée 1h00)**

L'exposé oral est d'une durée maximale de 40 minutes. Le jury n'intervient pas pendant l'exposé du candidat. L'entretien avec le jury est d'une durée maximale de 20 minutes.

Le candidat est amené au cours de sa présentation orale à :

- présenter le système (durée maximale 5 minutes) ;
- présenter une synthèse des activités menées dans la deuxième partie de la première phase de l'activité pratique (durée maximale 5 minutes) ;
- présenter son exploitation pédagogique (durée maximale 30 minutes).

Au cours de l'entretien, le candidat est amené à :

- préciser certains points de sa présentation ;
- expliquer et justifier les choix de nature didactique et pédagogique qu'il a opérés.

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

Les études retenues lors de la session 2016 sont :

- résistance de structures treillis ;
- vibrations de structures ;
- vibrations des machines tournantes ;
- conception et fabrication additive ;
- industrialisation de pièces injectées ;
- industrialisation de pièces embouties ;
- industrialisation de pièces usinées ;
- contrôle géométrique de pièces.

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

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

### **Compétences attendues par le jury**

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

- faire preuve d'ingénierie pédagogique en élaborant une séance d'activités pratiques dans une séquence cohérente, inscrite dans une progression pédagogique ;
- proposer des activités pratiques ou des modélisations nouvelles, adaptées au niveau imposé et aux objectifs de formation ;
- s'approprier un support ;
- s'approprier la problématique associée ;
- élaborer, conduire et justifier un protocole expérimental ;
- exploiter et analyser des résultats expérimentaux ;
- élaborer, justifier, analyser de manière critique un modèle ;
- caractériser les différents écarts (spécifié, simulé, réalisé) ;
- faire une synthèse au regard de la problématique proposée en s'appuyant sur les expériences menées et les modèles utilisés ;
- évoluer en autonomie en mobilisant toutes ses connaissances et ses compétences ;
- présenter oralement ses travaux (clarté, précision, rigueur) ;
- être réactif et pertinent dans les réponses aux questions posées par les membres du jury.

## **2. Analyse des résultats**

Les résultats pour cette session sont encourageants du point de vue de la préparation des candidats. Ils avaient dans l'ensemble connaissance des modalités de cette épreuve, certains y étaient manifestement bien préparés. Il semble indispensable que les futurs candidats s'imprègnent de l'idée que les activités pratiques sont de véritables activités d'apprentissage. Elles constituent des modalités pédagogiques qui, à condition d'être bien construites et réfléchies, sont très pertinentes pour la

formation des élèves. Le jury note toutefois que les référentiels de BTS ou d'IUT et les modalités pédagogiques propres à ces filières sont mal maîtrisés.

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

#### **Sur la compréhension du système (phase 1)**

Pour cette première partie, le questionnement est conçu pour permettre une compréhension globale du système et de son fonctionnement, quelles que soient les connaissances préalables des candidats. Elle doit permettre aux candidats de montrer leurs capacités à aborder le système de façon globale en identifiant sa structure, ses caractéristiques et son fonctionnement. Un dossier technique et des ressources documentaires numériques sont à leur disposition. Cette première phase est fondamentale pour leur permettre de comprendre la problématique proposée dans la suite des activités (deuxième et troisième partie de la phase 1). Le système proposé peut être le système réel ou un système didactisé dérivé d'un système réel. Il est important que les candidats prennent en compte, dès la phase d'appropriation, les différences entre ces deux cas de figure. Cette première partie est conçue pour faciliter l'entrée des candidats sur un support et des logiciels qu'ils ne connaissent pas forcément.

Pour cette partie, le jury recommande :

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

#### **Sur les travaux pratiques de résolution des problèmes posés et d'exploitation des résultats (phase 2)**

Pour cette partie de l'épreuve, les candidats peuvent être amenés à utiliser une instrumentation spécifique dédiée à la mesure de grandeurs physiques sur les systèmes instrumentés. Une aide dans l'utilisation de ces instruments est fournie et le jury assiste les candidats en cas de difficultés matérielles. L'instrumentation peut être basique ou raccordée à un ordinateur.

Les candidats peuvent également être amenés à mettre en œuvre différents outils informatiques (logiciels de pilotage et/ou d'acquisition dédiés aux supports, modeleurs volumiques, logiciels de simulation, choix de matériaux...). La maîtrise de ces logiciels n'est pas exigée et une aide est systématiquement fournie.

Les logiciels proposés peuvent, par leurs possibilités de simulation, faciliter la compréhension des phénomènes et permettent d'éviter tout calcul long et complexe. En revanche, ils ne dispensent pas les candidats de formuler l'ensemble des hypothèses et des justifications nécessaires.

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

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

- analyser le sujet proposé ;
- exploiter la problématique ;
- s'approprier le matériel mis à disposition et à identifier les paramètres modifiables ;
- exploiter les équipements, effectuer des manipulations et interpréter les résultats obtenus, qui résultent d'une pratique affirmée d'une démarche à caractère expérimental ;

- présenter rapidement le système proposé, la problématique posée, les données et l'environnement matériel ;
- structurer l'exposé à partir d'un plan ;
- présenter la démarche de résolution du problème technique posé ;
- confronter le modèle et le réel, dissocier le réel à l'échelle 1 : 1 de la maquette à échelle réduite ;
- présenter et justifier les protocoles ;
- corréler les phénomènes physiques observables et les mesures effectuées par des logiciels d'acquisition ou des appareils de mesure ;
- présenter les résultats de façon claire et précise ;
- faire une analyse critique, organisée et pertinente de ces résultats ;
- tirer les conclusions vis-à-vis du problème posé.

### **Sur la réalisation d'une activité pédagogique à caractère expérimental (phase 3)**

Une problématique pédagogique et expérimentale étant proposée, les candidats doivent préparer la trame détaillée de leur séquence pédagogique. Ils devront décrire plus particulièrement une séance pédagogique à caractère expérimental en s'appuyant sur des manipulations pertinentes, dont une partie peut être issue des phases 1 et 2, en précisant et en validant un ou plusieurs protocoles de mesure permettant de répondre à la problématique.

Le jury recommande aux candidats de :

- dégager les objectifs pédagogiques, les connaissances à transmettre et les points-clés de la séquence ;
- définir et justifier la place de la séquence dans la progression pédagogique du niveau proposé ;
- utiliser les horaires officiels du niveau d'enseignement demandé ;
- définir les hypothèses de mise en œuvre, nombre d'élèves, de groupes, de systèmes présents dans le laboratoire ou l'atelier, etc. ;
- décrire et justifier la structure de la séquence, cours, travaux dirigés, activités pratiques, projets, synthèse, etc. ;
- développer le contenu d'une ou plusieurs séances de façon argumentée ;
- structurer la démarche pédagogique permettant le développement de compétences nouvelles au niveau imposé ;
- proposer et justifier les protocoles expérimentaux et/ou de simulation à mettre en œuvre avec les élèves ;
- définir et justifier l'évaluation des compétences visées.

Comme lors des sessions précédentes, le jury conseille aux futurs candidats d'étudier préalablement et attentivement les programmes et les objectifs de formation des baccalauréats STI2D (enseignement de spécialité ITEC), des BTS et des DUT du champ de la spécialité, ainsi que les commentaires associés et les documents d'accompagnement. Cette étude, ainsi que la lecture des documents « Ressources pour faire la classe » et des guides d'équipement, leur permettra de proposer une exploitation pédagogique qui soit en adéquation avec le niveau imposé. Une réflexion pédagogique sur les objectifs de formation de ces séries et classes post bac est indispensable pour cette partie.

### **Sur la présentation orale devant un jury**

Le jury attend lors de cette phase de présentation d'une séquence pédagogique à caractère expérimental que les candidats soient capables :

- d'expliciter les compétences visées par la séquence en lien avec le programme ou référentiel ;



- de situer la séquence dans une progression pédagogique cohérente ;
- d'identifier les connaissances et les capacités nouvelles ainsi que les points clés de la séquence ;
- de situer la séance à caractère expérimental dans la séquence pédagogique en s'appuyant sur une problématique clairement identifiée ;
- de décrire le ou les systèmes retenus, dont le support utilisé en phase 1 et 2 et leurs potentialités pédagogiques ;
- de proposer, justifier et valider un ou des protocoles expérimentaux qui peuvent être un des protocoles utilisés en phase 1 et 2 avec une adaptation au niveau imposé, ou un nouveau protocole conçu en phase 3 ;
- de décrire les mesures que devront réaliser les élèves ou étudiants. Les candidats peuvent s'appuyer sur les activités réalisées en phase 1 et 2, qui sont pertinentes par rapport à leurs objectifs pédagogiques et qui ont été adaptées au niveau imposé ou de nouvelles expériences réalisées en phase 3 ;
- de commenter la démarche mise en œuvre ;
- d'analyser les résultats expérimentaux ;
- de définir l'enchaînement des activités réalisées par les élèves dans la séance ;
- de définir les documents qui seront proposés aux élèves ;
- de définir les critères et la méthodologie d'évaluation retenue ;
- d'utiliser à bon escient les différents outils de description.

Le jury attend également des candidats qu'ils mettent en œuvre des compétences professionnelles en matière de communication :

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

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

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

### **Sur le comportement des candidats**

De trop nombreux candidats manquent de méthode et de rigueur pour appréhender un système dans sa globalité et dans sa complexité. L'exploitation pédagogique relative à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique ne s'improvise pas. Elle doit se préparer tout au long des formations conduisant à l'agrégation. Au-delà de la structuration nécessaire à un discours cohérent, les candidats doivent se prémunir contre des présentations stéréotypées ne permettant pas de mettre en valeur la qualité de leur réflexion personnelle. Le jury attend des candidats un savoir-être compatible avec les exigences d'un concours de recrutement de cadres A de la fonction publique.

Les candidats se réfèrent parfois avec une confiance aveugle aux modèles numériques, et ont en revanche beaucoup de méfiance vis-à-vis des résultats expérimentaux. Même si c'est une évidence, il

n'est pas inutile de le rappeler ici qu'une épreuve d'activités pratiques est avant tout une épreuve expérimentale.

#### 4. Conclusion

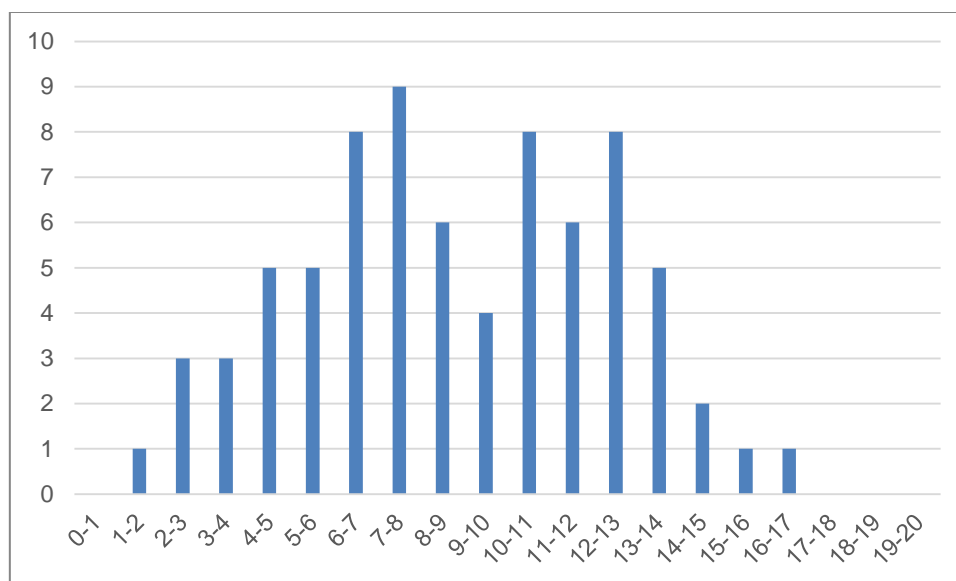
Le jury est conscient de la difficulté de cette épreuve exigeante, mais fondamentale en sciences industrielles de l'ingénieur. Pour cette session de l'agrégation, les résultats de la deuxième épreuve d'admission sont encourageants.

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

#### 5. Résultats

75 candidats ont été évalués lors de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est 8,8/20 et l'écart-type est de 3,5 avec :

- 16,3 comme meilleure note ;
- 1,2 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 (mise à jour : août 2014) précise :

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

*L'épreuve a pour but de vérifier que le candidat est capable de rechercher les supports de son enseignement dans le milieu économique et d'en extraire des exploitations pertinentes pour son enseignement en collège ou en lycée. »*

*« Durée totale de l'épreuve : 1 heure (présentation : 30 minutes maximum ; entretien avec le jury : 30 minutes) ».*

Le jury cherche également à apprécier la capacité du candidat, en qualité de futur agent du service public d'éducation, à se représenter la diversité des conditions d'exercice du métier et les valeurs qui le portent, dont celles de la République.

## 2. Analyse globale des résultats

De très bons résultats témoignent de la qualité de la préparation et de la prestation de certains candidats. À l'inverse, des dossiers insuffisamment préparés et/ou inadaptés aux exigences de l'épreuve n'ont pas permis aux candidats de faire preuve de leurs compétences.

## 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, et des problématiques associées est déterminant pour :

- permettre des développements scientifiques et technologiques d'un niveau adapté ;
- permettre un transfert pertinent vers l'enseignement.

Le dossier industriel doit aborder plusieurs dimensions :

- socio-culturelle pour mettre en contexte le problème traité vis-à-vis d'une question sociétale ;
- scientifique pour appliquer des démarches, pour conduire et analyser des expérimentations, des modélisations, des simulations, pour justifier des hypothèses et formuler des conclusions ;
- éventuellement ingénierie-design pour résoudre des problématiques de conception, de fabrication...

L'exploitation pédagogique doit s'appuyer sur le support et les problématiques retenues, les investigations scientifiques et technologiques proposées. Elle doit être en cohérence avec le niveau d'enseignement choisi et les programmes ou référentiels associés. Elle doit concerner l'enseignement du second degré (cycle terminal du baccalauréat S option SI, cycle terminal du baccalauréat STI2D, BTS, CPGE, voire technologie collège, enseignements d'exploration en seconde). Les exploitations pour des enseignements en IUT ne sont pas demandées.

Le dossier présenté doit résulter d'un travail personnel du candidat, les sources doivent être citées ; le jury utilise des moyens de détection de plagiat.

Certains dossiers concernent des produits ou des systèmes innovants qui comportent parfois des « secrets industriels ». Le niveau de confidentialité ne devra pas nuire à la constitution du dossier et au dialogue avec le jury.

Le candidat doit faire parvenir le dossier en deux exemplaires sur support papier. Le jury étudie la possibilité, pour les prochaines sessions, que ces dossiers soient en plus déposés sous forme numérique sur un site protégé.

Le jury apprécie particulièrement :

- les dossiers élaborés autour d'une véritable problématique liée à un support et issue d'une relation authentique avec l'entreprise sans toutefois s'apparenter à un rapport de stage, de projet, ou de recherche de type master ;
- 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 ;
- des démarches scientifiques et technologiques rigoureuses, adaptées, formalisées et étayées par des essais, expérimentations, mesures... et dont les conclusions apportent une plus-value à la problématique traitée ;
- des exploitations pédagogiques en application cohérente avec les considérations scientifiques et technologiques développées ;
- des exploitations pédagogiques précises et abouties (niveau d'enseignement, contexte, matériel choisi, position de la séquence dans la progression des apprentissages, contenu et déroulement de la séquence, évaluations associées développées, documents pour le professeur, documents pour les élèves...) ;
- des propositions d'exploitation pédagogique dans une perspective d'activités pluritechniques, voire interdisciplinaires.

Les dossiers, dans leur majorité, sont bien présentés et leur construction est assez souvent cohérente. Cependant, le jury regrette que leur structure soit trop souvent stéréotypée notamment dans 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'exploitation pédagogique qui en découlent. Le jury élargit son questionnement pour vérifier que le candidat a entrepris une réelle 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 ;
- l'ensemble des compétences à développer et des missions à assurer par un enseignant ;
- 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 claire et maîtrisée, un vocabulaire technique adapté, une fluidité des propos ;
- les supports visuels judicieusement utilisés ;
- les réponses argumentées avec pertinence.

Les présentations orales ont été, pour une grande majorité de candidats, préparées soigneusement avec un temps d'exposé maîtrisé.

Afin d'assurer une équité entre tous les candidats, quel que soit le support choisi, l'usage de supports matériels (produits, échantillons, maquettes didactiques...) apportés par les candidats n'est pas autorisé durant l'épreuve. S'ils existent, ces éléments pourront être mis en valeur au travers des documents présentés.

#### 4. Conclusion

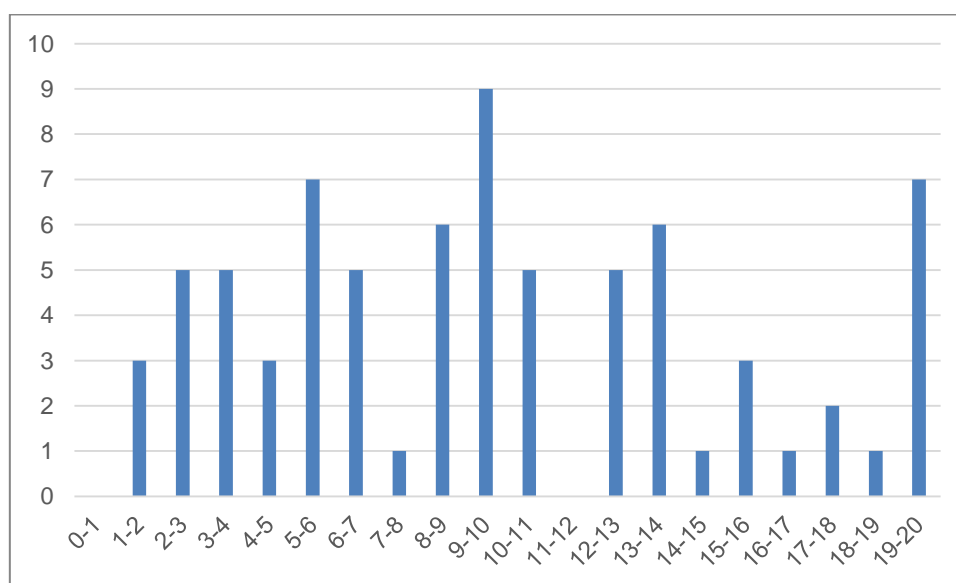
Le jury a constaté avec satisfaction que, pour la grande majorité des candidats, la dimension éducative du métier de professeur est correctement appréhendée et qu'une réelle réflexion a été menée sur la transmission des valeurs de la République.

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

75 candidats ont été évalués lors de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est 9,6/20 et l'écart-type est de 5,4 avec :

- 20,0 comme meilleure note ;
- 1,0 comme note la plus basse.



# Rapport sur la transmission des valeurs et principes de la République

Lors des épreuves d'admission, le jury évalue la capacité du candidat à agir en agent du service public d'éducation, en vérifiant qu'il intègre dans l'organisation de son enseignement :

- la conception des apprentissages des élèves en fonction de leurs besoins personnels ;
- la prise en compte de la diversité des conditions d'exercice du métier et la connaissance réfléchie des contextes associés ;
- le fonctionnement des différentes entités éducatives existant au sein de la société et d'un EPLE (institution scolaire, établissement, classe, équipe éducative...) ;
- les valeurs portées par l'Éducation nationale, dont celles de la République.

Le candidat doit prendre en compte ces exigences dans la conception des séquences pédagogiques présentées au jury. Il s'agit de faire acquérir, à l'élève, des compétences alliant des connaissances scientifiques et technologiques et des savoir-faire associés, mais également d'installer des comportements responsables et respectueux des valeurs républicaines.

Cet objectif exigeant induit une posture réflexive du candidat lors de la préparation et de la présentation d'une séquence pédagogique. En particulier, les stratégies pédagogiques proposées devront permettre d'atteindre l'objectif de formation visé dans le cadre de « l'école inclusive ». Il est indispensable de donner du sens aux enseignements en ne les déconnectant pas d'un contexte sociétal identifiable. Cela doit contribuer à convaincre les élèves du bien-fondé des valeurs républicaines et à se les approprier.

L'éducation aux valeurs républicaines doit conduire à adopter des démarches pédagogiques spécifiques, variées et adaptées. Il s'agit en particulier de doter chaque futur citoyen d'une culture faisant de lui un acteur éclairé et responsable de l'usage des technologies et des enjeux éthiques associés. À dessein, il est nécessaire de lui faire acquérir des comportements fondateurs de sa réussite personnelle et le conduire à penser et construire son rapport au monde. Les modalités pédagogiques, déployées en sciences industrielles de l'ingénieur, sont nombreuses et sont autant d'opportunités offertes à l'enseignant pour apprendre aux élèves :

- à travailler en équipe et coopérer à la réussite d'un projet ;
- à assumer une responsabilité individuelle et collective ;
- à travailler en groupe à l'émergence et à la sélection d'idées issues d'un débat et donc favoriser le respect de l'altérité ;
- à développer des compétences relationnelles en lui permettant de savoir communiquer une idée personnelle ou porter la parole d'un groupe ;
- à comprendre les références et besoins divers qui ont conduit à la création d'objets ou de systèmes à partir de l'analyse des « modes », des normes, des lois... ;
- à différencier, par le déploiement de démarches rigoureuses, ce qui relève des sciences et de la connaissance de ce qui relève des opinions et des croyances. L'observation de systèmes réels, l'analyse de leur comportement, de la construction ou de l'utilisation de modèles multiphysiques participent à cet objectif ;
- à observer les faits et situations divers suivant une approche systémique et rationnelle ;
- à adopter un positionnement citoyen assumé au sein de la société en ayant une connaissance approfondie de ses enjeux au sens du développement durable. L'impact environnemental, les

- coûts énergétiques, de transformation et de transport, la durée de vie des produits et leur recyclage, sont des marqueurs associés à privilégier ;
- à réfléchir collectivement à son environnement, aux usages sociaux des objets et aux conséquences induites ;
  - à comprendre les enjeux sociétaux liés au respect de l'égalité républicaine entre hommes et femmes ;
  - ...

Ces différentes approches permettent d'évaluer la posture du candidat par rapport au besoin de transmettre les valeurs et les principes de la République à l'école. La dimension civique de l'enseignement doit être explicite.

Pour prendre en compte cette dimension du métier d'enseignant dans la conception de séquences pédagogiques, les candidats peuvent s'appuyer sur différents textes réglementaires et ressources pédagogiques disponibles :

- les programmes d'enseignement moral et civique ;
- le socle commun de connaissances, de compétences et de culture ;
- l'instruction relative au déploiement de l'éducation au développement durable dans l'ensemble des écoles et établissements scolaires pour la période 2015-2018 (NOR : MENE1501684C, circulaire n° 2015-018 du 4-2-2015, MENESR – DGESCO) ;
- le parcours Avenir (NOR : MENE1514295A, arrêté du 1-7-2015 – JORF du 7-7-2015, MENESR - DGESCO A1-4) ;
- la banque de ressources « Pour une pédagogie de la laïcité à l'école » - Abdenour Bidar - la documentation française 2012 ;
- les ressources numériques en ligne du réseau de création et d'accompagnement pédagogiques CANOPÉ – éducation et société ;
- les ressources du portail national des professionnels de l'éducation – Éduscol – établissements et vie scolaire.