



**Concours de l'enseignement du second degré**  
**Rapport de jury**

---

**AGREGATION**  
**CONCOURS EXTERNE**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES**  
**DE L'INGÉNIEUR**

**Option : ingénierie mécanique**

**Session 2019**

Rapport de jury présenté par : Laurent CHAMPANEY  
Professeur des universités  
Président du jury

## Sommaire

Remerciements	3
Résultats statistiques de la session 2019	4
Avant-propos	5
Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur	7
Rapport du jury de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur	21
Éléments de correction de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	27
Rapport du jury de l'épreuve de modélisation d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	46
Éléments de correction de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	49
Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	64
Exemple de sujet pour l'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique	69
Rapport du jury de l'épreuve d'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique	80
Exemple de sujet pour l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique	89
Rapport du jury de l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique	100
Rapport du jury de l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel	108
Rapport sur la transmission des valeurs et principes de la République	112

## **Remerciements**

Le lycée La Martinière Monplaisir à Lyon a accueilli les épreuves d'admission de cette session 2019 de l'agrégation externe section sciences industrielles de l'ingénieur, option sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique qui se sont déroulées dans de très bonnes conditions du 16 juin au 24 juin 2019 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 madame la Proviseure du Lycée Elisa Lemonnier à Paris qui a accueilli les membres du jury pour la réunion préparatoire du 12 octobre 2018 et la réunion d'admissibilité qui a eu lieu le 6 mai 2019.

## Résultats statistiques de la session 2019

Inscrits	Nombre de postes	Présents aux trois épreuves d'admissibilité	Admissibles	Admis
513*	34	264**	85***	35****

\*dont 107 candidats à l'agrégation marocaine

\*\* dont 54 candidats à l'agrégation marocaine

\*\*\* dont 10 candidats à l'agrégation marocaine

\*\*\*\* 34 candidats sur liste principale et 1 sur liste complémentaire

Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le premier candidat admissible	19
Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le dernier candidat admissible	9,5
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le premier candidat admis	17,7
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le dernier candidat admis	10,6

# Avant-propos

La session 2019 de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur était la troisième pour laquelle la nouvelle option « ingénierie informatique » a partagé les épreuves transversales avec les trois autres options lors de l'admissibilité et de l'admission. Le partage de connaissances et de compétences des agrégés en sciences industrielles de l'ingénieur option ingénierie mécanique avec ceux de l'option ingénierie informatique est un marqueur fort du besoin croissant de compétences numériques en ingénierie mécanique. D'ailleurs, les techniques numériques d'acquisition, d'exploitation et de digitalisation sont maintenant largement exploitées dans les épreuves de travaux pratiques.

Dans cet avant-propos, je souhaite surtout insister sur les éléments d'ordre pédagogique. La direction générale des ressources humaines adresse le rappel suivant aux présidents de concours de recrutement de professeurs : *« Comme vous le savez, les épreuves des concours ont été conçues afin de prendre en compte une évaluation des compétences disciplinaires tout en établissant une professionnalisation progressive de leur contenu. Ainsi, les épreuves d'admissibilité évaluent la capacité du candidat à mobiliser des savoirs et des techniques dans une perspective professionnelle, tandis que les épreuves d'admission évaluent la capacité à élaborer une activité pédagogique à destination des élèves, à investir une situation d'enseignement en tant que futur professeur et à maîtriser des gestes techniques et professionnels »*. Les coefficients doubles des épreuves d'admission et leur définition mettent clairement en évidence la nécessité d'axer la préparation sur l'élaboration de séquences pédagogiques. Les compétences acquises en ingénierie pédagogique via cette préparation seront ré-exploitablement quelles que soient les futures activités de formation des candidats. D'autre part, les sciences industrielles de l'ingénieur exigent une didactique spécifique qu'il s'agit de maîtriser et de mettre en œuvre lors des épreuves orales de l'agrégation.

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

Il est conseillé aux futurs candidats et à leurs formateurs de lire attentivement la définition des épreuves, décrite dans l'arrêté du 25 novembre 2011 (publié au JORF du 10 janvier 2012) et dans l'arrêté du 25 juillet 2014 (publié au JORF du 12 août 2014) modifiant l'arrêté du 28 décembre 2009 fixant les sections et les modalités d'organisation des concours de l'agrégation, ainsi que les commentaires du jury qui figurent dans le présent rapport. Cette session 2019 répondait aux attentes de l'arrêté du 19 avril 2013 modifié par un arrêté du 19 avril 2016 fixant certaines modalités de l'organisation des concours de recrutement des personnels enseignants du second degré relevant du ministre chargé de l'éducation nationale. Les programmes des lycées généraux et technologiques changeant à la rentrée 2019, un nouvel arrêté est en cours de publication pour la session 2020.

La description de chaque épreuve des concours prévoit qu'« au cours de l'entretien qui suit l'exposé du candidat, la perspective d'analyse de situation professionnelle définie par l'épreuve est élargie à la capacité du candidat à prendre en compte les acquis et les besoins des élèves, à se représenter la diversité des conditions d'exercice de son métier futur, à en connaître de façon réfléchie le contexte dans ses différentes dimensions (classe, équipe éducative, établissement, institution scolaire, société) et les valeurs qui le portent, dont celles de la République ». Il est demandé à tous les présidents des concours de recrutement « de veiller à ce que dans ce cadre, les thématiques de la laïcité et de la citoyenneté trouvent toute leur place » afin « que l'École soit en mesure, par la formation et le recrutement de nos futurs enseignants, de valider la mission première que lui fixe la Nation, à savoir de transmettre et de faire partager aux élèves les valeurs et principes de la République ainsi que l'ensemble des dispositions de la Charte de la laïcité, portant notamment égale dignité de tous les êtres humains et liberté de conscience de chacun ». Globalement, les candidats ont réagi correctement aux questions posées.

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

Cette session 2019 est dans la continuité des précédentes puisque 34 candidats ont été déclarés admis alors que 264 ont participé aux trois épreuves d'admissibilité. Le nombre de femmes candidates est toujours faible mais elles ont mieux réussi que les hommes cette année : 9 ont été déclarées admissibles et sept sont admises, ce qui représente près de 20% des reçus. Un candidat a été proposé sur liste supplémentaire.

Cette session s'est encore révélée être d'un excellent niveau, les candidats admis ayant quasiment tous plus de 11/20 et cinquante candidats ont obtenu une moyenne supérieure à 09/20. Le jury félicite les candidats et leurs formateurs. Cette année encore, 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 irréprochables. Le jury reste vigilant sur ce dernier aspect et invite les candidats à avoir une tenue et une posture adaptées aux circonstances particulières d'un concours de recrutement de cadres de catégorie A de la fonction publique qui, lorsqu'ils seront en poste, seront porteurs de l'image de leur discipline et de celle de l'institution. Au moment où les valeurs de la République sont mises en avant jusque dans les questions posées aux candidats lors des épreuves d'admission, il est heureux de voir que les candidats ont adapté leur posture, en particulier lors des échanges avec le jury. Celui-ci a aussi apprécié que ceux qui ne se sont pas présentés à l'oral avaient pris soin de prévenir de leur absence alors que cela n'était pas forcément le cas les années précédentes.

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

Laurent CHAMPANEY, Président du jury

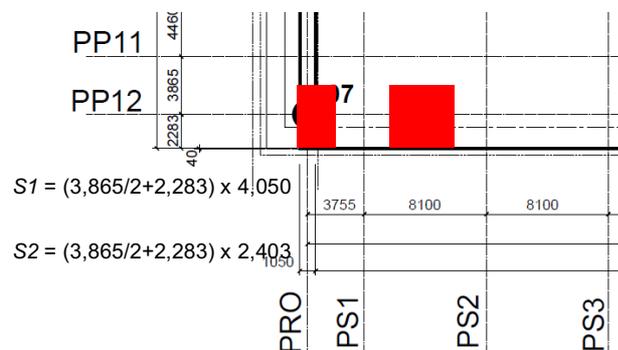
# Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

## Étude de la structure du plateau mobile

### Pré dimensionnement d'une poutre principale du plateau

#### Question 1

Les surfaces et les longueurs d'influence des éléments sont évaluées à partir des surfaces et des longueurs d'influence des éléments sur chaque nœud :



$F_{1-2} = S1 \times \text{charge majorée}$

$$F_{1-2} = \left( \left( \frac{3,865}{2} + 2,283 \right) \times 4,05 \right) \times (8,43 \times 1,33 + 0,5 \times 1,5) = 204,2 \text{ kN}$$

Pour  $F_2$ ,  $S2$  est déterminée, au choix, à partir de la figure 8 ou à partir du DT2. Selon le cas, le résultat est :

$$F_2 = S2 \times \text{charge surfacique majorée}$$

Figure 8:  $F_2 = \left( \left( \frac{3,865}{2} + 2,283 \right) \times 1,876 \right) \times (8,43 \times 1,33 + 0,5 \times 1,5) = 94,6 \text{ kN}$

DT2:  $F_2 = \left( \left( \frac{3,865}{2} + 2,283 \right) \times 2,403 \right) \times (8,43 \times 1,33 + 0,5 \times 1,5) = 121,2 \text{ kN}$

#### Question 2

Les réactions aux appuis en A et B peuvent être déterminées par application du Principe Fondamental de la Statique (PFS) en isolant, comme système, le treillis complet :

$X_A = 0$  (pas de composante de force selon  $\vec{x}$ )

$$Y_A = Y_B = -(-204,2 \times 17 - 94,6 \times 2 - 111,7 \times 2 - 152,5 \times 9) / 2 = 2\,628,2 \text{ kN (ou } 2\,654,8 \text{ kN si DT2)}$$

#### Question 3

Les intensités des efforts normaux dans la diagonale la plus sollicitée, soit la barre 3, sont déterminées en utilisant le Principe Fondamental de la Statique par une méthode de résolution au choix.

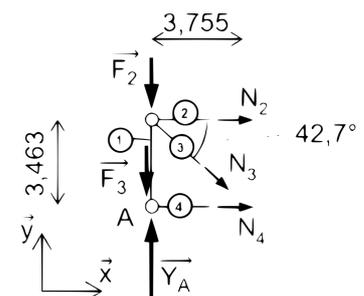
Seul l'équilibre des efforts selon  $\vec{y}$  est nécessaire pour résoudre :

$$\sum \vec{F} \cdot \vec{y} = 0$$

Projection  $Y_A - F_2 - F_3 - N_3 \cdot \sin(42,7^\circ) = 0$

AN :  $N_3 = \frac{(2\,628,2 - 94,6 - 111,5)}{\sin(42,7^\circ)}$

$$N_3 = 3\,571,5 \text{ kN (idem si DT2)}$$



Le résultat est positif, la barre 3 est tendue.

#### Question 4

Les contraintes normales sont obtenues par la relation  $\sigma = \frac{N}{S}$  pour chaque barre.

La démarche étant réalisée vis-à-vis de la rupture (à l'ELU : Etats Limites Ultimes), la limite à la rupture est utilisée pour le coefficient de sécurité (« Le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture »).

Coefficient de sécurité =  $\frac{f_u}{\text{abs}(\sigma)}$  :

	$\sigma$ (Mpa)	$N$ (kN)	Sections (mm <sup>2</sup> )	$F_u$ (Mpa)	Coef. sécurité
27(sup)	-129,3	-13 130,5	101 590	470	3,64
26(inf)	172,3	12 921,8	75 000	470	2,73
3(diag)	178,6	3 571,3	20 000	470	2,63
23(mont)	-34,0	-204,2	6 000	470	13,81

Les coefficients de sécurité sont tous supérieures à 2,5. Le pré dimensionnement est validé.

#### Question 5

Les phénomènes mécaniques à évaluer et à contrôler sont les suivants :

- flambement des barres (diagonales et montants) ;
- cisaillement des barres (accepter efforts tranchants et contraintes tangentielles) ;
- déformations et déplacements limités. Démarche ELS (États limites de service) ;
- qualité des liaisons entre barres (visseries, soudures) ;
- fluage ;
- torsion ;
- déversement.

### Simulation et analyse des sollicitations dans la poutre principale PP12 - modèle aux éléments finis

#### Question 6

D'après les résultats des simulations, le critère de Von Mises est respecté pour l'ensemble des éléments étudiés.

	$\sigma$ (Mpa)	$\tau$ (Mpa)	Von Mises (Mpa)
Memb. sup.	174	22	178
	153	41	169
Memb. inf.	89	11	91
	19	27	50
Diagonales	281	129	<b>359</b>
	210	72	244

La limite élastique de l'acier est  $f_y = 355$  MPa. Les membrures supérieure et inférieure semblent correctement dimensionnées pour l'étude du levage. On constate qu'une diagonale est sous dimensionnée : la diagonale 7.

### Question 7

Augmenter de 20 % la section assure la diminution de la contrainte normale dans la diagonale en des proportions équivalentes, soit une contrainte normale de 225 MPa dans l'élément le plus sollicité.

La contrainte de cisaillement diminue également, donc la contrainte de Von Mises maximale est de 317 MPa. Ce qui permet de valider le critère.

### Question 8

Liste des exigences à vérifier :

- le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture pour le pré dimensionnement soit 2,5 aux ELU. Ce critère est respecté ;
- la limite élastique de l'acier est 355 MPa. Cette limite élastique ne doit jamais être dépassée, lors du levage, dans toutes les configurations de chargement possibles. Ce critère est respecté dans les membrures inférieures et supérieures. En revanche, ce critère n'est pas respecté dans le cas des diagonales. Une solution possible est de remplacer les HEM240 par des HEM280.

Le modèle aux éléments finis permet de réaliser une étude en tenant compte :

- des efforts tranchants dans les éléments constitutifs du plateau ;
- des moments fléchissants dans les éléments constitutifs du plateau ;
- d'une étude mécanique tridimensionnelle en tenant compte de la tôle, des augets, des poutres secondaires, des poutres de rive ;
- d'une approche des charges extérieures appliquées au plateau, plus proche de la réalité et dans différentes configurations ;
- des efforts horizontaux appliqués au plateau, lors du recentrage et lors du début de la translation.

### Étude du cycle de chauffe du fluide du système hydraulique de levage

#### Étude du cycle de chauffe au sein du cycle de levage

### Question 9

Risque d'échauffement :

- lors de la descente gravitaire au cours de laquelle le fluide est « laminé » au travers du régulateur de débit (élévation peu importante de la température) ;
- lors du levage à pleine charge ;
- s'il y a dysfonctionnement d'un groupe motopompe qui fonctionnerait à pleine puissance un long moment.

Conséquences : s'il y a échauffement (Capteurs T\_EST\_25) ou défaut capteur (T\_EST), les conditions permanentes ne seront pas validées.

### Question 10

Le calcul du temps nécessaire pour le chauffage des lignes prend en compte les volumes d'huile dans les circuits aller et retour et la nécessité de parcourir 10 fois la ligne avant d'atteindre la température en régime permanent :

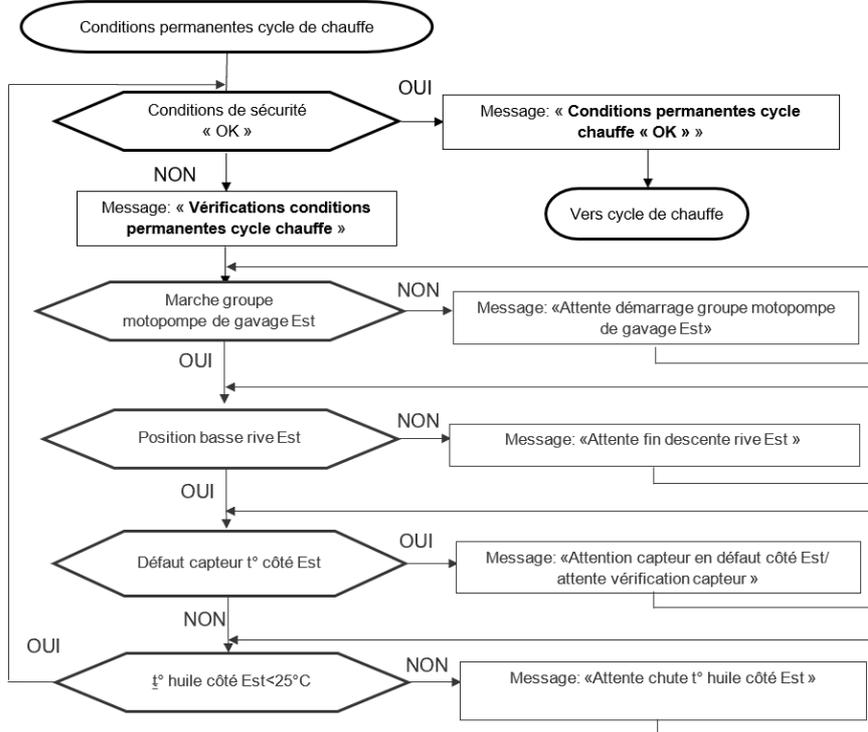
- circuit aller  $2,1 \times 75 = 157,5$  litres ;
- circuit retour  $(4,6 + 2,1) \times 75 = 502,5$  litres ;
- volume total équivalent pour 10 parcours, 6 600 litres.

Pour un débit total de  $260 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ , il faut une durée de chauffe de 25,4 min soit 1 524 s.

La consigne de programmation de 1 800 s est supérieure à celle nécessaire à la régénération prévue afin d'assurer la température requise de 12°C en tout point du circuit et ainsi prendre en compte les pertes de charges. L'écart provient aussi de l'approximation faite sur le débit estimé.

### Question 11

Le logigramme de vérification des conditions permanentes du fonctionnement d'un cycle de chauffe pour la rive Est permet de faire apparaître les messages à afficher sur l'écran de l'IHM de façon à guider l'opérateur dans le suivi des étapes.



### Question 12

On trouve ci-après la liste des variables nécessaires à la mise en place d'un algorithme de commande du cycle de chauffe de la rive Est.

Variables identifiées à partir de l'IHM :

BP_OMCC (Bouton Poussoir Ordre de Marche Cycle de Chauffe)	binaire
tempo_chauffe_lignes	entier
BP_OACC (Ordre d'Arrêt Cycle de Chauffe)	binaire
tempo_chauffe_bloc	entier
tempo_filtration	entier

Variables identifiées à partir du séquençement :

GMPGAV_ES	binaire
EST_BAS	binaire
T_EST_25	binaire
T_EST: binaire ou TEMP_°C_EST	flottant

Variables identifiées à partir des documentations techniques :

EV_RD	binaire
EV_SA	binaire
EV_N	binaire
EV_IG	binaire
GMPHP	binaire

### Question 13

La liste des conditions initiales nécessaires à la mise en place d'un algorithme de commande du cycle de chauffe de la rive Est est donnée ci-dessous.

Conditions initiales des variables identifiées à partir de l'IHM :

```
BP_OMCC=0
tempo_chauffe_ligne = 1800
BP_OACC=0
tempo_chauffe_bloc = 1800
tempo_filtration = 60
```

Conditions initiales des variables identifiées à partir du séquençement :

```
GMPGAV_EST=0
EST_BAS=1
T_EST_25=1 ou TEMP_°C_EST <25
T_EST=1
```

Conditions initiales des variables identifiées à partir des documentations techniques :

```
EV_RD=0
EV_SA=0
EV_N=0
EV_IG=0
GMPHP=0
```

L'initialisation de la consigne de température est également possible : température\_chauffe = 12.

### Question 14

L'algorithme permettant la gestion de l'état de BP\_OMCC consiste en une boucle d'attente du bouton poussoir d'ordre de marche de type « Tant que » en ayant au préalable précisé les conditions initiales. Par exemple :

```
Tant que BP_OMCC est égal à 0
|
Fin tant que
programme « cycle de chauffe »
```

### Question 15

L'algorithme partiel du cycle de chauffe consiste par exemple en l'utilisation de deux boucles de type « tant que » pour la gestion des variables GMP\_GAV et EV\_RD.

sous-programme « cycle de chauffe »

début

```
|
|
|   toptime = time
|   Tant que (time - toptime) < tempo_filtration
|   |       Afficher («Filtration en cours »)
|   |       GMP_GAV = 1
|   Fin tant que
|
```

```

|       Tant que TEMP_°C_EST < 12°C
|       |       Afficher («Chauffage réservoir en cours »)
|       |       GMP_GAV = 1
|       |       EV_RD = 1
|       Fin tant que
|
|       .....
|
fin

```

## Étude du capteur de température et de la transmission de données

### Question 16

Une étude classique du pont de Wheatstone permet d'établir :

$$U_{CB} = \frac{R_{Pt100}}{R + R_{Pt100}} U_{cc} \text{ (diviseur de tension)}$$

$$U_{DB} = \frac{R'}{R + R'} U_{cc} \text{ (diviseur de tension)}$$

$$U_{mes} = U_{CB} - U_{DB} = \left( \frac{R_{Pt100}}{R + R_{Pt100}} - \frac{R'}{R + R'} \right) U_{cc}$$

Le pont est dit équilibré lorsque  $U_{mes} = 0$  c'est-à-dire lorsque  $R' = R_{Pt100}$

$$R_{Pt100}(-10^\circ) \approx 100 \times (1 + 3,98 \cdot 10^{-3} \times (-10)) = 96 \Omega$$

Conclusion : pour obtenir  $U_{mes} = 0$  V à  $-10^\circ\text{C}$ , il faut choisir  $R' = 96 \Omega$ .

### Question 17

Une relation de type pont diviseur de tension permet d'écrire :

$$U_r = \frac{R_{r1}}{2R_{L1} + R_{r1}} \cdot U_t = \frac{1}{1 + \frac{2R_{L1}}{R_{r1}}} \cdot U_t \approx \left( 1 - \frac{2R_{L1}}{R_{r1}} \right) \cdot U_t \text{ avec } R_{r1} \text{ supposée grande devant } R_{L1}.$$

$$\varepsilon\% = \frac{U_t - U_r}{U_t} \times 100 = \frac{2R_{L1}}{R_{r1}} \times 100$$

AN : pour une distance de 150 m,  $R_{L1} = 0,1 \times 150 = 15 \Omega$  et  $\varepsilon\% = \frac{2 \times 15}{2500} \times 100 = 1,2 \%$ .

Conclusion : l'erreur de liaison est supérieure à la condition sur la tension au niveau du récepteur. De plus, cette erreur est fonction de la longueur de fil, ce qui n'est pas satisfaisant.

### Question 18

Application de la loi des mailles :  $U_s = U_{DC} - R_{r2} \cdot I_b$

Valeur de tension minimale :  $U_{smax} = U_{DC} - R_{r2} \cdot I_{b\_min} = 24 - 500 \times 4 \cdot 10^{-3} = 22$  V

Valeur de tension maximale :  $U_{smin} = U_{DC} - R_{r2} \cdot I_{b\_max} = 24 - 500 \times 20 \cdot 10^{-3} = 14$  V

La plage de tension indiquée par le constructeur étant de 12 V à 30 V. L'exigence est vérifiée.

### Question 19

Pour respecter la valeur minimale de 12 V en sortie du conditionneur, il faut s'assurer que la chute de tension liée aux fils de la boucle n'excède pas 2 V.

Soit  $L$  la longueur maximale de boucle, pour un courant maximal de 20 mA, on a :

$$U_{smin} = 14 \text{ V} = U_{DC} - R_{r2} \cdot I_{b\_max} - 2 \cdot L \cdot 0,1 \cdot I_{b\_max}$$

D'où

$$L = \frac{14 - 12}{2 \times 0,1 \times 20 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ m.}$$

Cette distance est nettement supérieure aux 150 m qui séparent le capteur de l'automate de contrôle. Cette solution est donc valide.

### Question 20

Soit  $I_b$  l'intensité du courant dans la boucle 4-20 mA.

Avantages d'une transmission analogique par boucle de courant :

- transmission sur de grande distance. Le courant est constant le long d'un câble et ne dépend pas de la longueur de la ligne ;
- très bonne immunité aux bruits électromagnétiques (fils torsadés) ;
- seulement 2 fils pour l'alimentation du capteur et le codage de l'information ;
- détection de panne du capteur intégrée (lorsque  $I_b < 4$  mA ou  $I_b > 20$  mA). La détection du défaut capteur est gérée dans les conditions permanentes.

## Étude du levage du plateau mobile

### Dimensionnement du système hydraulique de levage

#### Question 21

Pour l'huile référencée PANOLIN HLP SYNTH 32, courbe bleue, les valeurs de viscosité sont :

- 150 cST à 0°C pour la température minimale en salle hydraulique ;
- 50 cST à 20°C pour la température ambiante normale ;
- 22 cST à 40°C pour la température maximale de fonctionnement normal ;
- 14 cST à 60°C pour la température de coupure du circuit.

La viscosité dynamique étant une fonction décroissante de la température, la viscosité retenue pour le modèle de dimensionnement est celle correspondant à la température minimale de la salle hydraulique (soit 0°C) et donc une viscosité de 150 cST.

#### Question 22

Vérification des données numériques pour la portion de ligne hydraulique V4/V3 :

- vitesse moyenne d'écoulement

$$v_m = 4 \times \frac{Q_v}{\pi D^2} = 4 \frac{210 \cdot 10^{-3} / 60}{\pi \times (50,80 \cdot 10^{-3})^2} = 1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1};$$

- avec  $u = 150 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- nombre de Reynolds :

$$R_e = \frac{v_m D}{u} = \frac{1,7 \times 50,80 \cdot 10^{-3}}{150 \cdot 10^{-6}} = 576 ;$$

- pertes de charge régulières

$$\lambda = \frac{64}{R_e} = \frac{64}{576} = 0,11$$

et

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v_m^2 L}{2 D} = 0,35 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 0,35 \text{ bar.}$$

Au total, les pertes de charges régulières de la ligne de gavage s'élèvent à  $\Delta p = 0,09 + 0,20 + 0,38 + 0,42 + 0,40 + 1,40 = 2,89$  bar.

La valeur retenue pour le dimensionnement par le bureau d'études (2,9 bars) est cohérente.

#### Question 23

La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, filtre électrovanne etc.) provoque les pertes de charge accidentelles ou singulières.

#### Question 24

Il faut appliquer le théorème de Bernoulli entre (1) le point d'aspiration et (2) l'entrée de la pompe de levage V6 la plus éloignée de la centrale.

$$\underbrace{\left(p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2\right)}_{\text{charge à la sortie}} - \underbrace{\left(p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1\right)}_{\text{charge à l'entrée}} = \underbrace{\frac{P_H}{Q_v}}_{\text{pression hydraulique de la pompe}} - \underbrace{\Delta p}_{\text{perte de charge}}$$

Calcul des pertes de charges totales :  $\Delta p_{\text{total}} = 2,9 + 14 + 2 + 1 + 1 + 1 = 21,9 \text{ bar}$

Données en aval de la ligne de courant :  $p_2 = 10^5 \text{ Pa}$  ;  $v_2 = 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $z_2 = -7 \text{ m}$  ;

Données en amont de la ligne de courant :  $p_1 = 1,9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  ;  $v_1 = 3,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $z_1 = 0 \text{ m}$  ;

$\rho g = 0,93 \times 1000 \times 10 = 9300 \text{ Pa}\cdot\text{m}^{-1}$

$$\frac{P_H}{Q_v} = (p_2 - p_1) + \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(z_2 - z_1) + \Delta p_{\text{total}}$$

$$\frac{P_H}{Q_v} = (1 - 1,9) \cdot 10^5 + \frac{1}{2} \times 0,93 \times 1000 \times (0,6^2 - 3,4^2) + 0,93 \times 1000 \times 10 \times (-7 - 0) + 21,9 \cdot 10^5$$

$$\frac{P_H}{Q_v} = 20,3 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 20,3 \text{ bar}$$

Avec une majoration de 20 %, la valeur de pression est alors de 24,4 bar. Le choix d'une pompe de 30 bar est validé.

### Validation mécanique d'un choix de vérin

#### Question 25

Les efforts  $\vec{F}_L$  et  $\vec{F}_T$  s'appliquent en tête de tige de vérin et sont les valeurs maximales en situation dégradée. Le cas le plus défavorable correspond à la situation dégradée 12 sur le vérin 2.

D'après la figure 21 :  $\|\vec{F}_L\| = 9412 \text{ kN}$  ;  $\|\vec{F}_T\| = 188 \text{ kN}$ .

#### Question 26

L'application du PFS sur la poutre donne :

$$X_A = F_L \quad Y_A = F_T \cdot a/L \quad Y_B = -F_T \cdot (L+a)/L$$

Considérons une section droite S de la poutre et un point G d'abscisse x, le centre de surface de S. Soit E<sub>1</sub> le tronçon de la poutre compris entre les points A et B. L'équilibre de E<sub>1</sub> au point G se traduit par :

$$\{T(\vec{E} \rightarrow E_1)\} + \{T_{\text{coh}}\} = \{0\}$$

D'où

$$\{T_{\text{coh}}\} = -\{T(\vec{E} \rightarrow E_1)\}$$

Pour le tronçon E<sub>1</sub>, entre A et B :

$$N(x) = -F_L$$

$$V_y(x) = -F_T \cdot a/L$$

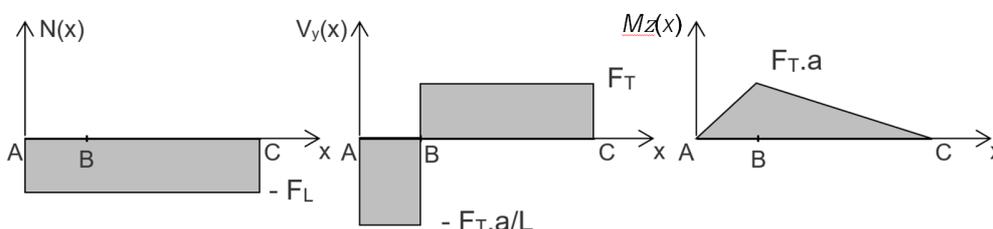
$$M_z(x) = F_T \cdot (a/L) \cdot x$$

Pour le tronçon E<sub>2</sub>, entre B et C :

$$N(x) = -F_L$$

$$V_y(x) = F_T$$

$$M_z(x) = -F_T \cdot x + F_T \cdot (L+a)$$



#### Question 27

Soit  $v(x)$  est le déplacement de la poutre selon  $\vec{y}$  en fonction de x.

La relation de comportement :

$$E \cdot I_z \cdot \frac{d^2 v}{dx^2} = M_z(x)$$

permet de calculer la flèche. L'expression de  $v(x)$  peut alors être déterminée en intégrant deux fois la relation  $\frac{M_z(x)}{E \cdot I_z}$  dans le tronçon AB et dans le tronçon BC.

La détermination des 4 constantes d'intégration est obtenue en utilisant les conditions aux limites :

$$\text{- tronçon AB} \quad v_{AB}(0) = 0 \quad \text{et} \quad v_{AB}(L) = 0 ;$$

- tronçon BC  $v_{BC}(L)=0$  ;
- continuité de  $v'(L)$  à l'interface entre les deux tronçons  $v'_{AB}(L) = v'_{BC}(L)$ .

La flèche au point C est égale à  $v(L+a)$ .

Ce même résultat peut être obtenu par d'autres méthodes : méthode des déplacements, intégrales de Mohr, etc.

### Question 28

La tige du vérin est un tube de diamètres extérieur 580 mm et intérieur 410 mm.

Le moment quadratique d'un tube est  $\frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}$  car les disques formant le tube sont concentriques au point G. Soit  $4 \cdot 170 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$ .

### Question 29

Une application numérique à partir des données permet de déterminer la valeur du déplacement de la poutre au point C :

$$\frac{F_T \cdot a^2 \cdot (a+L)}{3 \cdot E \cdot I_z} = \frac{188\,000 \times 6,436^2 \times (6,436 + 1,332)}{3 \times 210 \cdot 10^9 \times 4,167 \cdot 10^{-3}} = 0,024 \text{ m soit } 24 \text{ mm}$$

Ce déplacement est inférieur à 50 mm et conforme aux exigences.

### Validation de la pression de fonctionnement du groupe motopompe haute pression de levage

#### Question 30

Lecture du diamètre d'alésage sur le DT6 :  $d_{\text{alésage}} = 640 \text{ mm}$ .

Surface de répartition de l'effort de levage :

$$S = \pi \frac{d_{\text{alésage}}^2}{4} = \pi \times 0,320^2 = 0,322 \text{ m}^2.$$

Deux possibilités de validation :

- calcul de l'effort maximal à partir de la pression maximale 350 bar
 
$$F_{\text{max}} = P_{\text{max}} \cdot S = 11\,300 \text{ kN} > 9\,500 \text{ kN}$$
- calcul de la pression nécessaire en prenant un effort de 9 500 kN
 
$$P = \frac{F}{S} = 295 \text{ bar} < 350 \text{ bar}$$

### Validation du choix du transformateur HT/BT du poste énergie levage

#### Question 31

À partir des données, il est possible de calculer la puissance électrique absorbée par chaque moteur  $P = \frac{P_u}{\eta}$  :

- groupe motopompe gavage (GMP GAV) avec  $P = \frac{P_u}{\eta} = \frac{33}{0,89} = 37 \text{ kW}$  ;
- groupe motopompe haute pression levage (GMP HP) avec  $P = \frac{P_u}{\eta} = \frac{16,5}{0,89} = 18,5 \text{ kW}$ .

De même, la puissance réactive associée à chaque charge est obtenue par la relation  $Q = P \tan \varphi$  :

- groupe motopompe gavage (GMP GAV),  $\cos \varphi = 0,9$  avec  $Q = 17,9 \text{ kVAR}$
- groupe motopompe haute pression levage (GMP HP),  $\cos \varphi = 0,85$  avec  $Q = 11,5 \text{ kVAR}$

Bilan de puissance (théorème de Boucherot) : la puissance active/réactive totale est égale à la somme des puissances actives/réactives. Ici, on doit compter 2 GMP GAV et 12 GMP HP, avec

$$P_t = 2 \times 37 + 12 \times 18,5 = 296 \text{ kW}$$

$$Q_t = 2 \times 17,9 + 12 \times 11,5 = 174 \text{ kVAR}$$

On en déduit alors la puissance apparente totale  $S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} = 343 \text{ kVA}$ .

Le choix d'un transformateur de puissance apparente 500 kVA est validé.

### Question 32

Conversion vitesse :  $70 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Puissance utile en sortie :  $P_u = \eta \cdot P_t = 12 \cdot F \cdot v = 12 \times 9500 \cdot 10^3 \times 1,17 \cdot 10^{-3} = 133,4 \text{ kW}$ .

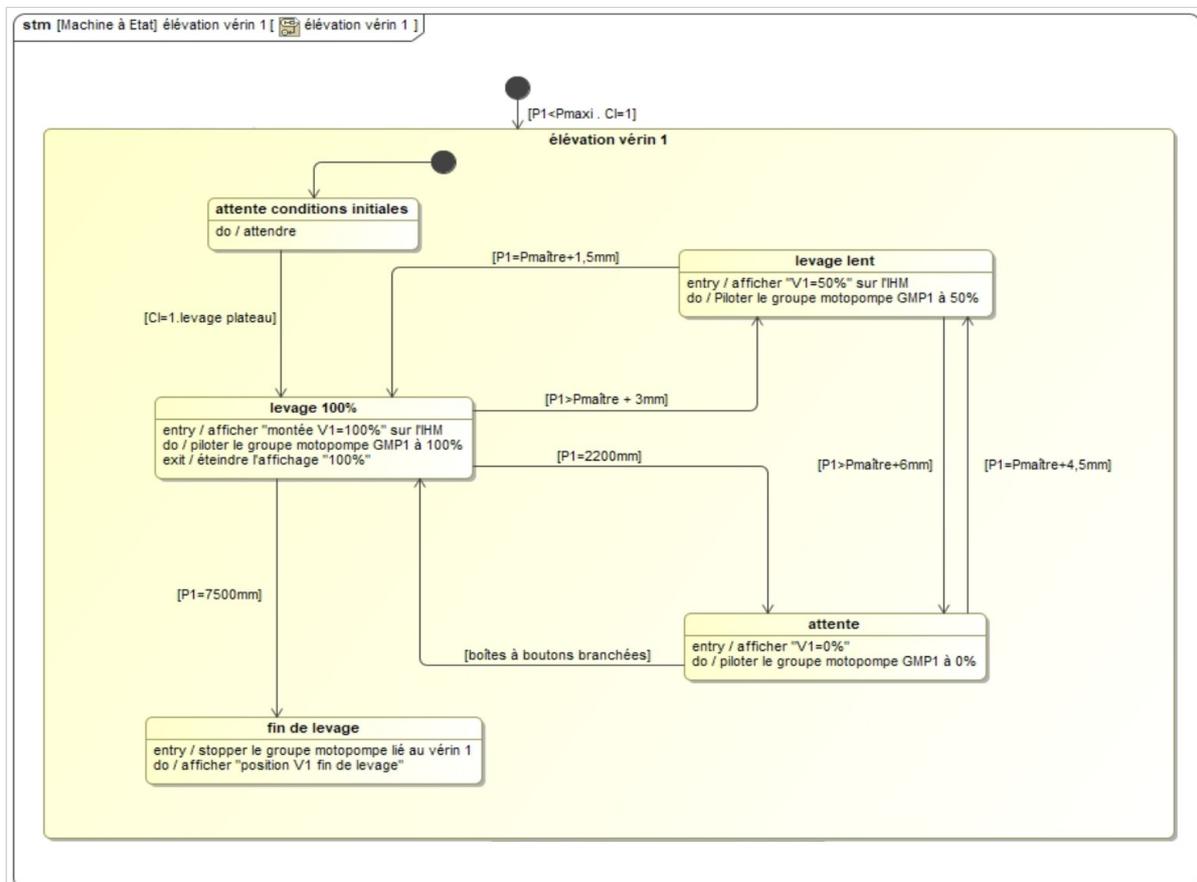
D'où l'effort au niveau de chaque vérin :

$$F = \frac{\eta \cdot P_t}{12 \cdot v} = \frac{0,45 \times 296 \cdot 10^3}{12 \times 1,17 \cdot 10^{-3}} = 9\,490 \text{ kN}.$$

Conclusion : le système est correctement dimensionné pour  $F = 9\,500 \text{ kN}$  soit  $P = 11\,080 \text{ W}$  pour un seul vérin.

## Étude de la synchronisation en position des vérins en phase de levage

### Question 33



Notations

P1 : position du vérin 1

Cl : conditions initiales (non détaillées ici)

## Étude de l'acquisition de la position des vérins

### Question 34

Résolution du capteur :  $r = \frac{5\,700}{(2^n - 1)}$  et  $r \leq 5 \mu\text{m}$  d'où un nombre de bits nécessaire de codage  $n \geq 21$  bits.

Le capteur doit transmettre au minimum 21 bits de données.

### Question 35

#### Capacité de transmission

En SSI24 le format de transmission est de 24 bits, en tenant compte du bit de parité et des bits 22 et 23 qui sont à 0. Il y reste bien 21 bits disponibles pour coder une position.

#### Résolution du capteur

La course du capteur étant de 6 350 mm, sa résolution est de

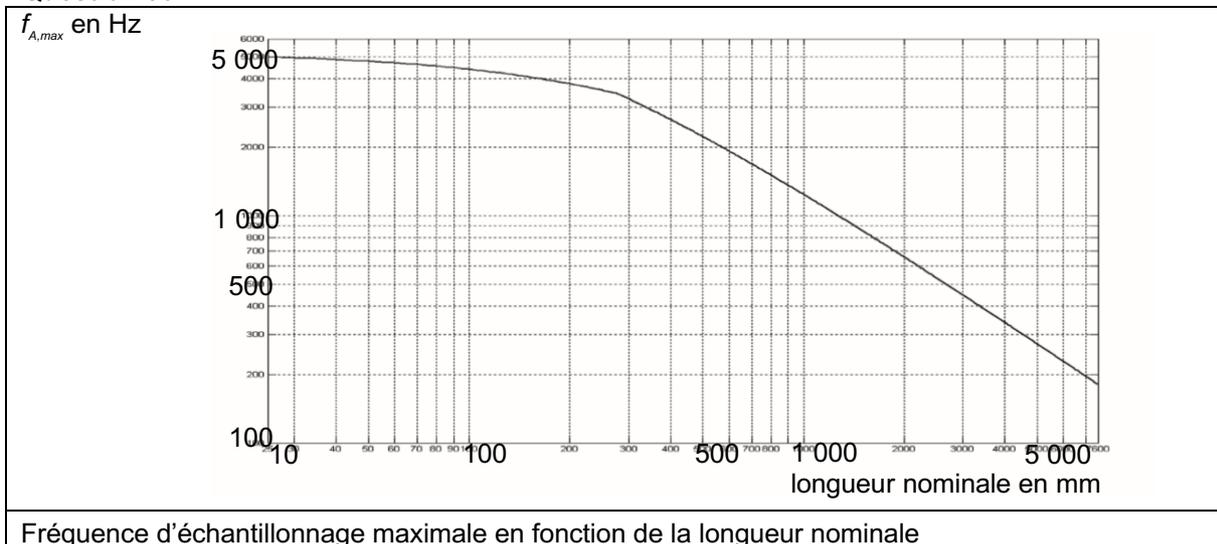
$$\frac{6\,350}{(2^{21}-1)} = 3,02 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

soit  $r \leq 5 \mu\text{m}$  donc la résolution du capteur est valide.

#### Principe et intérêt du bit de parité

Le bit de parité (paire ou impaire) permet de vérifier la justesse du message en comptant le nombre de bits à 1 et en indiquant par un 0 (ou un 1) si ce nombre est pair ou impair. Il s'agit d'une méthode de vérification de message transmis en détectant une éventuelle erreur de transmission durant la communication.

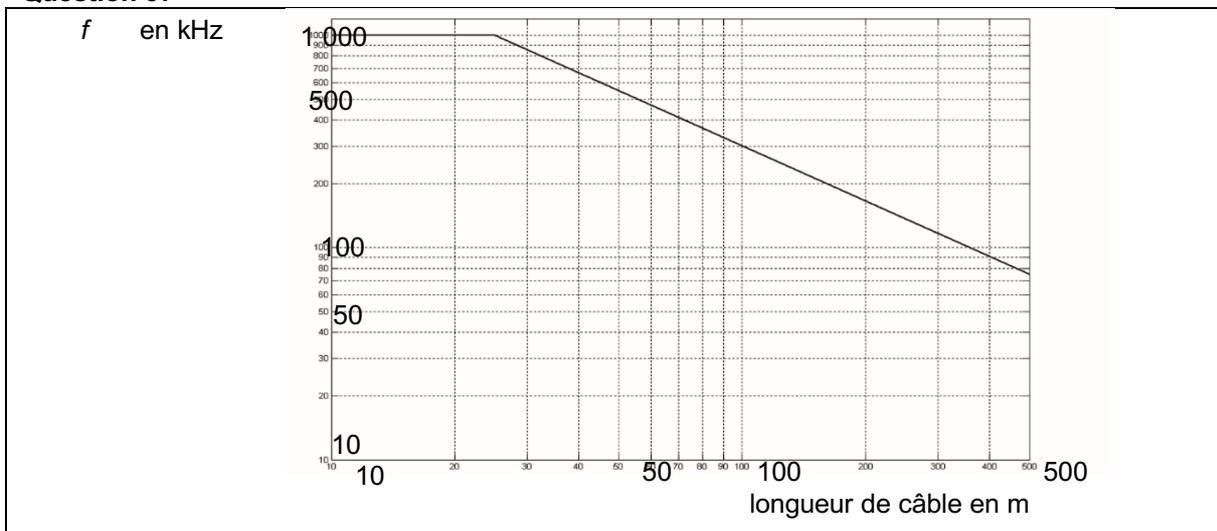
### Question 36



Fréquence d'échantillonnage maximale en fonction de la longueur nominale

Dans le pire des cas on a :  $f_{A,max} > 150 \text{ Hz}$  soit  $T_{A,min} > 0,006 \text{ s}$  donc  $T_{A,min} > 0,016 \text{ s}$ . Le comportement synchrone est validé.

### Question 37



Fréquence d'horloge SSI en fonction de la longueur de câble

Dans le pire des cas  $75 \text{ kHz} < f_{CLK,max} < 1\ 000 \text{ kHz}$  donc  $0,001 \text{ ms} < T_{CLK,max} < 0,013 \text{ ms}$ .

Or, pour une transmission complète des données il faut

$$24 \cdot T_{CLK,max} + 2 \cdot T_{CLK,max} = 26 \times 0,013 \cdot 10^{-3} = 0,347 \text{ ms}$$

Cette durée est suffisante pour assurer la transmission et le traitement des données avant la fin d'une période d'échantillonnage ( $T_{A,min} = 0,006 \text{ s}$ ).

Les exigences de fonctionnement (synchrone), de résolution ( $r \leq 5 \mu\text{m}$ ), de durée de transmission ( $T_{A,min} > 24 \cdot T_{CLK,max}$ ) et de course (course capteur > course vérin) sont validées.

### Question 38

Position à coder : position initiale + 6 = 200 + 6 = 206 mm.

Avec une résolution de  $5 \mu\text{m}$ , il faut coder

$$(41200)_{10} = (1010000011110000)_2 = (1111000010001000)_{\text{gray}}$$

La trame transmise par le capteur d'un vérin à la limite du passage de la commande de 50 % à 0 % doit être : 00 000001111000010001000.

### Synthèse phase de levage

### Question 39

Le diagramme des blocs internes partiel est le suivant :

### Question 40

L'effort total supporté par le chariot rouleur le plus chargé en mode nominal est :  $228,6 \cdot 10^4 + 58,1 \cdot 10^4 \times 4 = 4,61 \cdot 10^6 \text{ N}$ .

Conclusion : les bras ne peuvent pas supporter cette charge au regard du cahier des charges. Il est nécessaire de mettre en place un dispositif qui répartit les surcharges sur l'ensemble des bras de façon équitable.

### Question 41

L'équation de continuité pour les 2 chambres, dans le cas où le fluide est compressible, est :

$$Q_1 = S \frac{dz(t)}{dt} + \frac{V_1}{\beta} \frac{dP_1(t)}{dt} \quad \text{et} \quad Q_2 = S \frac{dz(t)}{dt} - \frac{V_2}{\beta} \frac{dP_2(t)}{dt}$$

En appliquant le théorème de la résultante dynamique appliqué à la tige du vérin en projection selon  $\vec{z}$ , on trouve :

$$-m \frac{d^2z(t)}{dt^2} = -S \cdot P_1(t) + S \cdot P_2(t) + F_z(t) + f_v \frac{dz(t)}{dt}$$

Dans le domaine de Laplace :

$$Q_1(p) = S \cdot p \cdot Z(p) + \frac{V_1}{\beta} \cdot p \cdot P_1(p) \quad \text{et} \quad Q_2(p) = S \cdot p \cdot Z(p) - \frac{V_2}{\beta} \cdot p \cdot P_2(p) ;$$

En exprimant les deux pressions  $P_i(p)$ , et en remplaçant dans l'expression du théorème de la résultante :

$$\left[ m \cdot p^2 + f_v p \right] \cdot Z(p) = S \cdot \frac{\beta}{V_1 p} [Q_1(p) - S p \cdot Z(p)] - S \cdot \frac{\beta}{V_2 p} [-Q_2(p) + S p \cdot Z(p)] + F_z(p)$$

L'expression peut se factoriser sous la forme :

$$Z(p) \left[ mp^2 + f_v p + \beta S^2 \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \right] - F_z(p) = \frac{\beta S}{p} \left[ \frac{V_2 Q_1(p) + V_1 Q_2(p)}{V_1 V_2} \right]$$

#### Question 42

Par simplification de l'expression précédente (1) :

$$Z(p) \left[ mp^2 + f_v p + \frac{2\beta S^2}{V_0} \right] - F_z(p) = \frac{\beta S}{p} \left[ \frac{2 Q(p)}{V_0} \right]$$

La fonction de transfert est de la forme :  $Z(p) = H_1(p)Q(p) + H_2(p)F_z(p)$

$$Z(p) = \frac{2\beta S}{p(2\beta S^2 + V_0 p(mp + f_v))} Q(p) + \frac{V_0 p}{p(2\beta S^2 + V_0 p(mp + f_v))} F_z(p)$$

#### Question 43

L'expression de  $Z(p)$  étant donnée par :

$$Z(p) = \frac{2\beta S}{p(2\beta S^2 + V_0 p(mp + f_v))} Q(p) + \frac{V_0 p}{p(2\beta S^2 + V_0 p(mp + f_v))} F_z(p)$$

En utilisant le principe de superposition :

$$Z(p) = \frac{2\beta \cdot S_{eq} \cdot Q(p) - V_0 \cdot p \cdot F_z(p)}{p \cdot (2\beta S_{eq}^2 + V_0 \cdot p \cdot (mp + f_v))}$$

et par identification :

$$G(p) = \frac{1}{p \cdot (mp + f_v)}$$

#### Question 44

Le temps de levage est

$$\frac{L}{V} = \frac{63}{1,08} = 58,3 \text{ min}$$

soit 0,04 jour, ce qui est inférieur à l'exigence 0,07 jour.

#### Question 45

D'après le DT4, la course du levage est 5 700 mm et la vitesse de levage est 70 mm·min<sup>-1</sup>.

Le temps de levage est

$$\frac{5\,700}{70} = 81,4 \text{ min}$$

soit une durée arrondie à 90 min.

D'après la partie 5, le transfert complet du plateau mobile sur 63 m se déroule en cycles successifs de 0,9 m. Chaque cycle a une durée de 50 secondes et il n'y a aucun délai entre deux cycles successifs.

Le temps de translation est  $\frac{63}{0,9} \times 50 = 3\,500 \text{ s} = 58,3 \text{ min}$  soit environ 60 min.

#### Question 46

D'après diagramme de Gantt simplifié :

- la durée de la phase 2 est de 2 heures car la fin du levage correspond à la fin des 2 heures de mise en place des chariots rouleurs ;
- la durée de la phase 4 est  $1+1=2$  h, soit 1 heure de translation et 1 heure de sécurisation ;
- la durée totale est la durée des phases moins les chevauchements de phases.

Or les phases 1 et 2 se chevauchent de 0,5 h et les phases 4 et 5 se chevauchent de 1 h.

La durée totale de changement de configuration vaut donc  $3 + 2 + 6,5 + 2 + 4 - 0,5 - 1 = 16$  h. Elle est bien inférieure à l'exigence de 24 heures.

Vu la durée d'un changement de configuration (48 heures pour ouverture et fermeture), et sa logistique (matériel et coût), cette opération est réalisée pour des événements exceptionnels.

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

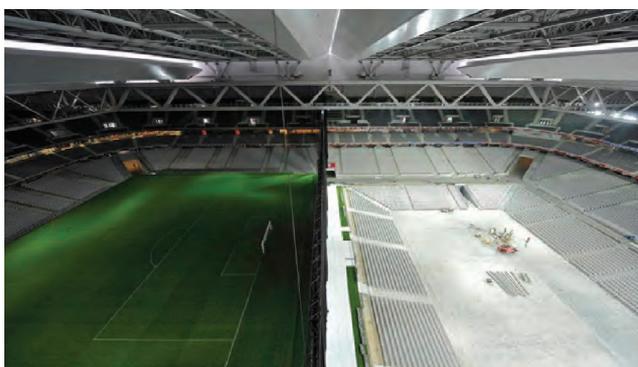
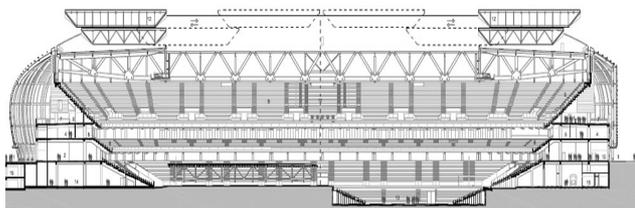
Cette épreuve, d'une durée de 6 heures, coefficient 1, est commune aux quatre options. Les candidats composent dans les mêmes conditions, sur le même sujet au titre de la même session quelle que soit l'option choisie. Conformément à l'arrêté du 19 avril 2016, « cette épreuve a pour but de vérifier que 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 des candidats à employer ses connaissances pour analyser, modéliser le comportement d'un système pluritechnologique et de résoudre des problématiques en lien à sa conception et son usage.

## 1. Présentation du sujet

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

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/concours-examens/10870/10870-agregation-ext-2019-sii-opt-sii-epreuve-1.pdf>

Il s'appuie sur le changement de configuration du stade Pierre Mauroy de Lille, de stade de sport en salle de spectacle. Cet ouvrage a la particularité de posséder une toiture mobile et une arène sous la pelouse.



***2 plateaux  
superposés***

***Zone de  
spectacle arène***

Le sujet s'intéresse au système de changement de configuration usuelle du stade en une configuration ponctuelle d'utilisation en salle de spectacle. Un plateau supportant une demi-pelouse est soulevé par douze vérins, puis se translate au moyen d'unités de translation à pas de pèlerin afin de se superposer à la moitié restante et ainsi libérer la moitié de la surface du stade pour libérer la place pour installer la salle de spectacle.

L'objectif général de l'étude est la vérification de divers points de dimensionnement du système pour les phases de levage et de translation. Il en découle quatre parties abordant chacune des exigences permettant en fin de sujet, lors d'une synthèse globale, de conclure quant à la validité de la durée d'un changement de configuration :

- l'étude de la structure du plateau mobile permet de valider des exigences liées à la résistance à la rupture pendant la phase de levage ;
- l'étude du cycle de chauffe du fluide du système hydraulique de levage amène à valider une exigence relative à l'interface homme-machine durant un changement de configuration ;
- l'étude du levage du plateau mobile se conclut par la validation d'exigences de dimensionnement et de pilotage du système de levage ;
- l'étude de la phase de translation consiste en la détermination d'un modèle d'asservissement en position du système hydraulique lors de la translation du plateau ;
- la synthèse générale permet de conclure sur l'exigence de durée du changement de configuration, en s'appuyant sur les études précédentes.

## **2. Analyse globale des résultats**

L'analyse globale des résultats amène aux constats suivants :

- l'étude de la structure du plateau mobile demande des compétences de base dans le domaine de la mécanique et de la résistance des matériaux. Cette partie qui débute le sujet a été traitée par 80 % des candidats avec un taux de réussite supérieur à 60 % ;
- l'étude du cycle de chauffe du système hydraulique a été traitée par la moitié des candidats avec une réussite certaine dépassant les 55 %. Cette partie qui mobilise des compétences du domaine de l'informatique industrielle a été dans l'ensemble bien réussie. Ainsi la mise en place de logigramme et d'algorithmes a posé de problème pour la majorité des candidats, l'étude du capteur de température et de la transmission de données a cependant souvent manqué de rigueur ;
- la 4<sup>e</sup> partie représente plus d'un tiers du questionnement du sujet abordant des domaines divers. La moitié des candidats a traité cette partie avec une bonne réussite mais le jury remarque que pour chaque sous-partie seules les premières questions ont été abordées. Le jury déplore cet état de fait qui démontre des compétences avec leurs connaissances associées de niveau limité voire parcellaire dans certains domaines constituant les sciences de l'ingénieur ;
- l'étude de la phase de translation, arrivant en fin de sujet, n'a été abordée que par un quart des candidats. Cette partie, centrée sur des compétences de modélisation, a été très bien réussie par la moitié d'entre eux ;
- la synthèse générale, a été peu abordée par les candidats, le jury le regrette. Néanmoins, la moitié des candidats l'ayant traitée a montré sa capacité à prendre du recul par rapport aux réponses apportées et se placer dans la logique du sujet.

Globalement, le niveau moyen des candidats concernant les activités en lien direct avec le domaine de la mécanique est satisfaisant, des insuffisances dans celles en lien avec le domaine de l'informatique sont constatées. Les candidats ayant réussi cette épreuve sont ceux qui ont fait preuve de transversalité scientifique et technologique. Certains candidats ont eu tendance à n'aborder que les parties se référant à leur spécialité. Pourtant, la difficulté des questions dans chaque partie est suffisamment progressive pour permettre à chacun d'y répondre au moins partiellement. Le jury constate que dans l'ensemble, le

profil des candidats tend à s'équilibrer sur les différents domaines de connaissances des sciences de l'ingénieur et incite les futurs candidats à poursuivre dans ce sens pour une meilleure réussite.

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

#### ***Étude de la structure du plateau (Q1 à Q8)***

##### *Détermination des efforts dans les barres du treillis (Q1 à Q3)*

Certains candidats ont déterminé les efforts demandés en évaluant de manière très approximative les poids en jeu. La méthode des surfaces d'influence était celle attendue. Des candidats n'ont pas pris en compte le modèle isostatique et la symétrie de géométrie et de chargement ne permettant pas une résolution correcte. De même, le choix de la section du treillis à isoler a rarement été optimisé amenant de nombreuses erreurs de calculs analytiques. Le jury rappelle que, quel que soit le domaine, les formules et méthodes de résolution doivent être connues et maîtrisées.

##### *Contrôle des choix de prédimensionnement (Q4 et Q5)*

Il s'agissait ici de ne pas confondre limite élastique et limite à la rupture, erreur rencontrée souvent, et de mentionner le phénomène de flambement, caractéristique de la situation étudiée.

##### *Simulation et analyse à l'aide d'un modèle aux éléments finis (Q6 à Q8)*

Cette analyse de simulation a particulièrement été réussie pour l'ensemble des candidats qui ont abordé cette étude puisqu'il s'agissait d'une simple comparaison de valeurs, même si les justifications proposées étaient souvent uniquement qualitatives. Par ailleurs, le jury rappelle que la question de synthèse impose de la part des candidats une prise de recul face à la problématique énoncée en début de partie, un rappel des résultats importants, et une réflexion étayée des résultats de l'étude.

#### ***Étude du cycle de chauffe du fluide du système hydraulique de levage (Q9 à Q20)***

##### *Étude du cycle de chauffe au sein du cycle de levage (Q9 à Q15)*

Dans cette partie, le jury remarque que les candidats ont parfois oublié de tenir compte d'un des trajets (aller ou retour) et que peu d'entre eux ont fait référence à la notion d'estimation du débit qui était indiquée dans l'énoncé pour expliquer l'écart calculé. Il est conseillé aux candidats de régulièrement revenir sur les énoncés avant de conclure.

Pour l'écriture de l'algorithme, certains se sont souvent limités aux seules variables issues de l'IHM, oubliant particulièrement celles provenant de la documentation technique (EV\_RD, EV\_SA, EV\_N...). Des erreurs ont été commises par l'absence de distinction entre les entrées (par exemple toptime) et les sorties (par exemple GMP\_GAV). Par ailleurs, les candidats ont souvent mal pris en compte la gestion de l'ordre de commande du cycle de chauffe, mais ont su proposer l'algorithme attendu dans des formalismes divers. Le jury souligne que la compréhension est facilitée quand les réponses utilisent des normes d'écriture. Ces notions de base doivent être pleinement maîtrisées par les candidats.

##### *Étude du capteur de température et de la transmission de données (Q16 à Q20)*

Les candidats ont su généralement déterminer la valeur escomptée, mais peu ont justifié leur raisonnement, ne faisant pas référence à l'équilibrage du pont de Wheastone. Ils ont régulièrement confondu la tension en sortie de conditionneur et la tension du récepteur et n'ont pas vérifié les exigences de mesures et de transmission de données Il est rappelé que les conclusions sont nécessaires pour le déroulement d'un raisonnement efficace.

Pour synthèse de cette partie, les candidats ont su faire référence à leur culture technologique personnelle en parlant par exemple de l'immunité aux bruits de la solution proposée, mais ils ont rarement fait le lien avec les conditions permanentes de fonctionnement du cycle de chauffe, à savoir la

détection du défaut capteur exigée. Le jury insiste sur l'importance du travail de synthèse qui illustre la hauteur prise par les candidats face aux problématiques posées.

### ***Étude du levage du plateau mobile (Q21 à Q39)***

#### *Dimensionnement du système hydraulique de levage (Q21 à Q24)*

Le jury note le peu de réussite sur cette partie. Les candidats ont parfois été déstabilisés par le fait que la référence du fluide n'apparaissait pas sur les courbes du DT5. Cependant, le graphe permettait aisément de déterminer des intervalles de valeurs de viscosité dynamique pour chacune des températures et de conclure.

De plus, les candidats n'ont pas compris l'attente des étapes de calculs permettant d'obtenir les valeurs données et ont été fortement pénalisés. Le jury réaffirme aux candidats l'importance de la compréhension des consignes.

Et enfin, rares sont les candidats à avoir utilisé le formulaire de mécanique des fluides. Le jury rappelle qu'il s'agit d'une épreuve transversale intégrant donc de nombreux domaines scientifiques de la discipline des sciences de l'ingénieur comme la mécanique des fluides.

#### *Validation mécanique d'un choix de vérin (Q25 à Q29)*

Cette partie, centrée sur le champ de la résistance des matériaux, a été traitée de manière correcte dans l'ensemble.

#### *Validation de la pression de fonctionnement du groupe motopompe haute pression de levage (Q30)*

Plus de la moitié des candidats a traité la question dont 40 % de manière très satisfaisante en intégrant une étude précise et rigoureuse.

#### *Validation du choix du transformateur HT/BT du poste énergie levage (Q31 et Q32)*

Le bilan de puissance a été globalement peu traité et mal réussi. Le jury note que les notions de base sur les puissances actives, réactives et apparentes ne sont pas toujours maîtrisées.

#### *Étude de la synchronisation en position des vérins en phase de levage (Q33)*

L'utilisation de l'outil d'ingénierie système SysML était exigée. Très peu de candidats ont abordé cette question, mais ceux ayant répondu à cette question l'ont généralement correctement traitée.

#### *Étude de l'acquisition de la position des vérins (Q34 à Q38)*

Cette étude classique d'un capteur a été dans l'ensemble très mal traitée. Les candidats ont souvent confondu la course du plateau (5 700 mm) avec la course du capteur (6 350 mm) ou ont oublié la prise en compte de la résolution du capteur pour le valider. Les explications données par les candidats sur le bit de parité ont manqué de clarté et de justesse.

Par ailleurs, les candidats se sont trouvés en difficulté pour justifier le fonctionnement synchrone du capteur. Certains l'ont expliqué par la simple présence de l'horloge, or l'énoncé annonçait clairement une condition au fonctionnement synchrone ( $T_A < 16$  ms). Le raisonnement consistant à se placer dans le cas le plus pénalisant permettait de valider l'exigence. Le jury a tenu compte de la cohérence des explications à ce niveau.

La question centrée sur la trame à coder à poser problème aux candidats : la position initiale étant souvent erronée, il en découlait une position à coder fautive.

#### *Synthèse de la phase de levage (Q39)*

Les réponses des candidats montrent à nouveau une méconnaissance de l'outil SysML, mais aussi des confusions graves sur la notion de nature de flux.

### **Étude de la phase de translation (Q40 à Q44)**

#### *Détermination de l'effort $\vec{F}_Z$ nécessaire pour tracter le plateau mobile (Q40)*

La détermination de l'effort appliqué sur les chariots ne présentait pas de difficulté particulière mais exigeait de la rigueur pour aboutir à une réponse juste.

#### *Détermination du modèle de l'ensemble actionneur + charge (Q41 à Q44)*

Cette étude, située en fin de sujet, a été peu traitée. Les candidats ayant abordé cette partie ont répondu de façon précise et satisfaisante.

### **Synthèse générale (Q45 à Q46)**

L'analyse proposée permettait de conclure au regard d'une problématique générale sur le temps de changement de configuration. Beaucoup de candidats n'ont pas identifié les chevauchements possibles de certaines tâches. Cette partie demandait une analyse de bon sens et le jury regrette que la fin du sujet soit si peu abordée.

### **Conseils aux futurs candidats**

Le jury encourage fortement les candidats à traiter toutes les parties du sujet et à montrer qu'ils maîtrisent l'ensemble des domaines des sciences industrielles de l'ingénieur. Les résultats démontrent que ceux qui refusent d'évoluer vers une approche transversale et sélectionnent les questions relatives aux différentes spécialités de l'ingénierie ne réussissent pas cette épreuve, car la note finale se trouve alors fortement limitée. Par conséquent, le jury conseille aux futurs candidats de s'investir sérieusement dans toutes les parties du programme du concours et d'acquérir l'ensemble des corpus des compétences et des connaissances associées aux disciplines qui constituent les sciences industrielles de l'ingénieur. Les candidats doivent également s'attacher à utiliser leur connaissances universitaires afin de résoudre des problématiques techniques associées à des systèmes industriels. Les plus efficaces ont su ne pas perdre de vue que les analyses, les justifications et les choix technologiques doivent être toujours menés en gardant à l'esprit les enjeux du contexte industriel spécifique à l'étude.

Le jury constate parfois un manque de rigueur et de précision dans la présentation des copies et la rédaction. La présentation doit être irréprochable, les notations imposées dans le sujet doivent être scrupuleusement respectées et il convient de rappeler qu'il est attendu d'un fonctionnaire de l'État qu'il maîtrise convenablement la langue française et veille à construire ses phrases dans le respect de la sémantique. Il doit aussi respecter les règles de l'orthographe et de la grammaire française afin de s'assurer que ce qu'il souhaite exprimer soit compréhensible et lisible. Le jury ne peut valoriser une justification qui se limite à une suite de mots clés juxtaposés. Le jury apprécie l'esprit critique face à des résultats aberrants, et admet le choix délibéré de commenter ces résultats pour continuer le traitement du sujet. Les réponses doivent être détaillées et argumentées : des résultats donnés directement, sans calcul, sans justification de principe, ne peuvent pas être pris en compte comme étant justes. Le jury souligne la grande qualité d'expression constatée dans certaines copies, rédigées avec un souci de clarté.

Réussir cette épreuve demande :

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

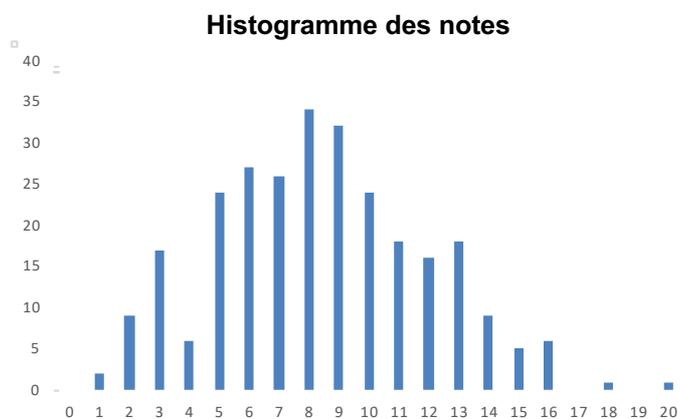
#### 4. Conclusion

Le sujet a été conçu pour permettre aux candidats d'exprimer au mieux leurs compétences dans différents champs d'application d'un système pluritechnologique correspondant au cadre de cette épreuve transversale. Le jury engage fortement les futurs candidats à se préparer conformément aux attendus (arrêté du 19/04/2016).

#### 5. Résultats

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

- 19,1/20 comme meilleure note ;
- 1/20 comme note la plus basse.



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

## Question 1

Pour  $\lambda=7$ , on relève sur la courbe  $C_p=0,275$ .

On peut déterminer la puissance récupérable avec la relation :

$$P_{\text{éolienne}} = \frac{1}{2} \rho_A A C_p U^3 = \frac{1}{2} \rho_A \pi R_p^2 C_p U^3$$

En faisant l'application numérique, on obtient :

$$P_{\text{éolienne}} = 3,11 \text{ MW}$$

## Question 2

On peut calculer l'énergie récupérable par tronçon de temps moyen avec une puissance de vent théorique sachant que l'éolienne sature à hauteur 8 MW. Soit  $E_r$  l'énergie récupérable en MW.H,  $P_i$  la puissance récupérable théorique pour la vitesse de vent  $i$ , et  $N_{hi}$ , le nombre d'heures à la vitesse de vent  $i$  :

$$E_r = \sum_{i=1}^{15} P_i \times N_{hi} + 8 \sum_{i=16}^{20} N_{hi}$$

En faisant l'application numérique, on obtient :

$$E_r = 12,5 \text{ GW}\cdot\text{H}$$

## Question 3

	Configuration 1 : échelle 1:50	Configuration 2 : échelle 1:40	Configuration 3 : échelle 1:40
Nombre de Reynolds : $N_{Re} = \frac{v \cdot D}{\nu}$	$6,51 \times 10^8$	$6,51 \times 10^8$	$4,46 \times 10^8$
Nombre de Froude : $N_{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gD}}$	2,3	3,2	2,2

On note que les configurations 1 et 2 sont similaires d'un point de vue du nombre de Reynolds alors que les configurations 1 et 3 sont similaires d'un point de vue du nombre de Froude. En choisissant la configuration 3 il a été ainsi décidé de garantir la similitude d'un point de vue comportement mécanique de la structure.

## Question 4

Exigence 1.1.3 : pour cette exigence il faudra s'assurer que l'éolienne est bien stable vis-à-vis de la houle. Dans l'idéal il faudrait que l'éolienne reste toujours orientée de la même façon de manière à ne pas modifier ses caractéristiques aérodynamiques directement liées à la production d'énergie. De plus il faut que l'éolienne soit stable pour ne pas couler.

Exigence 1.2 : les conditions climatiques et les dimensions de l'éoliennes font que l'intégrité de la structure doit être garantie malgré les conditions extérieures sévères. La structure doit être dimensionnée d'un point de vue statique mais également dynamique. Le dimensionnement au flambage est également à prendre en compte.

Exigence 1.3.3.1 : l'orientation des pales selon l'action du vent permet de maîtriser les paramètres aérodynamiques de l'éolienne pour garantir une production d'électricité optimale.

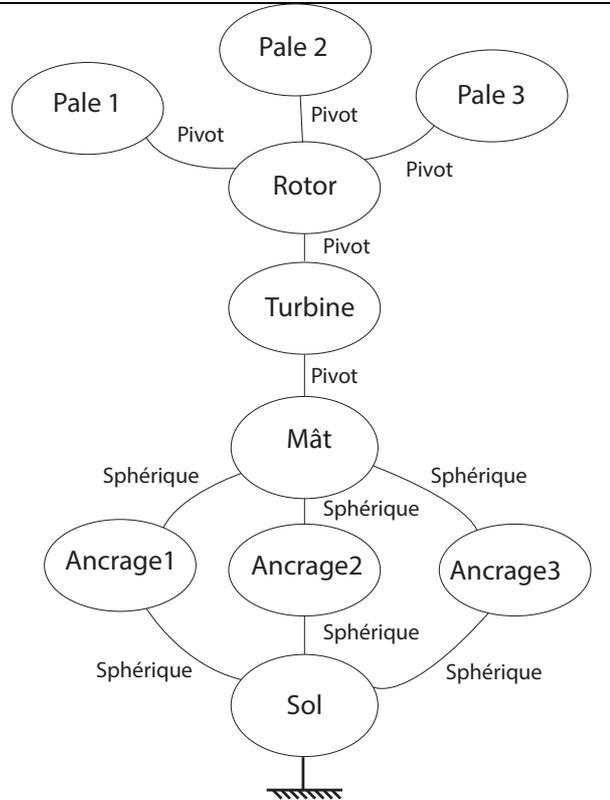
### Question 5

La liaison entre un ancrage et le flotteur peut être modélisée par une liaison sphérique car tous les degrés de liberté en rotation sont possibles.

### Question 6

#### Mobilités :

- les 5 liaisons pivots donnent directement 5 mobilités utiles du système ;
- l'architecture entre le mât et le sol donne 3 mobilités : tangage de la plate-forme, roulis et lacet ;
- rotation propre par ancrage (bi-rotulé) ;
- $M_c=11$ .



Parmi les 11 mobilités obtenues :

- 5 correspondent aux mobilités utiles liées à la rotation de la turbine sur elle-même, l'orientation de chacune des 3 pales et l'orientation de la turbine par rapport au mât. Ces mobilités correspondent aux paramètres de réglage de l'éolienne ;
- 3 mobilités internes de rotation correspondent aux 3 rotations propres dues aux liaisons rotules à chaque extrémité des lignes d'ancrage ;
- 3 mobilité du flotteur
  - o tangage, provoqué par la poussée du vent sur l'éolienne ;
  - o roulis, provoqué par le couple de traînée lors de la rotation de l'éolienne ;
  - o lacet, rotation autour d'un axe vertical.

### Question 7

Utilisons une fermeture géométrique :

$$\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DA} = \vec{0} \Leftrightarrow L_2 \vec{z}_2 + L_1 \vec{y}_1 - L_3 \vec{z}_3 - L_0 \vec{y}_0 = \vec{0}.$$

Ce qui donne en projection dans la base  $B_0 = (\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  :

$$\begin{aligned} (a) \cdot \vec{y}_0 & \left\{ \begin{array}{l} -L_2 \sin \theta_{x20} + L_1 \cos \theta_{x10} + L_3 \sin \theta_{x30} - L_0 = 0 \\ L_2 \cos \theta_{x20} + L_1 \sin \theta_{x10} - L_3 \cos \theta_{x30} = 0 \end{array} \right. \\ (b) \cdot \vec{z}_0 & \left\{ \begin{array}{l} -L_2 \sin \theta_{x20} + L_1 \cos \theta_{x10} - L_0 = -L_3 \sin \theta_{x30} \\ L_2 \cos \theta_{x20} + L_1 \sin \theta_{x10} = L_3 \cos \theta_{x30} \end{array} \right. \end{aligned}$$

En effectuant  $(a)^2 + (b)^2$ , on obtient :

$$L_0^2 + L_1^2 + L_2^2 - L_3^2 + 2L_2 L_1 (\sin \theta_{x10} \cos \theta_{x20} - \sin \theta_{x20} \cos \theta_{x10}) + 2L_0 (L_2 \sin \theta_{x20} - L_1 \cos \theta_{x10}) = 0.$$

Ainsi on peut identifier :

$$\begin{cases} \lambda_1 = L_0^2 + L_1^2 + L_2^2 - L_3^2 \\ \lambda_2 = -2L_1L_2 \\ \lambda_3 = 2L_0L_2 \\ \lambda_4 = -2L_0L_1 \end{cases}$$

### Question 8

On peut utiliser une méthode de résolution numérique d'équation du type  $f(x)=0$  avec la méthode de Newton.

Détermination de  $\theta_{20}$  : Ici on impose des valeurs de  $\theta_{x10}$  comprise entre  $-20^\circ$  et  $+20^\circ$ . On cherche alors les valeurs de  $x = \theta_{x20}$  annulant l'équation :

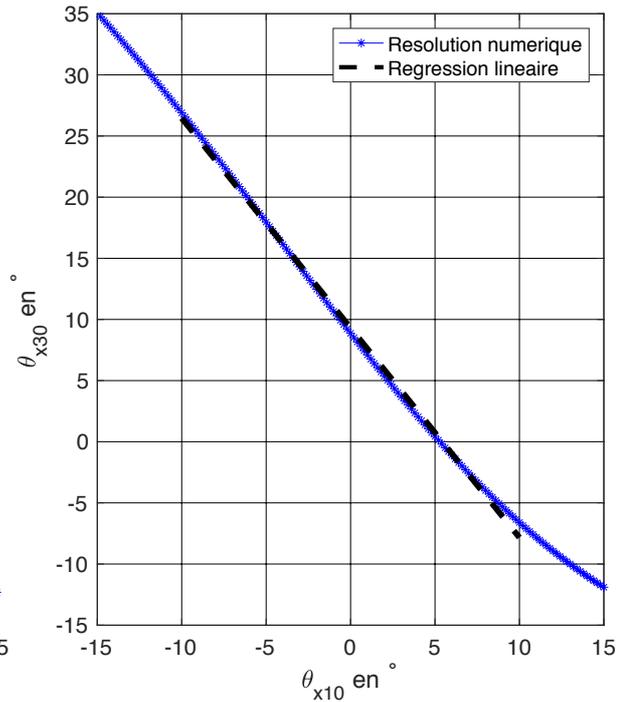
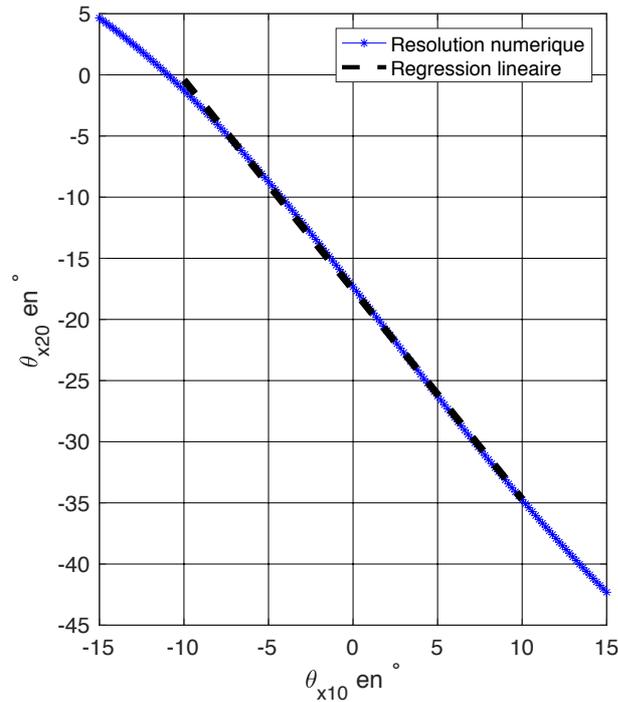
$$f(x) = L_0^2 + L_1^2 + L_2^2 - L_3^2 + 2L_2L_1(\sin\theta_{x10} \cdot \cos x - \sin x \cdot \cos\theta_{x10}) + 2L_0(L_2 \cdot \sin x - L_1 \cdot \cos\theta_{x10}).$$

Détermination de  $\theta_{x30}$  :

$\theta_{30}$  sera compris entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$  pour  $\theta_{x10} \in [-20^\circ, 20^\circ]$ . On peut alors utiliser l'équation (b) obtenue à la question précédente et l'évaluer pour chaque valeur de  $\theta_{x10}$  et  $\theta_{x20}$ ,

$$\theta_{x30} = \arcsin\left(\frac{L_0 + L_2 \sin\theta_{x20} - L_1 \cos\theta_{x10}}{L_3}\right).$$

### Question 9



On obtient :

$$\begin{cases} \theta_{x20} = a_2 \cdot \theta_{x10} + b_2 \\ \theta_{x30} = a_3 \cdot \theta_{x10} + b_3 \end{cases}$$

Avec,

$$\begin{cases} a_2 = -1,71 \\ b_2 = -0,31 \text{ rad} = -17,76^\circ \\ a_3 = -1,71 \\ b_3 = 0,16 \text{ rad} = 9,2^\circ \end{cases}$$

On se ramène donc bien à une seule mobilité dans le plan. Une approche énergétique semble donc pertinente pour obtenir l'équation de mouvement du système.

**Question 10**

Le plan  $(G_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$  est un plan de symétrie de l'ensemble. On peut donc considérer que  $(G_1, \vec{x}_1)$  est direction principale d'inertie et ainsi  $I_{xy}^1 = I_{xz}^1 = 0$ .

**Question 11**

– Torseur cinématique :  $\{V(S_1/R_0)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}(S_1/R_0) = \dot{\theta}_{x10} \cdot \vec{x}_{1,0} \\ \vec{V}(G_1, S_1/R_0) = \vec{V}(B, S_1/R_0) + \vec{G}_1 \vec{B} \wedge \vec{\Omega}(S_1/R_0) \end{array} \right\}_{G_1}$

On peut calculer :  $\vec{V}(G_1, S_1/R_0)$  :

$$\vec{V}(B, S_1/R_0) = \vec{V}(B, S_2/R_0) = \left[ \frac{d \vec{AB}}{dt} \right]_{R_0} = -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2$$

$$\vec{G}_1 \vec{B} \wedge \vec{\Omega}(S_1/R_0) = -(y_{G_1} \vec{y}_1 + z_{G_1} \vec{z}_1) \wedge \dot{\theta}_{x10} \cdot \vec{x}_{1,0} = \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1)$$

On obtient finalement,

$$\{V(S_1/R_0)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\Omega}(S_1/R_0) = \dot{\theta}_{x10} \cdot \vec{x}_{1,0} \\ \vec{V}(G_1, S_1/R_0) = -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) \end{array} \right\}_{G_1}$$

– Torseur cinétique :  $\{C(S_1/R_0)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_c(S_1/R_0) = m_1 \vec{V}(G_1, S_1/R_0) \\ \vec{\sigma}(G_1, S_1/R_0) = I(G_1, S_1) \cdot \vec{\Omega}(S_1/R_0) \end{array} \right\}_{G_1}$

$$\vec{\sigma}(G_1, S_1/R_0) = \begin{pmatrix} I_{xx}^1 & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy}^1 & -I_{yz}^1 \\ 0 & -I_{yz}^1 & I_{zz}^1 \end{pmatrix}_{\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\theta}_{x10} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1} = I_{xx}^1 \cdot \dot{\theta}_{x10} \cdot \vec{x}_{0,1}$$

$$\{C(S_1/R_0)\} = \left\{ \begin{array}{l} m_1 \left( -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) \right) \\ I_{xx}^1 \cdot \dot{\theta}_{x10} \cdot \vec{x}_0 \end{array} \right\}_{G_1}$$

**Question 12**

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\theta}_{x20} \approx a_2 \cdot \dot{\theta}_{x10} + b_2 \rightarrow \ddot{\theta}_{x20} \approx a_2 \cdot \ddot{\theta}_{x10} \rightarrow \ddot{\theta}_{x20} \approx a_2 \cdot \ddot{\theta}_{x10} \\ \dot{\theta}_{x30} \approx a_3 \cdot \dot{\theta}_{x10} + b_3 \rightarrow \ddot{\theta}_{x30} \approx a_3 \cdot \ddot{\theta}_{x10} \rightarrow \ddot{\theta}_{x30} \approx a_3 \cdot \ddot{\theta}_{x10} \\ \sin \theta_{x10} \approx \theta_{x10} \\ \cos \theta_{x10} \approx 1 \end{array} \right.$$

**Question 13**

$$2Ec(\Sigma/R_0) = \{C(S_1/R_0)\} \otimes \{V(S_1/R_0)\} = I_{xx} \dot{\theta}_{x10}^2 + m_1 \left( -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) \right)^2$$

$$2Ec(\Sigma/R_0) = m_1 \left[ L_2^2 \cdot \dot{\theta}_{x20}^2 + \dot{\theta}_{x10}^2 (y_{G_1}^2 + z_{G_1}^2) - 2L_2 \dot{\theta}_{x20} \dot{\theta}_{x10} (y_{G_1} \sin \theta_{x21} - z_{G_1} \cos \theta_{x21}) \right] + I_{xx} \dot{\theta}_{x10}^2$$

En linéarisant pour des petites variations de  $\theta_{x10}$  et en ne gardant que les termes en  $\dot{\theta}_{x10}^2$ , on obtient :

$$2Ec(\Sigma/R_0) = \dot{\theta}_{x10}^2 \left[ m_1 \left[ L_2^2 \cdot a_2^2 + (y_{G_1}^2 + z_{G_1}^2) - 2L_2 \cdot a_2 (y_{G_1} \sin b_2 - z_{G_1} \cos b_2) \right] + I_{xx} \right].$$

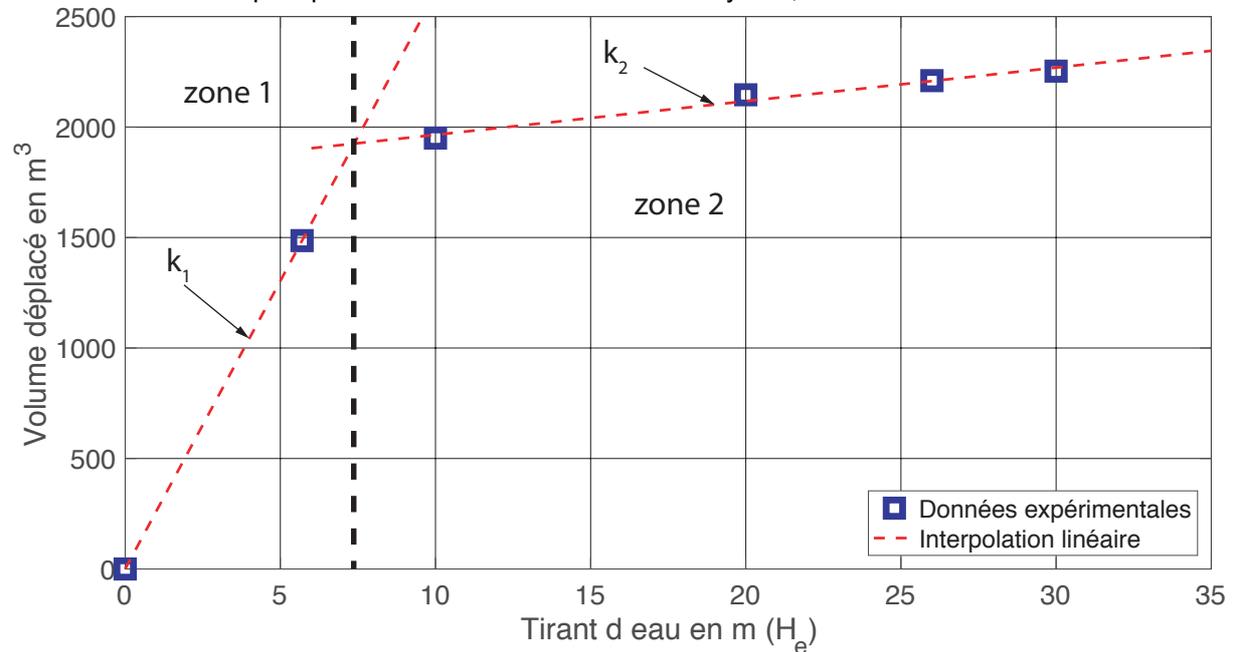
**Question 14**

On note deux zones affines sur la courbe avec deux coefficients directeurs différents. De par cette linéarité on peut approximer le volume déplacé et ainsi la géométrie par deux volumes cylindriques.

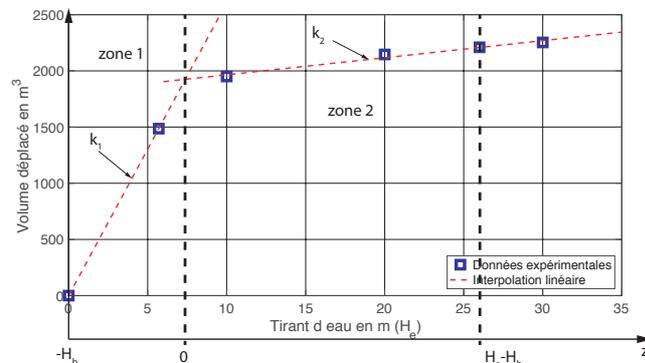
Le premier coefficient directeur  $k_1$  donne la section du premier cylindre qui va entrer dans l'eau correspondant aux bouées. On trouve  $k_1 \approx 260 \text{ m}^2$ .

Le deuxième coefficient directeur  $k_2$  donne la section du deuxième cylindre équivalent correspondant aux bracons. On trouve  $k_2 \approx 15 \text{ m}^2$ .

Il y a quatre bouées de même rayon donc de section égales à  $65 \text{ m}^2$  ce qui est bien cohérent avec les données en annexe puisque cela donnerait une bouée de rayon 4,55 m.



**Question 15**



On pose  $z$  le paramètre de position entre le haut des bouées et la surface de l'eau.

Sur la zone 1 :

$$V(z) = k_1(z + H_b).$$

Sur la zone 2 :

$$V(z) = k_1 \cdot H_b + k_2 \cdot z.$$

Pour  $z = H_e - H_b$  correspondant à la situation où le flotteur est mis en place correctement :

$$V_d = V(H_e - H_b) = k_1 \cdot H_b + k_2 \cdot (H_e - H_b) = 2210 \text{ m}^3.$$

La position du centre de poussée par rapport au haut de la bouée peut être calculée par la formule du barycentre :

$$z_{Gp} = \frac{k_1 \cdot H_b^2 + k_2 \cdot (H_e - H_b)^2}{2 \cdot V_d}$$

L'application numérique donne :

$$z_{Gp} = 4,13 \text{ m}.$$

Au regard des symétries, on a  $y_{Gp} = R_f$ . Pour un tirant d'eau de 26 m on a un volume déplacé égal à  $2210 \text{ m}^3$  et en considérant la masse volumique de l'eau salée, le torseur de la poussée d'Archimède sur le flotteur est donné par :

$$\{T(\text{eau} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_p = F_{\text{eau}} \cdot \vec{z}_0 = \rho_e \cdot V_d \cdot g \cdot \vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{G_p}$$

L'application numérique donne :

$$F_p = \rho_e \cdot V_f \cdot g = 2,22 \cdot 10^7 \text{ N.}$$

### Question 16

Les lignes d'ancrage ont des inerties négligeables. Les actions dues aux liaisons sont des glisseurs (moment nul des torseurs des actions mécaniques lorsqu'ils sont écrits aux centres de liaison).

Si on applique le théorème du moment dynamique à chacune des lignes d'ancrage on obtient que les résultantes des actions mécaniques des liaisons sphériques sont directement opposées.

### Question 17

Torseur des actions mécaniques des lignes d'ancrages :

$$\{T(S_{3i} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{c} \|\vec{F}(S_{3i} \rightarrow S_1)\| \cdot \vec{u}_i \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{C_i}$$

Avec  $\vec{u}_i$  la direction de chacune des lignes d'ancrage :

- Pour  $i=1$   $\vec{u}_1 = \frac{D_1 C_1}{\|D_1 C_1\|}$  ;
- Pour  $i=2$   $\vec{u}_2 = \frac{D_2 C_2}{\|D_2 C_2\|}$ .

Du fait du mouvement de tangage seul :

$$\vec{a}(G_1, S_1/R_0) \cdot \vec{x}_0 = 0.$$

En appliquant le théorème de la résultante dynamique à  $S_1$  selon  $\vec{x}_0$  :

$$m_1 \cdot \vec{a}(G_1, S_1/R_0) \cdot \vec{x}_0 = \vec{R}(\text{ext} \rightarrow S_1) \cdot \vec{x}_0.$$

Seules les actions des lignes d'ancrages  $S_{31}$  et  $S_{32}$  ont des composantes selon  $\vec{x}_0$ , d'où,

$$(\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) + \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1)) \cdot \vec{x}_0 = 0.$$

Donc,

$$\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) \cdot \vec{x}_0 = -\vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) \cdot \vec{x}_0 = F_{3x}.$$

Le solide  $S_1$  est en mouvement de tangage seul :  $\vec{\Omega}(S_1/R_0) = \dot{\theta}_{10} \cdot \vec{x}_{0,1}$ . En appliquant le théorème du moment dynamique en  $C$  en projection selon  $\vec{y}_0$  :

$$\vec{\delta}(C, S_1/R_0) \cdot \vec{y}_0 = \vec{M}(C, \text{ext} \rightarrow S_1) \cdot \vec{y}_0.$$

Calculons le moment dynamique en  $C$  :

$$\begin{aligned} \vec{\delta}(C, S_1/R_0) &= (\vec{\delta}(G_1, S_1/R_0) + \overrightarrow{CG_1} \wedge m_1 \cdot \vec{a}(G_1, S_1/R_0)) \\ &= \left[ I_{xx}^1 \cdot \ddot{\theta}_{x10} \cdot \vec{x}_0 + m_1 \ddot{\theta}_{x10} \left( (y_{G_1} - L_1) \vec{y}_1 + z_{G_1} \vec{z}_1 \right) \wedge \left[ -L_2 \cdot a_2 \cdot \vec{y}_2 + (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) \right] \right]. \end{aligned}$$

Or,

$$\left( (y_{G_1} - L_1) \vec{y}_1 + z_{G_1} \vec{z}_1 \right) \wedge \left[ -L_2 \cdot a_2 \cdot \vec{y}_2 + (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) \right] \parallel \vec{x}_0.$$

Donc :

$$\begin{cases} \vec{\delta}(C, S_1/R_0) \cdot \vec{y}_0 = 0 \\ \vec{\delta}(C, S_1/R_0) \cdot \vec{z}_0 = 0 \end{cases}$$

De plus seules les actions mécaniques des ancrages en  $C_{31}$  et  $C_{32}$  interviennent dans  $\vec{M}(C, \text{ext} \rightarrow S_1) \cdot \vec{y}_0$  et  $\vec{M}(C, \text{ext} \rightarrow S_1) \cdot \vec{z}_0$  :

$$\begin{aligned} \vec{M}(C, \text{ext} \rightarrow S_1) &= \left[ \overrightarrow{CC_1} \wedge \vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) + \overrightarrow{CC_2} \wedge \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) \right] \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} R_f \cdot \vec{x}_1 \wedge (\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) - \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1)) \end{aligned}$$

Car  $\overrightarrow{CC_{31}} = -\overrightarrow{CC_{32}} = \frac{\sqrt{3}}{2} R_f \vec{x}_1$  donc :

$$\vec{M}(C, \text{ext} \rightarrow S_1) \cdot \vec{y}_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} R_f (\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) - \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1)) \cdot \vec{y}_0 \wedge \vec{x}_{0,1} = 0$$

$$\vec{M}(C, \text{ext} \rightarrow S_1) \cdot \vec{z}_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} R_f (\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) - \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1)) \cdot \vec{z}_0 \wedge \vec{x}_{0,1} = 0$$

En combinant les deux relations, on obtient alors :

$$\begin{cases} \vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) \cdot \vec{z}_0 = \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) \cdot \vec{z}_0 = F_{3z} \\ \vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) \cdot \vec{y}_0 = \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) \cdot \vec{y}_0 = F_{3y} \end{cases}$$

Ainsi :

$$\|\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1)\| = \sqrt{F_{3x}^2 + F_{3y}^2 + F_{3z}^2} = \|\vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1)\| = F_{31}$$

Les liaisons sont associées en parallèle, on peut donc sommer les deux torseurs :

$$\begin{aligned} \{T(\text{eq})\} &= \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{C_1} + \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{C_2} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) \\ \overrightarrow{CC_1} \wedge \vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) \end{array} \right\}_C + \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) \\ \overrightarrow{CC_2} \wedge \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) \end{array} \right\}_C \\ &= \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) + \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1) = \|\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1)\| \vec{u}_1 + \|\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1)\| \vec{u}_2 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} R_f \vec{x}_{0,1} \wedge (\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) - \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1)) \end{array} \right\}_C \end{aligned}$$

Or,  $\vec{u}_1 + \vec{u}_2 = \vec{z}_3$ .

D'après les résultats précédents :

$$\|\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1)\| \vec{u}_1 + \|\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1)\| \vec{u}_2 = 2 \cdot F_{31} \vec{z}_3$$

et

$$\frac{\sqrt{3}}{2} R_f \vec{x}_{0,1} \wedge (\vec{F}(S_{31} \rightarrow S_1) - \vec{F}(S_{32} \rightarrow S_1)) = \frac{\sqrt{3}}{2} R_f \vec{x}_{0,1} \wedge (2 \cdot F_{3x} \cdot \vec{x}_0) = \vec{0}$$

On obtient bien alors :

$$\{T(\text{eq})\} = \left\{ \begin{array}{c} 2 \cdot F_{31} \vec{z}_3 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_C$$

Ce qui correspond bien à la modélisation d'une liaison sphérique avec une ligne d'ancrage dirigée selon  $\vec{z}_3$ .

### Question 18

- action du poids :

$$\{T(\text{poids} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{c} -m_1 \cdot g \cdot \vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{G_1};$$

- action de la ligne d'ancrage en C ( $S_{31} + S_{32}$ ) :

$$\{T(S_{31} + S_{32} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{c} 2F_{31} \cdot \vec{z}_3 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_C = \left\{ \begin{array}{c} 2F_{31} \cdot \vec{z}_3 \\ \vec{M}(B, S_3 \rightarrow S_1) = \overrightarrow{BC} \wedge 2F_{31} \cdot \vec{z}_3 = L_1 \cdot \vec{y}_1 \wedge 2F_{31} \cdot \vec{z}_3 \end{array} \right\}_B$$

$$\{T(S_{31} + S_{32} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{c} 2F_{31} \cdot \vec{z}_3 \\ 2F_{31} L_1 \cos \theta_{x31} \cdot \vec{x}_0 \end{array} \right\}_B;$$

- action du vent :

$$\{T(\text{vent} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{c} F_v \cdot \vec{y}_0 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_E = \left\{ \begin{array}{c} F_v \cdot \vec{y}_0 \\ \vec{M}(B, \text{vent} \rightarrow S_1) = \overrightarrow{BE} \wedge F_v \cdot \vec{y}_0 = (R_f \vec{y}_1 + (H_m + H_r - H_b) \vec{z}_1) \wedge F_v \cdot \vec{y}_0 \end{array} \right\}_B$$

$$\{T(\text{vent} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{c} F_v \cdot \vec{y}_0 \\ -F_v (R_f \sin \theta_{x10} + (H_m + H_r - H_b) \cos \theta_{x10}) \cdot \vec{x}_0 \approx -F_v (R_f \theta_{x10} + (H_m + H_r - H_b)) \cdot \vec{x}_0 \end{array} \right\}_B;$$

- action de l'eau (poussée hydrostatique)

$$\{T(\text{eau} \rightarrow S_1)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_{\text{eau}} = F_{\text{eau}} \cdot \vec{z}_0 = \rho_e \cdot V_d \cdot \vec{z}_0 \\ \overrightarrow{BG_p} \wedge \vec{F}_p = (R_f \vec{y}_1 + z_{Gp} \vec{z}_1) \wedge F_p \cdot \vec{z}_0 = F_p (R_f \cos \theta_{x10} - z_{Gp} \sin \theta_{x10}) \vec{x}_0 \end{array} \right\}_B$$

$$\{T(\text{eau} \rightarrow S_1)\} \approx \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_p = F_p \cdot \vec{z}_0 = \rho_e \cdot V_d \cdot \vec{z}_0 \\ F_p (R_f - z_{Gp} \theta_{x10}) \vec{x}_0 \end{array} \right\}_B$$

### Question 19

- Puissance intérieure :

$$P_{\text{int}}(\Sigma) = 0.$$

Car les solides sont supposés indéformables et les liaisons sont supposées parfaites.

- Puissance extérieure galiléenne

$$P(\text{ext} \rightarrow \Sigma/R_0) = P(\text{vent} \rightarrow \Sigma/R_0) + P(\text{eau} \rightarrow \Sigma/R_0) + P(\text{poids} \rightarrow \Sigma/R_0) + P(\text{ancrage} \rightarrow \Sigma/R_0).$$

Calculs préliminaires de produits scalaires :

$$\vec{z}_0 \cdot \vec{y}_2 = \sin \theta_{x20} \approx \sin b_2 + a_2 \cos b_2 \theta_{x10};$$

$$\vec{z}_0 \cdot \vec{z}_1 = \cos \theta_{x10} \approx 1;$$

$$\vec{z}_0 \cdot \vec{y}_1 = \sin \theta_{x10} \approx \theta_{x10};$$

$$\vec{y}_0 \cdot \vec{y}_2 = \cos \theta_{x20} \approx \cos b_2 - a_2 \sin b_2 \theta_{x10};$$

$$\vec{y}_0 \cdot \vec{z}_1 = -\sin \theta_{x10} \approx -\theta_{x10};$$

$$\vec{y}_0 \cdot \vec{y}_1 = \cos \theta_{x10} \approx 1.$$

$P(\text{vent} \rightarrow \Sigma/R_0)$  Soit  $Z_E = H_m + H_f - H_b$  ;

$$P(\text{vent} \rightarrow \Sigma/R_0) = \{T(\text{vent} \rightarrow \Sigma)\} \otimes \{V(S_1/R_0)\} = F_v \vec{y}_0 \cdot \vec{V}(E, S_1/R_0)$$

Or,

$$\begin{aligned} \vec{V}(E, S_1/R_0) &= \vec{V}(G_1, S_1/R_0) + \overrightarrow{EG_1} \wedge \vec{\Omega}(1/0) \\ &= -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) - Z_E \vec{z}_1 \wedge \dot{\theta}_{x10} \vec{x}_{0,1} \\ &= -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) - Z_E \dot{\theta}_{x10} \vec{y}_1 \end{aligned}$$

On trouve donc,

$$P(\text{vent} \rightarrow \Sigma/R_0) = F_v \dot{\theta}_{x10} [-L_2 \cdot b_2 (\cos b_2 - a_2 \sin b_2 \theta_{x10}) - y_{G_1} \theta_{x10} - (z_{G_1} + Z_E)].$$

$P(\text{Poids} \rightarrow \Sigma/R_0)$  :

$$\begin{aligned} P(\text{Poids} \rightarrow \Sigma/R_0) &= \{T(\text{Poids} \rightarrow \Sigma)\} \otimes \{V(S_1/R_0)\} = -m_1 g \vec{z}_0 \cdot \vec{V}(G_1, S_1/R_0) \\ &= -m_1 g \vec{z}_0 \cdot (-L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1)) \end{aligned}$$

$$P(\text{poids} \rightarrow \Sigma/R_0) = -m_1 \cdot g \cdot \dot{\theta}_{x10} [-L_2 \cdot a_2 (\sin b_2 + a_2 \cos b_2 \theta_{x10}) + y_{G_1} - z_{G_1} \theta_{x10}].$$

$P(\text{eau} \rightarrow \Sigma/R_0)$  :

$$P(\text{eau} \rightarrow \Sigma/R_0) = \{T(\text{eau} \rightarrow \Sigma)\} \otimes \{V(S_1/R_0)\} = \rho_e V_f \vec{z}_0 \cdot m_1 g \vec{z}_0 \cdot \vec{V}(G_p, S_1/R_0)$$

Or,

$$\begin{aligned} \vec{V}(G_p, S_1/R_0) &= \vec{V}(G_1, S_1/R_0) + \overrightarrow{G_p G_1} \wedge \vec{\Omega}(1/0) \\ &= -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) + (z_{G_1} - z_{G_p}) \vec{z}_1 \wedge \dot{\theta}_{x10} \vec{x}_{0,1} \\ &= -L_2 \cdot \dot{\theta}_{x20} \vec{y}_2 + \dot{\theta}_{x10} \cdot (y_{G_1} \vec{z}_1 - z_{G_1} \vec{y}_1) + (z_{G_1} - z_{G_p}) \dot{\theta}_{x10} \vec{y}_1 \end{aligned}$$

On trouve alors,

$$P(\text{eau} \rightarrow \Sigma/R_0) = \rho_e \cdot V_d \cdot g \cdot \dot{\theta}_{x10} [-L_2 \cdot a_2 (\sin b_2 + a_2 \cos b_2 \theta_{x10}) + y_{G_1} - z_{G_p} \theta_{x10}].$$

### Question 20

On applique le théorème de l'énergie cinétique :

$$\frac{dEc(\Sigma/R_0)}{dt} = P(\text{ext} \rightarrow \Sigma/R_0) + P_{\text{int}}(\Sigma).$$

La dérivée de l'énergie cinétique linéarisée donne :

$$\frac{dEc(\Sigma/R_0)}{dt} = \dot{\theta}_{x10} \ddot{\theta}_{x10} [m_1 [L_2^2 \cdot a_2^2 + (y_{G_1}^2 + z_{G_1}^2) - 2L_2 \cdot a_2 (y_{G_1} \sin b_2 - z_{G_1} \cos b_2)] + I_{xx}].$$

On obtient  $A \ddot{\theta}_{x10} + B \theta_{x10} = F_v \cdot (C \theta_{x10} + D) + E$  ;

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} A=m_1[L_2^2 \cdot a_2^2 + (y_{G1}^2 + z_{G1}^2) - 2L_2 \cdot a_2 (y_{G1} \sin b_2 - z_{G1} \cos b_2)] + I_{xx} \\ B=-m_1 \cdot g(L_2 a_2^2 \cos b_2 + z_{G1}) + \rho_E \cdot V_d \cdot g[L_2 \cdot a_2^2 \cdot \cos b_2 + z_{Gp}] \\ C=L_2 \cdot b_2 a_2 \sin b_2 - y_{G1} \\ D=-L_2 \cdot b_2 \cos b_2 - (z_{G1} + z_E) \\ E=m_1 \cdot g \cdot [L_2 \cdot a_2 \sin b_2 - y_{G1}] + \rho_E \cdot V_d \cdot g \cdot [-L_2 \cdot a_2 \sin b_2 + y_{G1}] \end{array} \right. .$$

### Question 21

Dans le cas de l'étude de vibration libre de la structure on peut mettre l'équation de mouvement de la structure sous la forme si  $B/A > 0$  :

$$\ddot{\theta}_{x10} + \omega_0^2 \theta_{x10} = E'$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0^2 = \frac{B}{A} \\ E' = \frac{E}{A} \end{array} \right.$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$\theta_{x10} = G \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + E'$$

Avec les conditions limites,  $G + E' = \theta_{x10}^0$ .

Ainsi on peut la mettre sous la forme :

$$\theta_{x10} = (\theta_{x10}^0 - E') \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + E'$$

### Question 22

Sur la figure 10 (b) pour un tirant d'eau égal à 26 m on remarque que la quantité  $B/A$  est décroissante en fonction de l'inclinaison initiale des lignes d'ancrage  $\theta_{x20}^0$ . Pour garantir la stabilité du système il faut vérifier que la quantité  $B/A$  reste positive. Plus l'inclinaison des lignes d'ancrage est faible et plus la quantité  $B/A$  est importante et donc plus le système est stable. Graphiquement, dans ces conditions, on observe que l'inclinaison limite des lignes d'ancrage est d'environ 30°.

### Question 23

Pour  $\theta_{x20}^0 = 17^\circ$ , à l'aide de la figure 10 (b) on relève  $B/A = 0,025 \text{ s}^{-2}$ . Sur la figure 10 (b) pour  $B/A = 0,025 \text{ s}^{-2}$  on relève  $F_{\text{eau}} = 2 \cdot 10^7 \text{ N}$ . On peut calculer le volume d'eau à déplacer pour obtenir la valeur de  $F_{\text{eau}} = 2 \cdot 10^7 \text{ N}$  avec la relation  $F_{\text{eau}} = \rho_E \cdot V_d \cdot g$ . L'application numérique donne :  $V_d = 1990 \text{ m}^3$ . À l'aide de la figure 9,  $V_d = 1990 \text{ m}^3$  correspond à un tirant d'eau  $H_e = 10 \text{ m}$ . La documentation technique précise que le tirant d'eau en condition de service est égal à 26 m. Ainsi ces conditions garantissent largement la stabilité du système.

### Question 24

Ainsi le vecteur  $\dot{X}$  peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{X} = \dot{\theta}_{x10} \begin{pmatrix} 0 \\ k_y \\ k_z \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} .$$

$(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$

On obtient :

$$Ec(S_a/R_0) = \frac{1}{2} \dot{\theta}_{x20}^2 \begin{pmatrix} 0 & k_y & k_z & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{16} \\ M_{21} & M_{22} & \ddots & M_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{61} & M_{62} & \dots & M_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ k_y \\ k_z \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Ce qui donne :

$$Ec(S_a/R_0) = \frac{1}{2} \dot{\theta}_{x20}^2 [k_y(M_{22}k_y + M_{23}k_z + M_{24}) + k_z(M_{32}k_y + M_{33}k_z + M_{34}) + M_{42}k_y + M_{43}k_z + M_{44}].$$

L'application numérique donne :

$$I_a = 2,37 \cdot 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

### Question 25

La période d'oscillation propre du système sans masse ajoutée est donnée par :

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{A}{B}} = 46,8 \text{ s.}$$

En tenant compte de la masse ajoutée on obtient :

$$T'_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{A+I_a}{B}} = 56,4 \text{ s.}$$

### Question 26

#### Mise en place de la modélisation analytique

La modélisation numérique permet d'imposer un effort horizontal (Pulling Force). Il faudrait alors ajouter dans le modèle une action mécanique extérieure s'appliquant sur le flotteur de la même façon qu'est modélisée l'action du vent. On obtiendrait alors une nouvelle équation de mouvement qui aurait la même forme que celle présentée à la question 20, mais avec un second membre différent.

Il faudrait alors résoudre cette équation pour obtenir les valeurs de l'angle  $\theta_{x10}$  qui donnerait l'angle Pitch. De là, on pourrait en tirer par des relations géométriques les positions des centres de gravité. Pour obtenir les tensions dans les lignes d'ancrage, il faudrait écrire les théorèmes généraux de la dynamique en projection selon les directions  $\vec{y}_0$  et  $\vec{z}_0$ . On pourrait aussi écrire le théorème du moment dynamique selon la direction  $(B, \vec{x}_0)$  par exemple.

#### Analyse des résultats

Position du centre de gravité : le déplacement du centre de gravité semble cohérent puisqu'il se dirige vers le bas et vers la droite lorsque l'effort de traction augmente. L'angle de tangage augmente bien avec l'augmentation de l'effort de traction. Pour un angle de tangage nul, les tensions dans les lignes d'ancrage centrales et latérales le sont également. Lorsque l'effort de traction augmente la tension dans les lignes latérales diminue alors que celle de la ligne centrale augmente.

### Question 27

La modélisation conduite dans cette partie permet d'obtenir une équation de mouvement traduisant le comportement dynamique en tangage du système. Cette équation prend en compte les inerties de la structure mais également celles du volume d'eau entraîné par la structure. Les différents paramètres de l'équation de mouvement ont été obtenus en modélisant la poussée d'Archimède s'appliquant sur la structure. La stabilité intrinsèque du problème dépend des paramètres liés à l'angle d'inclinaison des lignes d'ancrage mais également du tirant d'eau. Dans cette partie nous n'avons pas étudié l'influence du vent. Il faudrait pour cela imposer une forme de perturbation venant de l'effet du vent qui interviendrait dans le paramètre  $F_v$  de l'équation de mouvement donnée à la question 20.

**Question 28**

Formulons un type d'éléments fini pour une barre  $B_k$  reliant deux nœuds  $N_i$  et  $N_j$ . En utilisant des éléments poutre 1D on peut traduire la loi de Hooke reliant l'effort normal dans la barre  $B_k$  noté  $F_k$  à son allongement  $\frac{\Delta L_k}{L_k}$ .

$$F_k = E \cdot S_k \cdot \frac{\Delta L_k}{L_k}.$$

On peut exprimer  $L_k$  en fonction des coordonnées des nœuds  $N_i$  et  $N_j$  :

$$L_k = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}.$$

Le vecteur  $\vec{v}_k$  est donné dans la base globale par :

$$\vec{v}_k = \frac{1}{L_k} \begin{pmatrix} x_j - x_i \\ y_j - y_i \\ z_j - z_i \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)} = \begin{pmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{pmatrix}_{(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)}.$$

On peut déterminer l'allongement  $\Delta L_k$  à partir de :

$$\Delta L_k = (\vec{U}_j - \vec{U}_i) \cdot \vec{v}_k.$$

Ainsi l'effort normal dans la barre  $k$ ,  $F_k$  est donné par :

$$F_k = \frac{E \cdot S_k}{L_k} [(u_j^x - u_i^x)v_{xk} + (u_j^y - u_i^y)v_{yk} + (u_j^z - u_i^z)v_{zk}].$$

Il peut également s'écrire sous la forme :

$$F_k = \frac{E \cdot S_k}{L_k} {}^t A_k \cdot U_k.$$

Avec le vecteur  $A_k$  donné par :

$$A_k = \begin{pmatrix} -v_{kx} \\ -v_{yk} \\ -v_{zk} \\ v_{kx} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{pmatrix}.$$

Pour un élément donné, le vecteur inconnu des déplacements est donné par :

$$U_k = \begin{pmatrix} u_i^x \\ u_i^y \\ u_i^z \\ u_j^x \\ u_j^y \\ u_j^z \end{pmatrix}.$$

On peut donner le vecteur effort qui permet de représenter la projection des efforts qu'exerce la barre sur les nœuds  $i$  et  $j$  dans la base  $(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ .

$$F_k^{ij} = \begin{pmatrix} F_{k \rightarrow i}^x \\ F_{k \rightarrow i}^y \\ F_{k \rightarrow i}^z \\ F_{k \rightarrow j}^x \\ F_{k \rightarrow j}^y \\ F_{k \rightarrow j}^z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -v_{kx} \\ -v_{yk} \\ -v_{zk} \\ v_{kx} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{pmatrix} \cdot F_k = A_k \cdot F_k.$$

Ainsi la formulation éléments finis revient à écrire :

$$F_k^{ij} = \frac{E \cdot S_k}{L_k} A_k \cdot {}^t A_k \cdot U_k.$$

On obtient bien la formulation du type :  $K_k \cdot U_k = F_k^{ij}$ .

Avec  $K_k$  la matrice de raideur élémentaire donnée par :

$$K_k = \begin{pmatrix} K_e & -K_e \\ -K_e & K_e \end{pmatrix}.$$

Avec  $K_e$  la matrice définie :

$$K_e = \frac{E \cdot S_k}{L_k} \begin{pmatrix} v_{kx}^2 & v_{xk} \cdot v_{yk} & v_{xk} \cdot v_{zk} \\ v_{xk} \cdot v_{yk} & v_{yk}^2 & v_{yk} \cdot v_{zk} \\ v_{xk} \cdot v_{zk} & v_{yk} \cdot v_{zk} & v_{zk}^2 \end{pmatrix}.$$

### Question 29

Degrés de liberté du système :

- 11 nœuds ;
- 3 degrés de liberté en déplacement par nœud.

Cela donne 33 degrés de liberté hors conditions limites.

### Question 30

**On peut imposer les conditions limites.**

**En déplacement.** Il faut rendre le système isostatique avec une mobilité globale nulle. On peut bloquer le nœud N1 selon toutes les directions, bloquer les déplacements verticaux des nœud N1 et N2 puis bloquer une translation selon  $\vec{x}_0$  ou  $\vec{y}_0$  pour N1 ou N2.

**En effort.** Il faudrait imposer les efforts des lignes d'ancrage. On ne peut pas imposer des conditions limites en efforts sur les degrés de liberté concernés par des conditions limites en déplacement. Par raison de symétrie, la résultante globale des efforts due à l'action des lignes d'ancrage ainsi que du poids et de la poussée hydrostatique ne serait dirigée que selon  $\vec{z}_0$ . On peut alors imposer un effort sur le nœud N3 selon  $\vec{z}_0$  égal à la résultante des actions mécaniques extérieures.

### Question 31

**En déplacement :** il existe plusieurs méthodes pour imposer les conditions limites en déplacement.

Méthode de pénalisation : si les degrés de liberté à imposer sont nuls on peut opter pour cette méthode qui consiste tout simplement à éliminer les degrés de liberté concernés.

Multiplicateurs de Lagrange : cette méthode permet d'imposer des déplacements nuls ou non. Cela consiste à ajouter des degrés de liberté. Les conditions limites en déplacement sont à imposer dans le second membre.

**En effort :** il faut modifier le second membre de l'équation  $K \cdot U = F$  en faisant correspondre dans le vecteur  $F$  le terme correspondant à l'effort à imposer. Avec le choix réalisé à la question précédente, le vecteur  $F$  n'aura qu'un seul terme non nul et il correspondra à la résultante globale de l'effort extérieur.

**Question 32**

Une fois la résolution effectuée, on peut obtenir la contrainte axiale selon le vecteur  $\vec{v}_k$  par la relation suivante :

$$\sigma_k = \frac{F_k}{S_k} = \frac{E}{L_k} {}^t A_k \cdot U_k.$$

avec  $A_k$  et  $U_k$  les deux vecteurs définis aux questions précédentes.

**Question 33**

L'allure de la déformée n'est pas pleinement satisfaisante avec cette formulation éléments finis. On observe notamment qu'au niveau des nœuds N7, N8 et N9, la déformée ne semble pas représenter fidèlement la rigidité des bracons. Il faudrait bloquer les rotations des nœuds concernés.

**Question 34**

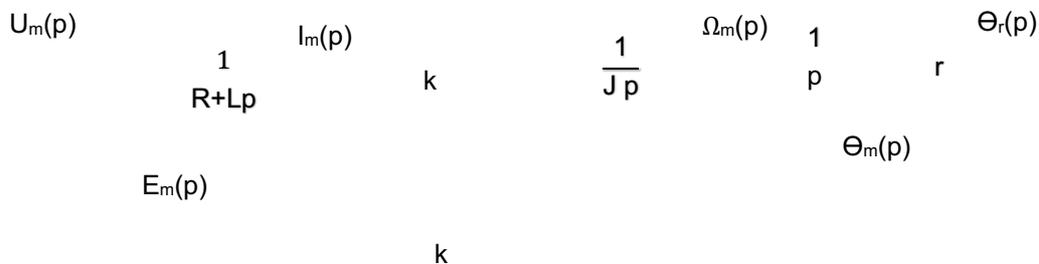
La modélisation éléments finis proposée ne permet pas d'obtenir des degrés de liberté en rotation. Il faudrait pour cela utiliser des éléments « poutre » plus complexes qui prendraient en compte les rotations mais aussi les phénomènes de flexion. Le nombre de degrés de liberté serait multiplié par deux par rapport à la nouvelle formulation puisqu'on ajouterait 3 rotations par nœuds. On obtiendrait alors 66 degrés de liberté.

**Question 35**

Cette modélisation ne prend en compte que les effets statiques. Il est clair qu'il faudrait tenir compte des effets dynamiques. De plus, il faudrait également veiller à ce que la structure soit correctement dimensionnée vis-à-vis du flambage. Les conditions limites en efforts et en déplacement peuvent également évoluer selon des conditions particulières à modéliser : effets du vent ou de la houle.

**5. Étude et conception de la loi de commande en orientation d'une pale**

**Question 36**



**Question 37**

On trouve après calcul :

$$H(p) = \frac{\frac{r}{k}}{\left( 1 + \frac{R}{J} p + \frac{L}{J} p^2 \right) p}$$

On a une fonction de transfert **d'ordre 3 et de classe 1** de la forme :

$$H(p) = \frac{K}{\left( 1 + \frac{2z}{w_0} p + \frac{1}{w_0^2} p^2 \right) p}$$

Avec :

- $K = \frac{r}{k}$ , le gain statique en  $\text{rad} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ;
- $w_0 = \sqrt{\frac{k^2}{LJ}}$ , la pulsation propre en  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$  ;

-  $z = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{J}{Lk^2}}$ , le coefficient d'amortissement.

**Question 38**

On a une courbe présentant une tangente à l'origine de pente nulle, une asymptote en  $+\infty$  de pente non nulle, et de dérivée constante et positive. On reconnaît la réponse à un échelon d'un second ordre de classe 1 de la forme :

$$H(p) = \frac{K}{(1+\tau p)p}$$

Avec :

- $K \cdot u_0$  la pente de l'asymptote en  $+\infty$  :  $K u_0 = 0,027$  (OK entre 0,025 et 0,03)  
 $K \approx 0,0011 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (ok entre 0,001 et 0,0012)
- $\tau \approx 1,5 \text{ s}$  (Ok entre 1,25 et 1,75), l'intersection entre l'asymptote en  $+\infty$  et l'axe des ordonnées.

On trouve un ordre « réel » de la fonction de transfert de 2 contre un ordre théorique de 3.

Ceci est explicable dans le cas où le second ordre de la fonction de transfert théorique est factorisable avec  $z \gg 1$ . Ainsi la fonction de transfert présente un pôle bien plus grand que les deux autres, et donc un temps de réponse négligeable.

Concrètement, cela signifie que le temps de réponse électrique est bien plus faible que le temps de réponse mécanique du moteur. Ainsi, la partie électrique de la motorisation peut être considérée comme un gain pur.

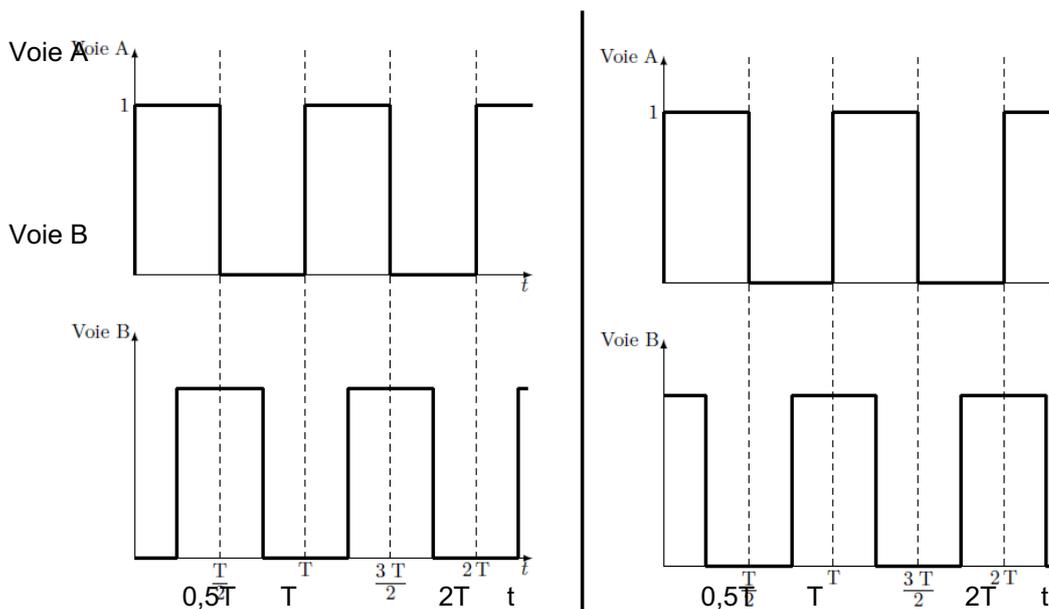
**Question 39**

Un codeur incrémental à 2 voies est un capteur composé d'un disque lié à l'arbre tournant dont on souhaite connaître la position. D'un côté du disque se trouvent des (ou une) diodes électroluminescentes et de l'autre, des phototransistors (un par voie). Chaque voie du disque, excepté l'index éventuellement présent pour compter le nombre de tour, possède des zones alternativement opaques et transparentes. En fonction du sens de rotation du codeur, on obtient, pour une vitesse constante donnée, les signaux suivants pour les deux voies.

La présence de 2 voies permet de diviser par deux la résolution mais aussi de pouvoir détecter le sens de rotation de l'arbre en détectant les fronts montant et descendant des voies A et B.

La résolution de ce capteur est de :

$$S_c = \frac{2 \cdot \pi}{4 \cdot N} = \frac{\pi}{2 \cdot N} \text{ rad}$$



#### Question 40

Le cahier des charges pose une valeur d'écart statique inférieure à  $2 \cdot 10^{-3}$  rad. Il faut donc que la sensibilité de mesure de l'angle de la pale soit inférieure à cette valeur. On veut donc :

$$\frac{S_c}{r} < 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{r}{2 \cdot N \cdot r} < 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{1}{4 \cdot r \cdot 10^{-3}} < N$$

$$N > 15,7$$

On choisit  $N = 16$ .

$$\text{On a alors } B(p) = \frac{2 \cdot N \cdot r}{\pi} \approx 509 \text{ inc} \cdot \text{rad}^{-1}$$

#### Question 41

Afin d'avoir un système correctement asservi, il faut qu'en régime permanent l'erreur soit nulle et que l'entrée et la sortie soient égales. On obtient ainsi en exprimant l'erreur :

$$\varepsilon(p) = D(p)\Theta_{\text{cons}}(p) - B(p)\Theta_p(p)$$

En régime permanent, on obtient alors :

$$0 = (D(p) - B(p)) \Theta_{\infty}$$

$$\text{D'où } D(p) = B(p) = \frac{2 \cdot N \cdot r}{\pi}$$

OU

Afin que le système soit correctement asservi, il faut que l'erreur soit proportionnelle à la différence entre la consigne et la sortie. Ainsi avec l'expression de l'erreur :

$$\varepsilon(p) = D(p)\Theta_{\text{cons}}(p) - B(p)\Theta_p(p)$$

il faut que  $D(p) = B(p) = \frac{2 \cdot N \cdot r}{\pi}$  pour avoir

$$\varepsilon(p) = B(p) (\Theta_{\text{cons}}(p) - \Theta_p(p))$$

#### Question 42

On trace les diagrammes de Bode de  $FTBO(p) = B(p)H(p)$ .

Voir Tracé en Document réponse.

On a  $\omega_{0db}$  légèrement inférieure à  $0,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ . Donc la marge de phase est légèrement supérieure à  $45^\circ$ .

De plus la phase n'atteint jamais  $-180^\circ$ , la marge de gain est donc infinie (ou non définie).

Le système est donc stable en considérant la chaîne de mesure comme parfaite. Néanmoins, on ne répond pas pour le moment à l'exigence de rapidité liée à la pulsation de coupure.

#### Question 43

On a  $FTBO(p) = C_a(p) H(p) B(p) A(p)$

On veut une pulsation de coupure de  $0,25 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  et une marge de phase supérieure à  $45^\circ$ .

– Pulsation de coupure.

$$G_{db}(FTBO(p=0,25j)) = 0 = \underbrace{G_{db}(B(0,25j))}_{54} + \underbrace{G_{db}(H(0,25j))}_{-48} + G_{db}(A(0,25j)) + G_{db}(C_a(0,25j))$$

$$G_{db}(C_a(0,25j)) = 6 - G_{db}(A(0,25j))$$

– Marge de phase.

$$\varphi(\text{FTBO}(p=0,25j)) = \varphi(C_a(0,25j)) + \varphi(A(0,25j)) + \frac{\varphi(B(0,25j))}{0} + \frac{\varphi(H(0,25j))}{-118} > -135^\circ$$

$$\varphi(C_a(0,25j)) > -17 - \varphi(A(0,25j))$$

Ainsi, on veut :

- sans prise en compte du retard de mesure et donc avec  $A(p) = 1$   
 $G_{\text{db}}(C_a(0,25j)) = 6$  et  $\varphi(C_a(0,25j)) > -17$
- avec prise en compte du retard de mesure et donc  $A(p) = e^{-3p}$   
 $G_{\text{db}}(C_a(0,25j)) = 6$  et  $\varphi(C_a(0,25j)) > -17 + \frac{360}{2\pi} \cdot 3 \cdot 0,25 = 26^\circ$

#### Question 44

Un correcteur PI peut avoir un gain en dB compris entre  $-\infty$  et  $+\infty$  et une phase comprise entre 0 et  $-90^\circ$ . Ainsi sa phase ne peut jamais être positive et ce correcteur ne permet pas de respecter le cahier des charges dans le cas de la présence du retard pur mais le permettra si ce retard pur n'est pas présent.

#### Question 45

D'après la figure 18, on peut exprimer  $\Theta_p(p)$  :

$$\Theta_{18p}(p) = C_a(p)H(p) \left( B(p) \left( \Theta_{\text{cons}}(p) - A(p)\Theta_{18p}(p) \right) - G(p)H(p)U_{18}(p) \right)$$

Comme  $H(p)U_{18}(p) = \Theta_{18p}(p)$

$$\Theta_{18p}(p) = \frac{C_a(p)B(p)H(p)}{1 + C_a(p)H(p)(B(p)A(p) + G(p))} \Theta_{\text{cons}}(p)$$

D'après la figure 19, on peut exprimer  $\Theta_p(p)$  :

$$\Theta_{19p}(p) = \frac{C_a(p)B(p)H(p)}{1 + C_a(p)B(p)H(p)} \Theta_{\text{cons}}(p)$$

Pour avoir  $\Theta_{18p}(p) = \Theta_{19p}(p)$ , il faut alors :

$$(B(p)A(p) + G(p)) = B(p)$$

Et donc  $G(p) = B(p)(1 - A(p)) = \frac{2 \cdot N_r}{\pi} (1 - e^{-3p})$

#### Question 46

On a une perturbation de type « pulling force » que l'on peut considérer comme un échelon de perturbation auquel va être ajoutée une composante sinusoïdale modélisant le couple résistant ramené sur l'arbre moteur, lié au changement d'orientation de la pôle par rapport au vent.

En ramenant cette perturbation en amont du processus comme le fait la modélisation proposée, on aboutit alors à une perturbation modélisée par une somme d'entrées Dirac et échelon.

On étudiera alors le cas le plus défavorable (perturbation de type échelon pour  $F(p)$ ).

#### Question 47

D'après la question 38, la structure de commande permettant d'utiliser le schéma fictif de la figure 18 dit qu'on veut :

- $\varphi(C_a(0,25j)) > -17^\circ$

$$-90 + \tan^{-1}(T_a \omega_c) > -17$$

$$\tan^{-1}(T_a \omega_c) > 73^\circ$$

$$T_a > \frac{3,27}{\omega_c}$$

On choisit  $T_a = 14$  s (OK entre 13 et 15)

$$- G_{db}(C_a(0,25j)) = -56$$

$$G_{db}(C_a(0,25j)) = 20 \log \left( \frac{K_a}{T_a \omega_c} \sqrt{1 + T_a^2 \omega_c^2} \right)$$

$$K_a = \frac{10^{-20} T_a \omega_c}{\sqrt{1 + T_a^2 \omega_c^2}} \approx 0,5$$

Ou d'une autre manière :

Comme  $\frac{1}{T_a} \approx 0,06 < \omega_c = 0,25$ , que l'on peut approximer comme il suit.

$$K_a = \frac{1}{B(0,25j)H(0,25j)} \approx 0,5 \text{ (OK entre 0,4 et 0,6)}$$

Pour l'écart statique, les perturbations considérées étant des échelons, le fait de placer une action intégrale en amont de la perturbation et la FTBO étant de classe 2, l'erreur sera alors nulle.

#### Question 48

On aura en régime permanent (consigne nulle, donc sortie nulle avec le réglage précédent de l'asservissement)  $u(t=+\infty) = -f_0$

Ainsi  $u(t)$  est un échelon. Or :

$$X_c(p) = H(p)U(p)$$

$H(p)$  étant de classe 1, et d'ordre 2, on aura donc  $x_c(t=+\infty)$  qui tendra vers l'infini ( $-\infty$  dans notre cas).

Ainsi  $x_c(t)$  diverge, et donc le calculateur présentera une divergence d'une grandeur interne. Une telle structure ne peut être utilisée en l'état sous peine d'avoir rapidement un problème de mémoire dans le calculateur.

#### Question 49

On a le même type de structure de calculateur mais cette fois-ci la fonction de transfert du processus est un second ordre de classe 0. Ainsi les mêmes types de réglages permettront de vérifier le cahier des charges et l'abaissement de la classe de la FT du processus permet de ne plus avoir de divergence de grandeur interne au calculateur.

#### Question 50

Les différentes études menées dans cette partie ont permis de dimensionner la commande afin de respecter le cahier des charges. On aura :

- une structure de commande permettant de pouvoir régler l'instabilité introduite par le retard de mesure (Q42), dont le souci de divergence de grandeur interne a été réglé (Q46) ;
- une erreur statique pour l'orientation des pâles nulle pour des entrées ou des perturbations de type échelon grâce à l'utilisation d'un correcteur PI placé en amont des perturbations (Q40, Q41 et Q43, Q44) ;
- une pulsation de coupure permettant de régler la rapidité du système grâce au dimensionnement du correcteur PI (Q44).

L'exigence 1.3 est donc vérifiée. La commande de l'orientation des pâles sera correctement effectuée.

#### Question 51

Partie 2 : dans cette partie nous étudions la mise en contexte du support d'étude. À l'aide de données météorologique nous mettons en évidence l'intérêt d'utiliser une éolienne flottante. À l'aide d'une étude de similitudes mécaniques, nous étudions les paramètres importants à mettre en évidence dans cette étude. Il en ressort que nous souhaitons surtout étudier ici l'influence des paramètres mécaniques devant les paramètres liés à l'écoulement d'air autour de la structure.

Partie 3 : dans cette partie, l'étude menée permet d'aboutir à une équation différentielle traduisant le mouvement de l'éolienne flottante dans le cas du tangage seul ou sous l'influence du vent. Les actions

mécaniques ont été modélisées et certaines à partir de données expérimentales comme la poussée hydrostatique de l'eau. Ce modèle prend en compte l'interaction fluide-structure. On peut néanmoins contester le fait qu'aucun facteur d'amortissement fluide-structure n'ait été pris en compte. On a alors discuté de la stabilité de la structure et montré que celle-ci dépend de l'inclinaison initiale des lignes d'ancrage mais également du tirant d'eau.

Partie 4 : cette partie permet de procéder à une modélisation éléments finis avec pour objectif de vérifier l'intégrité de la structure. On propose de mettre en place une modélisation avec des éléments poutres bi-rotulés. On discute également des conditions limites en déplacement et en effort à imposer.

Partie 5 : cette partie permet de vérifier la structure d'asservissement en orientation des pales de l'éolienne considérée. On propose de mettre en place une modélisation de la chaîne de régulation, puis d'étudier le régulateur interne en mettant en avant les soucis de stabilité que peut amener l'utilisation d'une compensation de la chaîne de mesure. Enfin, on dimensionne ce régulateur afin de vérifier le cahier des charges.

### **Question 52**

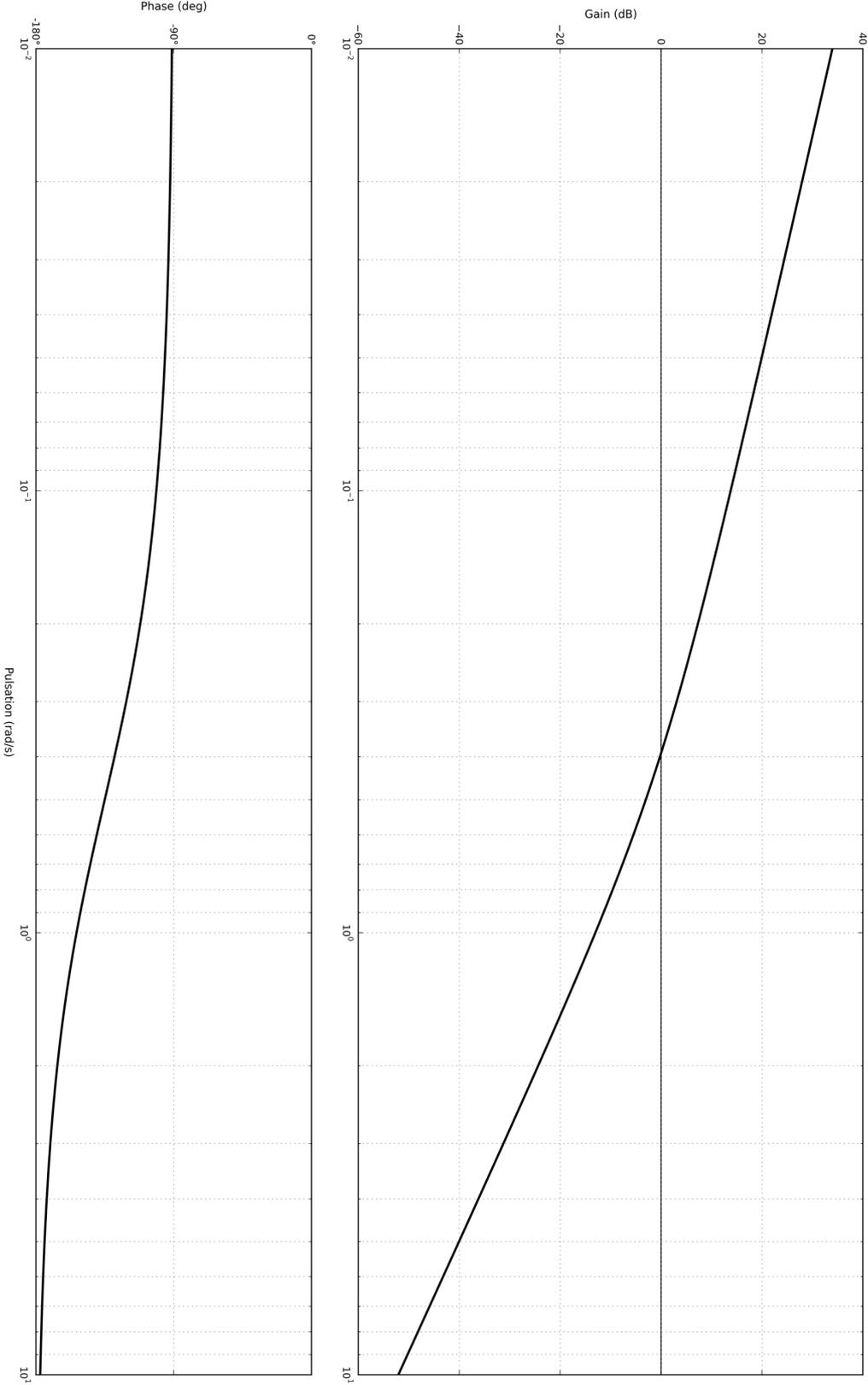
Partie 2 : il serait intéressant d'étudier d'autres données météorologiques pour éventuellement déterminer d'autres conditions efficaces d'utilisation des éoliennes flottantes.

Partie 3 : il faudrait tenir compte des effets de la houle sur la structure mais également des frottements fluides pouvant modifier l'équation de mouvement.

Partie 4 : le modèle proposé n'est pas pleinement satisfaisant mais il permet à l'aide d'une formulation relativement simple d'appréhender le problème. Pour rendre la modélisation plus réaliste il faudrait alors enrichir les éléments finis comme cela a été proposé. Il faudrait également mettre en place une étude dynamique. Une étude du flambage serait aussi pertinente à mettre en œuvre.

Partie 5 : l'asservissement en orientation des pales ayant été dimensionné, il faudrait maintenant mettre en œuvre la même démarche sur l'asservissement en orientation du mât. De plus, afin de vérifier totalement le cahier des charges, une étude de l'asservissement en couple généré par l'éolienne devrait être mis en place afin de vérifier totalement le respect du cahier des charges.

Document réponse 1



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

## 1. Présentation du sujet

Le sujet porte sur le projet « Provence Grand Large » qui prévoit d'installer des éoliennes « Offshore » flottantes à l'horizon 2021. Ce type de production d'énergie offre plus de possibilités de positionnement géographique mais possède un certain nombre de contraintes. L'éolienne sera alors soumise à des mouvements de balancier qui peuvent générer des sollicitations au niveau de la turbine et des pales. La technologie présentée dans le sujet est proposée par **SBM-Offshore** en partenariat avec **IFP Energies nouvelles**. Elle s'appuie sur l'utilisation d'une structure de type TLP (« Tension Leg Platform ») jouant le rôle d'un flotteur sur lequel est positionnée une éolienne. Cette configuration structurelle assure de bonnes performances concernant la stabilité. Dans une première partie du sujet, une analyse permet de comprendre les enjeux de l'utilisation d'un tel système avec l'analyse de données météorologiques pour estimer la puissance potentiellement produite. Une analyse de similitude d'échelle associée à une étude expérimentale, dont les résultats sont utilisés tout au long du sujet, est également proposée. Les autres parties du sujet permettent de vérifier et de valider les différentes exigences associées à ce système.

La vérification de l'exigence de flottabilité et plus particulièrement la stabilité vis-à-vis des conditions extérieures est conduite grâce à une modélisation dynamique de la structure. Il s'agit de quantifier, dans le cas du tangage seul, les caractéristiques inertielles du système. Les actions mécaniques extérieures dues à l'interaction fluide structure sont modélisées en s'appuyant de résultats expérimentaux obtenus sur la maquette présentée dans la partie précédente. L'obtention d'une équation de mouvement décrivant le comportement dynamique du système repose sur l'utilisation d'une approche énergétique. Une résolution analytique ainsi qu'une analyse de résultats de simulations plus poussée est également proposée en fin de partie.

La vérification de l'intégrité de la structure du flotteur est réalisée à l'aide d'un modèle éléments finis utilisant des éléments barres bi-rotulés. Il est demandé de proposer une formulation ainsi que des conditions limites en déplacements et en efforts modélisant le plus précisément possible le comportement réel de la structure. Une analyse des résultats est demandée à partir de la visualisation de la déformée de la structure ce qui a pour conséquence de proposer une nouvelle formulation permettant d'obtenir des résultats plus réalistes.

Dans la partie qui vise à vérifier l'exigence de contrôle de l'orientation des pâles de l'éolienne, il est demandé de modéliser la chaîne de régulation de cette orientation puis de valider et dimensionner la structure d'asservissement mise en place.

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

[http://media.devenirensignant.gouv.fr/file/agregation\\_externer/88/2/s2019\\_agreg\\_externer\\_sii\\_mecanique\\_2\\_1093882.pdf](http://media.devenirensignant.gouv.fr/file/agregation_externer/88/2/s2019_agreg_externer_sii_mecanique_2_1093882.pdf)

## 2. Analyse globale des résultats

Le sujet a été construit de manière graduelle avec des parties indépendantes pour que les candidats ne restent pas bloqués face à une difficulté. La plupart des candidats a abordé les questions dans l'ordre proposé dans le sujet. Les deux premières parties ont été systématiquement traitées. Les parties suivantes ont été moins abordées. Certains candidats, brillants, ont pu traiter quasiment l'ensemble du sujet et exprimer tout leur potentiel.

Une épreuve de ce type ne peut être réussie sans rigueur, ni maîtrise des outils de modélisation. La qualité des analyses sur les questions qualitatives et quantitatives est également primordiale. Un grand nombre de copies sont très peu fournies voire vides pour une épreuve de 6 heures. Aussi, le jury encourage les futurs

candidats à traiter le plus de parties et de questions possibles. Il est important de ne pas négliger les questions de synthèse qui permettent de procéder à un bouclage entre les modélisations et les exigences à vérifier. Enfin, le jury note généralement que beaucoup de soin est apporté aux copies même si parfois la qualité de la rédaction, de l'orthographe et des schématisations proposées pourrait être améliorée.

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

#### *Partie 2 : mise en situation*

Cette partie concerne la mise en situation du problème. Elle a pour objectif de comprendre les enjeux de l'étude. Le questionnement repose dans un premier temps sur l'analyse des données météorologiques pour estimer de la production potentielle en énergie. Une attention particulière a été apportée sur la justification et la rigueur des applications numériques. Certains candidats font l'effort de soigner la présentation des résultats en étant concis et précis avec l'utilisation de tableaux. Les candidats, ayant pris soin de bien vérifier les différentes unités, réussissent sans problème les différentes applications numériques et obtiennent les bonnes conclusions. Une étude de similitude se basant sur l'estimation des nombres adimensionnés de Reynolds et Froude permet de discuter des phénomènes prépondérants pris en compte sur une étude expérimentale présentée dans le sujet et qui servira pour la partie suivante. Les analyses claires, synthétiques et précises reprenant les points de comparaison des échelles et des phénomènes physiques prépondérants ont été récompensées.

#### *Partie 3 : modélisation du comportement dynamique du flotteur et justification de son architecture*

Cette partie concerne la modélisation dynamique de la structure pour en étudier la stabilité en fonction des actions mécaniques extérieures. Une approche énergétique est proposée à partir d'une étude cinétique pour déterminer l'énergie cinétique. Les meilleurs candidats ont fait la différence sur la rigueur apportée concernant les outils de modélisation mécanique. Il est important de rappeler que la maîtrise de ces outils est primordiale pour réussir cette épreuve. Une partie de la puissance des actions mécaniques extérieures est estimée à partir de données expérimentales. La qualité des différentes analyses de ces données est un élément déterminant. Enfin, il est demandé d'analyser l'équation de mouvement ainsi que les résultats de la simulation pour discuter de l'influence des paramètres géométriques (inclinaison des lignes d'ancrages et tirant d'eau) sur la stabilité de la structure. Les candidats ayant réussi à analyser finement et méthodiquement les résultats de simulation ont réussi à se démarquer.

#### *Partie 4 : dimensionnement mécanique du flotteur*

Cette partie n'a été que peu traitée. Cependant les candidats qui l'ont abordée ont pu en tirer profit. Pour réussir cette partie, il est important de maîtriser les concepts permettant de formuler une méthode des éléments finis et de comprendre les différents paramètres tels que les conditions limites ou les degrés de liberté à imposer. Il est important de structurer les réponses aux questions portant sur les analyses et savoir proposer des modifications pertinentes de la modélisation numérique.

#### *Partie 5 : asservissement de l'orientation des pales*

Bien que comprenant des réflexions à la portée du plus grand nombre, cette partie n'a été abordée que par trop peu de candidats, certainement du fait de son positionnement en fin de sujet. Le sujet demandait ici aux candidats de modéliser, analyser et dimensionner la régulation de l'orientation des pales de l'éolienne.

Elle comprenait une première phase d'étude de la modélisation de la motorisation utilisée dans le domaine de Laplace. À partir du modèle de connaissance usuel d'un moteur à courant continu, les candidats étaient amenés à poser des hypothèses de simplification en s'appuyant sur des relevés expérimentaux. Cette première phase a été très bien réussie par les candidats l'ayant abordée.

Une deuxième phase s'intéressait à la modélisation de la technologie de capteur utilisé pour la mesure de l'orientation des pales, et à son impact sur la stabilité de la régulation devant être mise en place. Le jury déplore que trop peu de candidats aient abordé cette étude, comportant pourtant des questions faisant appel aux bases de la théorie des systèmes linéaires continus et invariants (SLCI).

Enfin, une dernière phase proposait aux candidats d'étudier une architecture de régulation mise en place dans les systèmes présentant un retard sur la chaîne de mesure, afin de pouvoir régler convenablement les performances d'asservissement désirées. Elle demandait une plus grande maîtrise des outils de la théorie des SLCI, mettant en avant des problèmes de divergence de grandeurs internes et les solutions à mettre en œuvre pour les résoudre. Seulement quelques candidats ont traité ce dernier temps de cette partie, la réussissant dans la plupart des cas. Le jury félicite ces candidats pour avoir su mettre en avant leur maîtrise des outils scientifiques de haut niveau.

#### Partie 6 : synthèse

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

### 4. Conclusion

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

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

### 5. Résultats

268 copies ont été évaluées. La moyenne des notes obtenues est de 8/20, avec un écart-type de 3,4/20 avec :

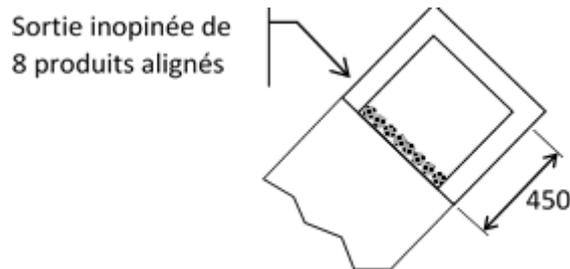
- 20/20 comme meilleure note ;
- 2,4/20 comme note la plus basse.



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

## 1. Exigence d'enveloppe de travail : accessibilité et flexibilité

### Question 1



$$d = \sum_{i=1}^8 d_i = \sum_{i=1}^8 t \times V = 8 \times 0,3s \times (10m/60s) = 400 \text{ mm}$$

Valeur inférieure à la longueur de 450 mm du tapis découvert à la sortie : marge de 50 mm avant évacuation.

Remarque : si une autre ligne de 8 produits alignés se présente à 350 mm, celle-ci peut être entièrement manipulée sans rejet. Cela conditionne donc la valeur du flux maximal des produits à surgeler et à mettre en boîte sans débordement (goulot d'étranglement).

### Question 1.2

Productivité de 800 produits par min pour 4 lignes → 25 boîtes contenant 8 produits par min et par ligne → déplacement de 25 fois 130 mm par min.

$$V_{\text{bande d'évacuation}} = 3,25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = 0,0542 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Question 1.3

Premièrement, la zone de saisie est entièrement superposée à la zone de travail du robot.

Deuxièmement, plusieurs boîtes de 130 mm sont accessibles dans la zone de dépose ; ce qui laisse la possibilité de contrôler la vitesse de la bande transporteuse.

Troisièmement, la cadence du robot est compatible avec la productivité attendue.

### Question 1.4

$$\vec{OB} = L_1 \vec{X}_1 + L_2 \vec{X}_2$$

$$\vec{OB} = L_1 (\cos \theta_{10} \vec{X}_0 + \sin \theta_{10} \vec{Y}_0) + L_2 (\cos \theta_{21} \vec{X}_1 + \sin \theta_{21} \vec{Y}_1)$$

$$\text{Or } \vec{X}_1 = \cos \theta_{10} \vec{X}_0 + \sin \theta_{10} \vec{Y}_0 \text{ et } \vec{Y}_1 = -\sin \theta_{10} \vec{X}_0 + \cos \theta_{10} \vec{Y}_0$$

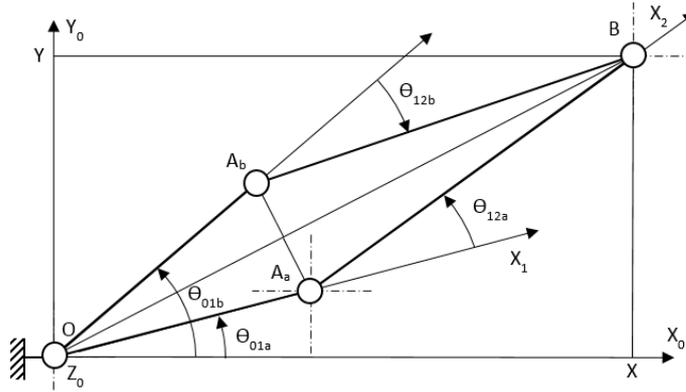
Alors :

$$\vec{OB} = [L_1 \cos \theta_{10} + L_2 (\cos \theta_{21} \cos \theta_{10} - \sin \theta_{21} \sin \theta_{10})] \vec{X}_0 + [L_1 \sin \theta_{10} + L_2 (\cos \theta_{21} \sin \theta_{10} + \sin \theta_{21} \cos \theta_{10})] \vec{Y}_0$$

Donc :

$$\vec{OB} = [L_1 \cos \theta_{10} + L_2 \cos (\theta_{10} + \theta_{21})] \vec{X}_0 + [L_1 \sin \theta_{10} + L_2 \sin (\theta_{10} + \theta_{21})] \vec{Y}_0$$

**Question 1.5**



Si  $\vec{OB} = X\vec{X}_0 + Y\vec{Y}_0$ , alors

$$X^2 + Y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2[\cos\theta_{10}\cos(\theta_{10} + \theta_{21}) + \sin\theta_{10}\sin(\theta_{10} + \theta_{21})]$$

$$X^2 + Y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2\cos\theta_{21}$$

$\theta_{21} = \pm \arccos\left(\frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right)$  d'où 2 solutions pour la valeur de  $\theta_{21}$  :  $\theta_{21}(a)$  et  $\theta_{21}(b) = -\theta_{21}(a)$

Connaissant  $\theta_{21}(a)$  ou  $\theta_{21}(b)$ , on peut trouver  $\theta_{10}(a)$  ou  $\theta_{10}(b)$  correspondant.

**Question 1.6**

Connaissant la position de saisie et la position de dépose, on détermine les angles que doivent effectuer respectivement l'axe 1 et l'axe 2 :  $\Delta\theta_{10}$  et  $\Delta\theta_{21}$ .

Mais on sait qu'il y a deux solutions pour chacun de ces angles :  $\Delta\theta_{10}(a)$  et  $\Delta\theta_{21}(a)$  ou  $\Delta\theta_{10}(b)$  et  $\Delta\theta_{21}(b)$ .

On calcule le temps T nécessaire pour le déplacement du robot pour la configuration (a), et (b) :

$$T_{10} = \frac{\Delta\theta_{10}}{\dot{\theta}_{10}}$$

$T(a) = \text{Max}\left(\frac{\Delta\theta_{10}(a)}{\dot{\theta}_{10}} ; \frac{\Delta\theta_{21}(a)}{\dot{\theta}_{21}}\right)$  (les mouvements des axes 1 et 2 sont simultanés mais n'ont pas la même durée)

$$T(b) = \text{Max}\left(\frac{\Delta\theta_{10}(b)}{\dot{\theta}_{10}} ; \frac{\Delta\theta_{21}(b)}{\dot{\theta}_{21}}\right)$$

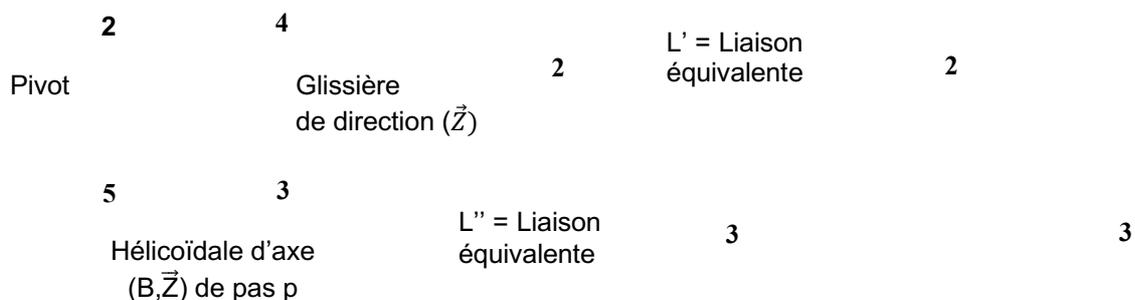
On fait le choix de la configuration (a) ou (b) sur le temps minimal ; c'est-à-dire,  $\min(T(a) ; T(b))$ .

**Question 1.7**

$${}^B V_{23} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} (\vec{\omega}_{23}, V_{23}) (\vec{X}_2, \vec{Y}_2, \vec{Z}_2)$$

**Question 1.8**

Pivot d'axe  $(B, \vec{Z})$



La structure est une chaîne fermée de solides. Mais, pour trouver la liaison équivalente entre le solide 2 et le solide 3, il faut déterminer la liaison équivalente L'en considérant la structure en série 2-4-3 :

$$V' \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad \text{car } V' = V_{32} = V_{34} + V_{42}$$

$$B \begin{pmatrix} \omega_{42} & V_{34} \end{pmatrix} (\vec{X}_2, \vec{Y}_2, \vec{Z}_2)$$

de même pour L'' :  $V'' \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$

$$B \begin{pmatrix} \omega_{35} + \omega_{52} & (\frac{p}{2\pi}) \cdot \omega_{35} \end{pmatrix} (\vec{X}_2, \vec{Y}_2, \vec{Z}_2)$$

La liaison équivalente est issue de la structure en parallèle des liaisons L' et L'' :

$$V' = V'' \rightarrow \omega_{35} + \omega_{52} = \omega_{42} \text{ et } (\frac{p}{2\pi}) \cdot \omega_{35} = V_{34}$$

Donc :

$$V_{32} \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

$$B \begin{pmatrix} \omega_{35} + \omega_{52} & (\frac{p}{2\pi}) \cdot \omega_{35} \end{pmatrix} (\vec{X}_2, \vec{Y}_2, \vec{Z}_2)$$

### Question 1.9

$$\omega_{32} = \omega_{42} = N4$$

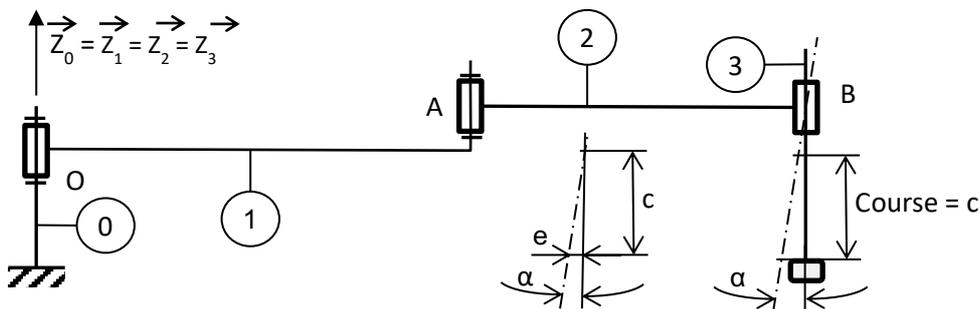
$$V_{32} = (\frac{p}{2\pi}) \cdot \omega_{35} = (\frac{p}{2\pi}) \cdot (\omega_{32} + \omega_{25}) = (\frac{p}{2\pi}) \cdot (N4 - N5)$$

### Question 1.10

Le commentaire de la compacité de la solution constructive est attendu ici.

## 2. Exigence de grande performance de positionnement

### Question 2.1

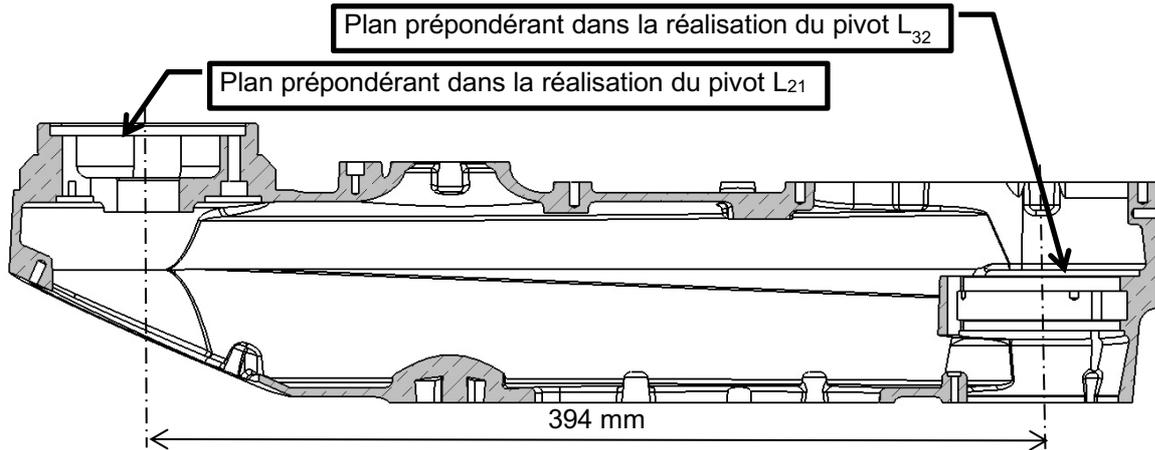


L'écart de position de point de saisie ou de dépose est généré par un écart angulaire dû à un défaut de parallélisme des axes. Cet écart d'orientation entre le point visé et le point atteint dépend de la course \$c\$. L'écart angulaire étant faible (\$< 1^\circ\$), l'écart de position \$e\$ s'exprime par :  $e = \alpha \times c$ .

Une valeur réaliste d'écart angulaire \$\alpha\$ vaut environ \$10^{-4}\$ rad qui pourrait être provoqué par un jeu mécanique dans une articulation, un défaut d'assemblage de pièces mécaniques (contact solide), un défaut géométrique de pièces mécaniques (spécifications géométriques), ...

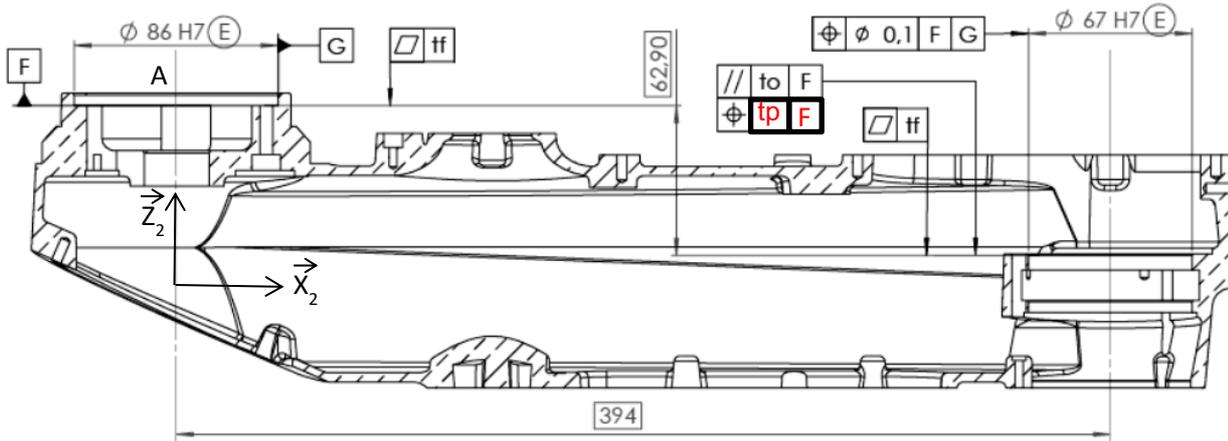
Étant donné la course maximale de 200mm de l'axe 4, la valeur du défaut de position est de :  $e = 2 \cdot 10^{-2}$  mm.

**Question 2.2**



Le plan dans le groupe fonctionnel de surfaces de contact pour réaliser la liaison pivot a une étendue qui le rend prépondérant pour l'orientation de l'axe du pivot. De plus, le contact est assuré par un réseau de vis de serrage.

**Question 2.3**



Avec  $to \ll tp$

Le tenseur des petits déplacements s'exprime ainsi :

$$D_{32} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_{32} & 0 \\ \Delta\beta_{32} & 0 \\ 0 & \Delta z_{32} \end{Bmatrix}_B (\vec{X}_2, \vec{Y}_2, \vec{Z}_2) \quad \text{d'où } \overrightarrow{\Delta\theta_{32}} = \Delta\alpha \vec{X}_2 + \Delta\beta \vec{Y}_2$$

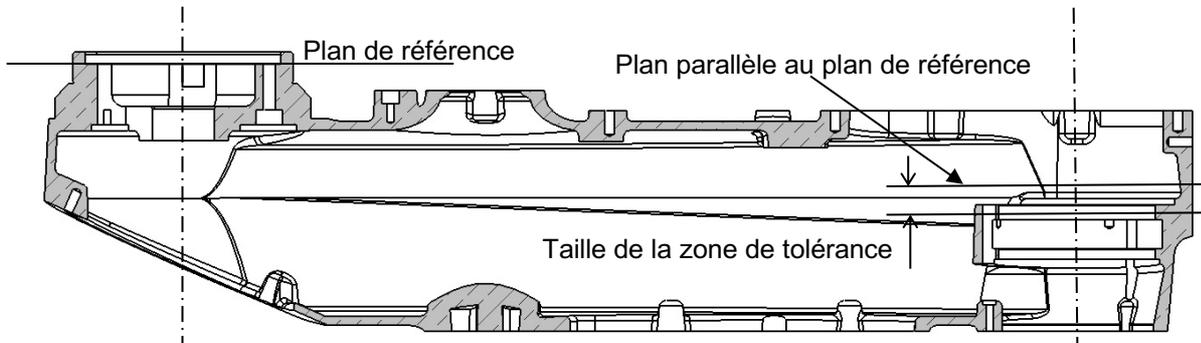
**Question 2.4**

$D_{10} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_{10} & 0 \\ \Delta\beta_{10} & 0 \\ 0 & \Delta z_{10} \end{Bmatrix}_A (\vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$	$D_{21} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_{21} & 0 \\ \Delta\beta_{21} & 0 \\ 0 & \Delta z_{21} \end{Bmatrix}_A (\vec{X}_1, \vec{Y}_1, \vec{Z}_1)$	$D_{32} \begin{Bmatrix} \Delta\alpha_{32} & 0 \\ \Delta\beta_{32} & 0 \\ 0 & \Delta z_{32} \end{Bmatrix}_B (\vec{X}_2, \vec{Y}_2, \vec{Z}_2)$

Connaissant chaque défaut d'orientation provenant de chaque liaison ( $L_{21}$ ,  $L_{32}$ ), le défaut d'orientation global peut être déterminé par la relation décrivant une chaîne en série :

- l'invariant s'exprime par  $\Delta\vec{\theta}_{31} = \Delta\alpha_{10} \vec{X}_0 + \Delta\beta_{10} \vec{Y}_0 + \Delta\alpha_{21} \vec{X}_1 + \Delta\beta_{21} \vec{Y}_1 + \Delta\alpha_{32} \vec{X}_2 + \Delta\beta_{32} \vec{Y}_2$  ;
- le petit déplacement en D s'exprime par le moment de  $D_{01} + D_{21} + D_{32}$  des 2 torseurs.

### Question 2.5



### Question 2.6

Toutes les expressions de spécifications dimensionnelles et/ou géométriques justifiées fonctionnellement ont été acceptées. On pouvait par exemple spécifier la perpendicularité des cylindres constituant les centrages courts par rapport au plan prépondérant.

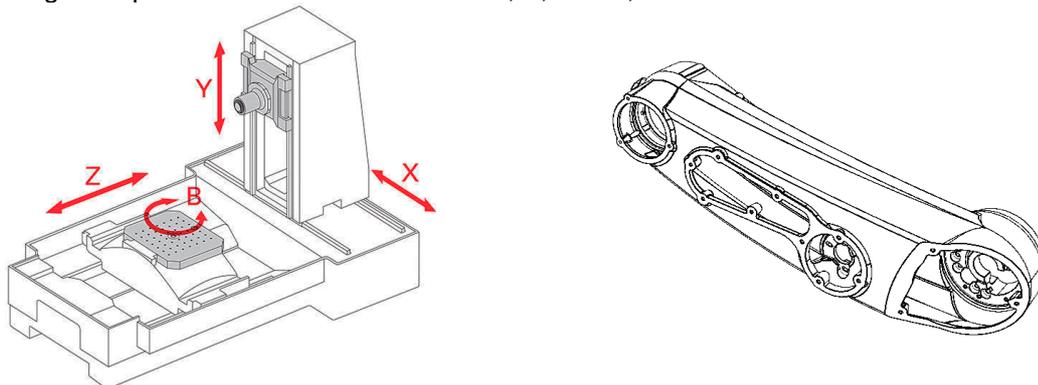
### Question 2.7

Un seul posage dans une phase unique d'usinage a les avantages suivants :

- gain de temps de fabrication (pas de démontage-remontage de pièce, pas d'encours) ;
- qualité géométrique accrue (pas de remise en position) ;
- coût de manutention et d'équipement réduit (un seul porte-pièce, pas de temps de non production).

### Question 2.8

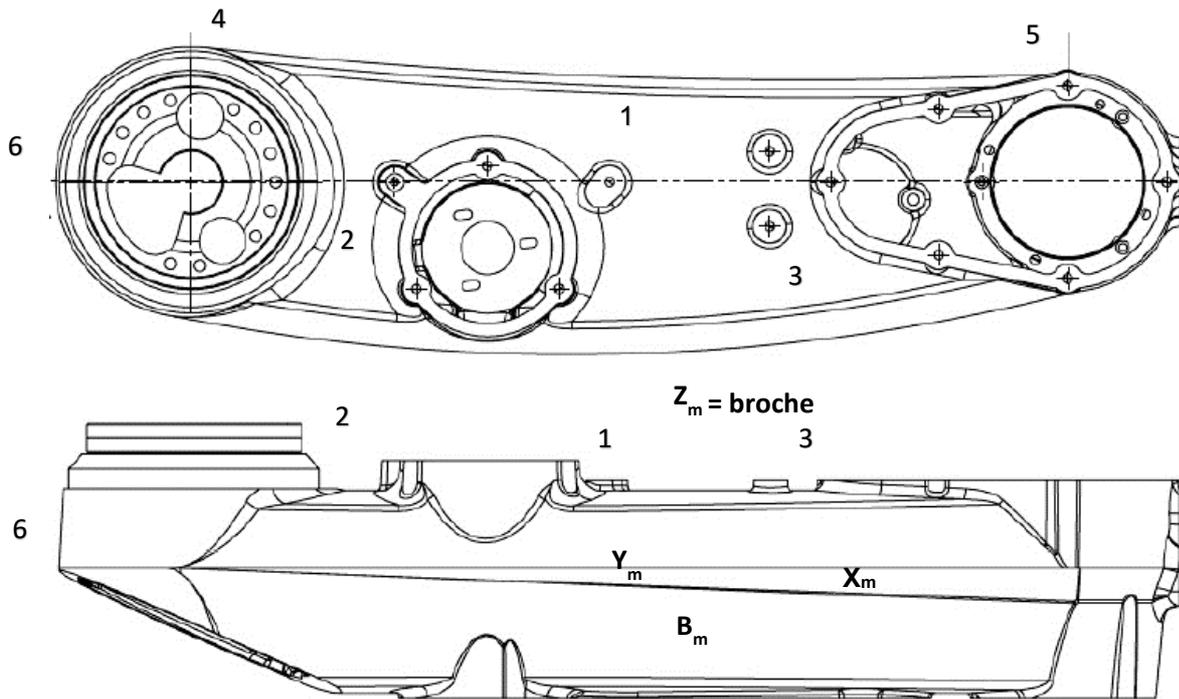
Le centre d'usinage doit posséder au minimum 4 axes X, Y, Z et B, Z étant horizontal.



### Question 2.9

Plusieurs propositions étaient acceptables en veillant à :

- laisser les surfaces à usiner accessibles ;
- enlever un nombre suffisant de degrés de liberté répartis de façon pertinente ;
- être compatible avec l'architecture de machine et l'orientation des axes proposés précédemment.



Autre solution : 3 pattes à l'extérieur de l'avant-bras sont ajoutées lors du moulage afin de constituer des surfaces de mise en position qui seront enlevées en fin d'usinage.

**Question 2.10**

Symbole de la spécification	Éléments Non-idéaux		Éléments Idéaux		
	Élément(s) tolérancé(s)	Élément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance	
Type de spécification <input type="checkbox"/> forme <input type="checkbox"/> position <input type="checkbox"/> orientation	<input type="checkbox"/> unique <input type="checkbox"/> groupe	<input type="checkbox"/> unique <input type="checkbox"/> multiples	<input type="checkbox"/> simple <input type="checkbox"/> commune <input type="checkbox"/> système	<b>forme/taille</b> <input type="checkbox"/> simple <input type="checkbox"/> composé	<b>Situation par rapport aux Références spécifiées</b>
Schéma de la spécification sur le nominal 	description littérale Surface nominale plane	description littérale Surface nominale plane	description littérale Plan tangent ext. mat. minimisant le plus grand des défauts	description littérale Volume entre 2 plans parallèles distant de to	description littérale Plans de la zone de tolérance parallèles à la référence spécifiée
	croquis	croquis	croquis  mini	croquis  to	croquis Référence  to //
Expression de la contrainte fonctionnelle associée à cette spécification : La surface nominale plane tolérancée doit pouvoir être entièrement contenue entre deux plans parfaits distants de to et parallèles au plan parfait tangent du côté libre de matière à la surface réputée plane F					

### Question 2.11

La taille de la zone de tolérance de planéité (forme)  $t_f$  doit être strictement inférieure à la taille de la zone de tolérance de parallélisme (orientation). Dans le cas contraire, l'écriture de la spécification de forme est inutile car la spécification d'orientation limite déjà le défaut de forme.

### Question 2.12

Nombre de points palpés par élément : 12 points palpés (densité optimale compte tenu de la valeur de la spécification de forme).

Position des points palpés : répartition régulière, sur un cercle ici.

Construction d'éléments géométriques parfaits : définition géométrique avec le nombre minimal de points, construction géométrique à partir d'éléments géométriques...

Critères d'association aux nuages de points le cas échéant : méthode des moindres carrés ou autres.

Contrôles :

Par une méthode « ensembliste », la gamme de mesure pour le contrôle se décrit ainsi :

- palpé de 12 points de l'élément de référence  $F - \{M_i; 0 \leq i \leq 12\}$  ;
- détermination du plan  $F$  - construction du plan des moindres carrés de normale  $\vec{N}_F$  et recherche du point qui en est le plus éloigné du côté extérieur matière  $M^*_F$ . Le plan  $F$  passe par  $M^*_F$  et a  $\vec{N}_F$  pour normale (cela ne constitue pas le plan tangent extérieur matière mais en est une bonne approximation lorsque le critère d'association n'est pas accessible) ;
- palpé de 12 points de l'élément tolérancé -  $\{P_i(x_i, y_i, z_i); 0 \leq i \leq 12\}$  ;
- calcul de la distance  $d_i$  de chaque point palpé  $P_i$  au plan de référence  $F - (d_i)$  avec  $0 \leq i \leq 12$  ;
- recherche de la distance maximale  $d_{iM}$  et de la distance minimale  $d_{im}$  ;
- vérification du respect de la tolérance -  $(d_{iM} - d_{im}) \leq t_o$ .

Une autre méthode de vérification de conformité s'éloigne de l'esprit de la norme. En revanche, pour régler un moyen de production, une autre méthode peut être utilisée afin de déterminer la valeur des écarts géométriques et d'agir sur la machine-outil pour les réduire.

### Question 2.13

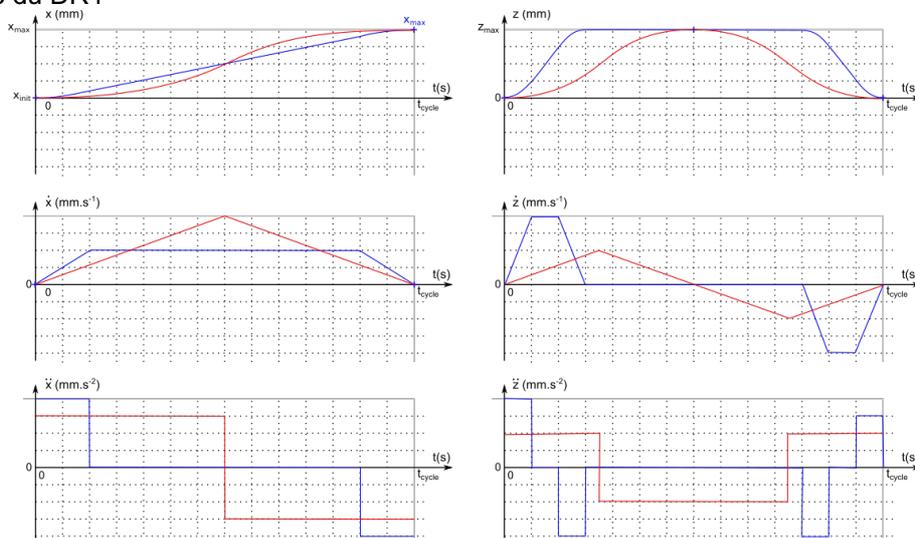
Il y a deux solutions pour améliorer la précision d'orientation des axes :

- introduire des éléments de réglage (cale...) à chaque liaison  $L_{10}$ ,  $L_{21}$  et  $L_{32}$  ;
- compenser par logiciel de commande des axes (cartographie du volume de travail).

## 3. Performance dynamique et exigence de cadence

### Question 3.1

Chronogramme du DR4



### Question 3.2

En ne considérant qu'un demi-cycle (entre  $t_0=0s$  et  $t_2 = t_{cycle} / 2$ ) où l'axe 3 doit réaliser la montée du préhenseur. En s'appuyant sur les graphes précédents, on déduit les conditions suivantes (avec B, une constante à déterminer) :

à $t_0 = 0s$	à $t_1$	à $t_2 = t_{cycle} / 2$
$z(0) = 0$	inconnu	$z(t_2) = z_{max}$
$\dot{z}(0) = 0$	$\dot{z}(t_1) = \dot{z}_{max}$	$\dot{z}(t_2) = 0$
$\ddot{z}(0) = B$	inconnu	$\ddot{z}(t_2) = -B$

Par intégrations successives et comme à  $t_0=0s$ ,  $\dot{z}(0)=0$ , à  $t_2$   $\dot{z}(\frac{t_{cycle}}{2})=0$ , et en supposant la continuité des positions et des vitesses en  $t = t_1$ , on confirme que  $t_1 = \frac{t_{cycle}}{4}$  et on déduit que  $B = \frac{z_{max}}{t_1^2} = \frac{16 \times z_{max}}{t_{cycle}^2}$ .

Pour que les cadences annoncées soient réalisées, il faut donc que la vitesse maximale disponible de déplacement vertical permette d'atteindre la vitesse maximale nécessaire (atteinte à  $t = t_1$ )

$$\dot{z}_{max} \geq \dot{z}(t_1) = \frac{B \times t_{cycle}}{4} = \frac{4 \times z_{max}}{t_{cycle}}$$

et que l'accélération maximale disponible du robot soit

$$\ddot{z}_{max} \geq \ddot{z}(t_1) = B = \frac{16 \times z_{max}}{t_{cycle}^2}$$

### Question 3.3

Pour un cycle courte distance 25-300-25 et une masse de 1 kg, la distance verticale parcourue est  $z_{max} = 25$  mm. Le robot doit réaliser 170 allers-retours en 60 s, soit l'équivalent de 340 allers, ce qui donne un temps de cycle  $t_{cycle} = 0,176s$ .

La vitesse verticale maximale nécessaire est donc  $\dot{z}_{max} = \frac{4 \times 25}{0,176} = 568,18 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; l'accélération verticale

maximale nécessaire est donc  $\ddot{z}_{max} = \frac{16 \times 25}{0,176^2} = 12\,913 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$

Pour un cycle courte distance 50-700-50 et une masse de 1 kg, la distance verticale parcourue est  $z_{max} = 50$  mm. Le robot doit réaliser 95 aller-retours en 60 s, soit l'équivalent de 190 allers, ce qui donne un temps de cycle  $t_{cycle} = 0,316s$ .

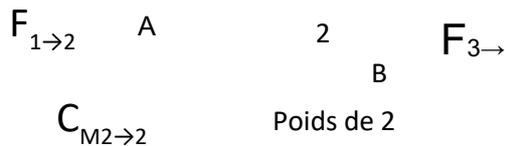
La vitesse verticale maximale nécessaire est donc  $\dot{z}_{max} = \frac{4 \times 50}{0,316} = 633,33 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; L'accélération verticale

maximale nécessaire est donc  $\ddot{z}_{max} = \frac{16 \times 50}{0,316^2} = 8\,022 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$

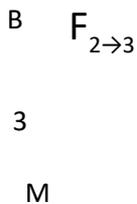
On valide que dans les deux cas la vitesse maximale disponible verticalement  $V_{32} = 1790 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  est suffisante. On peut de plus affirmer que l'accélération verticale disponible doit être  $\dot{V}_{32} \geq 12\,913 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ .

### Question 3.4

L'avant-bras est soumis à l'action du moteur  $M_2$ , aux actions mécaniques de liaisons  $L_{21}$  et  $L_{32}$  et à la pesanteur dans son mouvement par rapport à un référentiel considéré galiléen.



Or, en n'isolant que l'avant-bras, l'étude ne peut déboucher car elle comporte beaucoup trop d'inconnues, notamment de liaisons. Donc l'étude de l'ensemble 3 + M permet de déterminer les inconnues de liaison  $L_{32}$  si on utilise le PFD.



### Question 3.5

Les sollicitations dans l'avant-bras dépendent de la position du robot. En position étendue, maximisant l'éloignement de la masse, l'avant-bras (2) va essentiellement être sollicité en traction et flexion. Les composantes les plus influentes sur la déformée seront  $X_{2 \rightarrow 3}$ ,  $Y_{2 \rightarrow 3}$  et  $M_{2 \rightarrow 3}$  ou  $L_{2 \rightarrow 3}$ .

### Question 3.6

On choisit  $\theta_{21}$  qui maximise la distance entre masse embarquée et point fixe. On prendra donc  $\theta_{21} = 0$  pour les applications numériques ci-dessous  $\cos \theta_{21} = 1$  et  $\sin \theta_{21} = 0$ .

On se place au pire des cas, lorsque les vitesses et accélérations angulaires sont à leur maximum.

Données numériques :  $M = 1 \text{ kg}$ ,  $m_3 = 3,95 \text{ kg}$ .  $L_1 = 0,406 \text{ m}$  ;  $L_2 = 0,394 \text{ m}$ ,  $h = 0,3 \text{ m}$  ;

$\dot{\theta}_{10} = 600 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1} = 10,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  ;  $\dot{\theta}_{20} = 2\,200 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1} = 38,4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  ;  $\ddot{\theta}_{10} = 7000 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-2} = 122,1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$  ;

$\ddot{\theta}_{20} = 23\,000 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-2} = 401,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$ .

$$X_{2 \rightarrow 3} = (M + m_3) \cdot (-L_2 \dot{\theta}_{20}^2 - L_1 \dot{\theta}_{10}^2 \cos \theta_{21} - L_1 \ddot{\theta}_{10} \sin \theta_{21})$$

$$X_{2 \rightarrow 3} = 4,95 \cdot (-0,394 \times 38,4^2 - 0,406 \times 10,5^2) - 4,95 \cdot (-580,98 - 44,76) = 3097,41 \text{ N}$$

$$Y_{2 \rightarrow 3} = (M + m_3) \cdot (L_2 \ddot{\theta}_{20} + L_1 \ddot{\theta}_{10} \cos \theta_{21} + L_1 \dot{\theta}_{10}^2 \sin \theta_{21})$$

$$Y_{2 \rightarrow 3} = 4,95 \cdot (0,394 \times 401,2 + 0,406 \times 122,1) - 4,95 \cdot (158,07 + 49,57) = 1027,82 \text{ N}$$

$$Z_{2 \rightarrow 3} = (M + m_3)g = 4,95 \cdot 9,81 = 48,56 \text{ N}$$

$$L_{2 \rightarrow 3} = Mh \cdot (L_2 \ddot{\theta}_{20} + L_1 \ddot{\theta}_{10} \cos \theta_{21} + L_1 \dot{\theta}_{10}^2 \sin \theta_{21})$$

$$L_{2 \rightarrow 3} = 1 \times 0,3 \times (0,394 \times 401,2 + 0,406 \times 122,1) = 0,3 \times (158,07 + 49,57) = 62,29 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{2 \rightarrow 3} = Mh \cdot (L_2 \ddot{\theta}_{20} - L_1 \dot{\theta}_{10}^2 \sin \theta_{21} - L_1 \ddot{\theta}_{10} \cos \theta_{21})$$

$$M_{2 \rightarrow 3} = 1 \times 0,3 \cdot (0,394 \times 401,2 + 0,406 \times 10,5^2) = 0,3 \cdot (158,07 + 44,76) = 60,85 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$N_{2 \rightarrow 3} = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### Question 3.7

Le chargement 1 induit sur le bras en aluminium un déplacement à l'extrémité du bras 0,095 mm.

Les maxima des contraintes de Von Mises se localisent à certains points critiques de la structure et valent jusqu'à  $9,3 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 9,3 \text{ MPa}$ .

Le chargement 2 induit sur le bras en aluminium un déplacement à l'extrémité du bras 0,011 mm.

Les maxima des contraintes de Von Mises se localisent en des points légèrement différents et valent jusqu'à  $1,84 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 1,84 \text{ MPa}$ .

Le premier chargement est donc plus critique.

### Question 3.8

Les quantités d'intérêts sont des normes (norme euclidienne d'un vecteur déplacement, norme de Von Mises de contraintes tensorielles). On ne peut pas sommer brutalement les résultats qui dépendent des directions.

### Question 3.9

Les zones les plus sollicitées sont situées à proximité des surfaces fonctionnelles de la liaison L12 qui sont bloquées en déplacement. Les contraintes sont particulièrement élevées sur les parois les plus minces et dans les rayons les plus prononcés.

On pouvait anticiper ce résultat car la pièce peut être très grossièrement modélisée comme poutre de section creuse, encastree à l'extrémité L12 et sollicitée en traction/flexion à l'autre extrémité. Elle connaîtrait effectivement la plus forte contrainte équivalente à proximité de l'encastrement et la plus forte flèche en son extrémité libre.

Par ailleurs, il est normal que les maxima de contraintes se localisent dans les points de plus fortes courbures ou sur les parois amincies (concentration de contrainte).

### Question 3.10

Les contraintes maximales restent localisées loin des parties critiques des pièces (surfaces fonctionnelles de mise en position des axes les unes par rapports aux autres) et leur valeur est très modérée (inférieure à 10,1 MPa soit plus de 10 fois inférieure à la limite élastique).

Il n'est donc pas nécessaire de modifier la géométrie de la pièce.

Si l'on souhaite modifier la géométrie de la pièce pour gagner en légèreté, on peut proposer un affinement des parois pour alléger la pièce tout en mettant en place des nervures dans la longueur de la pièce afin de rigidifier la pièce.

### Question 3.11

Les caractéristiques mécaniques garantissant la durée de vie du robot sont la contrainte à rupture en traction (180 MPa pour un brut de fonderie, 260 MPa pour un traitement T6) et la limite en fatigue (93 MPa). Compte tenu des hautes cadences et du grand nombre de cycles attendus lors de la vie du robot, les pièces sont principalement soumises à de la fatigue.

La contrainte maximale sous chargement 1+2 vaut seulement 11 % de la limite en fatigue. Ainsi, le cas de chargement proposé montre la satisfaction de l'exigence liée à la durée de vie du robot.

### Question 3.12

Les déplacements sont maximaux à l'extrémité de l'avant-bras (poignet). La norme des déplacements est inférieure à 0,14 mm, ce qui peut sembler élevé comparé au +/-50 µm de répétabilité requis.

Notons que ce déplacement est obtenu pour un chargement dynamique (2) qui correspond au début de la phase de dépose : décélération constante de  $\ddot{\theta}_{21} = -4414 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-2}$ , alors que la vitesse de rotation est encore élevée ( $\dot{\theta}_{21} = 22 \text{ deg}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Ce n'est pas la phase la plus pertinente pour évaluer la maîtrise des défauts. Il faut plutôt évaluer le déplacement en fin de dépose, lorsque la vitesse sera quasiment nulle.

Remarquons également que les contraintes maximales atteintes (10 MPa) ne représentent que 11 % de la limite élastique de l'alliage brut de fonderie, ou moins de 5 % de la limite élastique de l'alliage traité thermiquement. Ce déplacement est dû à une déformée élastique, donc réversible. Le bras reprendra sa géométrie initiale dès l'arrêt du robot, ne mettant pas en péril les performances de répétabilité annoncées.

### Question 3.13

De telles déformations, réversibles et principalement dues aux vitesses et accélérations, seraient préjudiciables dans des applications de suivi de trajectoire à haute vitesse.

Prenons pour exemple des applications de procédés nécessitant le suivi de la trajectoire (découpe, dépôt de colle, soudage, impression 2D ou 3D), ou des applications qui requièrent l'évitement d'éléments critiques dans l'environnement (robot chirurgical, robot de démantèlement sur site nucléaire...).

Cependant l'application est éloignée de ces préoccupations, seuls les points de départ et de dépose importent ici, la trajectoire est libre entre les deux points.

## 4. Minimisation des effets dynamiques : optimisation du couple matériau-procédé du corps de l'avant-bras

### Question 4.1

Les sollicitations mécaniques proviennent des poids de la masse embarquée et du préhenseur, ainsi que des effets dynamiques provoqués par les hautes vitesses et accélérations nécessaires pour satisfaire les cadences annoncées.

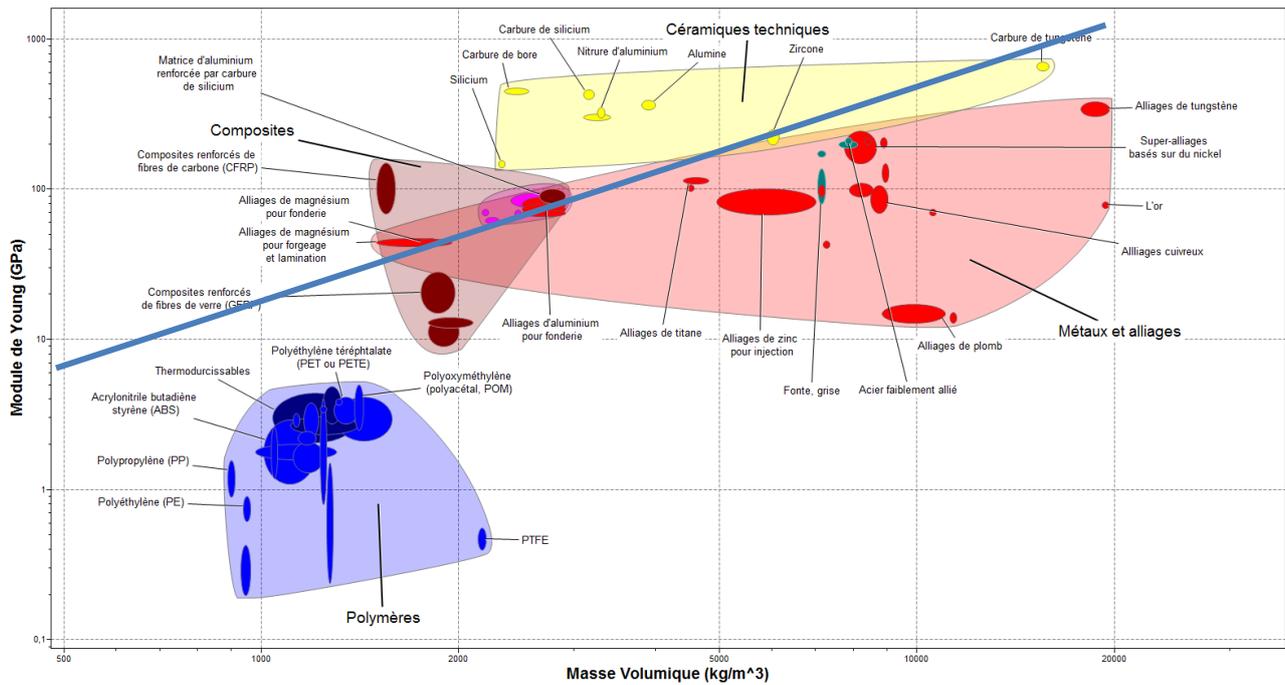
L'avant-bras est situé en bout de chaîne cinématique, ce qui lui donne les vitesses et accélérations les plus élevées. Cela augmente l'influence de sa masse sur les sollicitations. Le corps d'avant-bras assure l'isolation mais également la rigidité de l'ensemble cinématique (2) et, en cela, il constitue une pièce massive, dont la masse intervient de manière critique sur les sollicitations mécaniques.

### Question 4.2

Il faut donc choisir un matériau permettant de maximiser la rigidité (module d'Young) tout en minimisant sa masse (masse volumique).

Si l'on considère que ces paramètres ont une influence similaire, la droite d'équation  $E/\rho = 1$ , coupant le domaine de l'aluminium pour fonderie va intersecter les familles de matériaux satisfaisant de manière équivalente les exigences de rigidité et de légèreté : alliage de magnésium, alliage de titane, céramique, zircon, acier faiblement allié, superalliages base nickel (Inconel), carbure de tungstène.

Les matériaux, situés au-dessus de cette droite, satisferaient mieux encore ces deux critères (composites à fibres de carbone, composite à matrice aluminium au carbure de silicium, différentes céramiques techniques...).



### Question 4.3

La ténacité quantifie la capacité d'un matériau à s'opposer à la propagation de fissures. Cette caractéristique peut être critique en environnement agro-alimentaire, où il est nécessaire que les formes proposées ne présentent aucune discontinuité ou aspérité capable de retenir ou de fournir une voie d'accès pour les contaminants vis-à-vis des produits à traiter (détergents agressifs, revêtements ou lubrifiants nécessaires au mécanisme...).

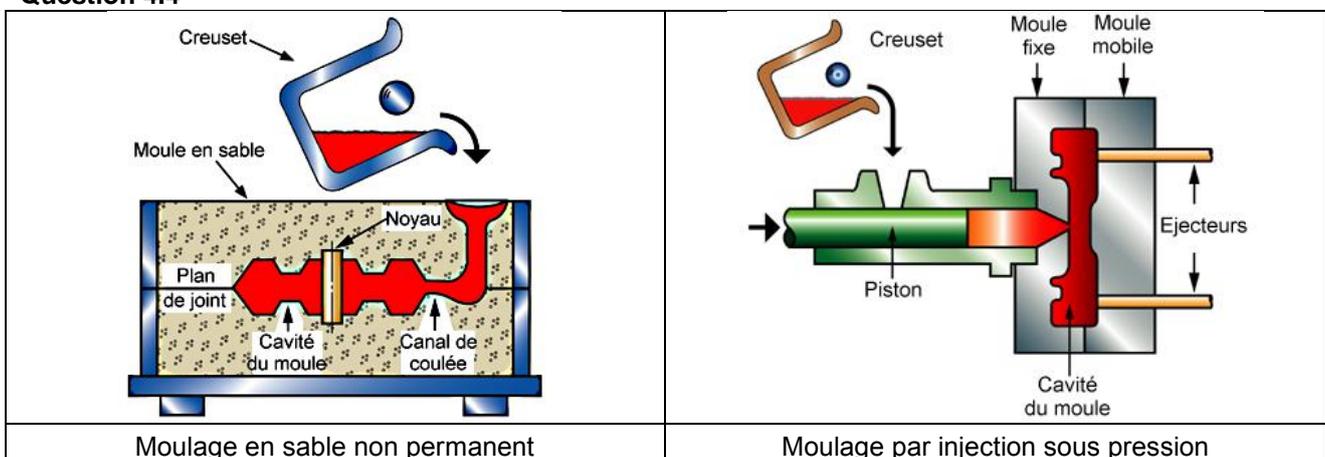
Le coût est bien sûr toujours un point critique pour le fabricant afin de proposer un robot performant à un prix raisonnable.

L'analyse des matériaux qui satisfont le compromis rigidité/légèreté de façon équivalente révèle que les alliages d'aluminium et de magnésium ont des tarifs et des ténacités très proches.

Les matériaux comme les composites et/ou les alliages de titane, les inconels, présentent des prix 10 fois plus élevés, ce qui les disqualifie.

Les matériaux tels que les céramiques techniques (zircon, carbure de tungstène...) présentent à la fois des prix beaucoup plus élevés et surtout des ténacités plus faibles risquant de mettre en péril l'exigence de durée de vie ou de conformité au milieu agro-alimentaire.

### Question 4.4



**Question 4.5**

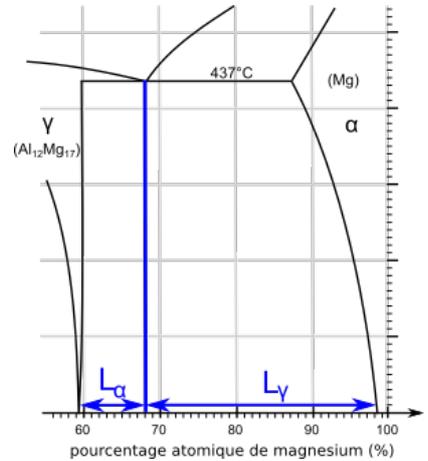
L'alliage permettant de minimiser la température de fusion, et donc l'impact énergétique est situé à 68 % de magnésium et donc 32 % d'aluminium. En effet à cette proportion, la courbe liquidus est au plus bas, on appelle cela un alliage eutectique.

**Question 4.6**

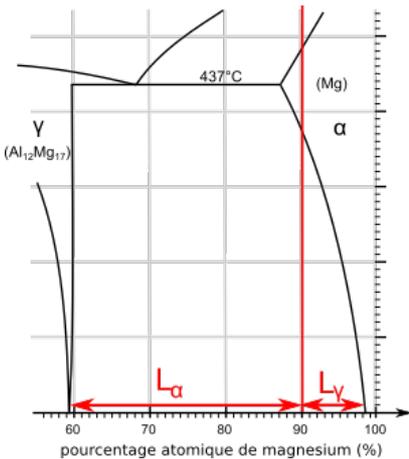
À température ambiante cet alliage présente des domaines en phase  $\gamma$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) et en phase  $\alpha$  (Mg). Pour calculer les proportions des phases en présence, on utilise le principe des segments inverses (avec  $L_\alpha$  et  $L_\gamma$  les longueurs des segments entre domaines monophasés et la composition considérée) :

proportion de phase  $\alpha$  (Mg) -  $\%_\alpha = \frac{L_\alpha}{L_\alpha + L_\gamma} = 9 / 39 = 23\%$

proportion de phase  $\gamma$  (Mg) -  $\%_\gamma = \frac{L_\gamma}{L_\alpha + L_\gamma} = 30 / 39 = 77\%$



**Question 4.7**

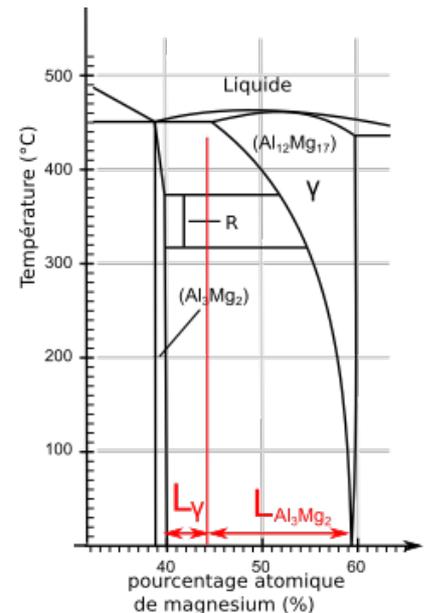


Pour calculer les proportions des phases en présence, on utilise le principe des segments inverses : la proportion de phase souhaitée  $\gamma$  (Mg) est

$\%_\gamma = \frac{L_\gamma}{L_\alpha + L_\gamma} = 20\%$  , comme la taille du

domaine biphasé à température ambiante ne varie pas, on peut en déduire la longueur du segment  $L_\gamma = 0,2 \times 39 = 7,8u$

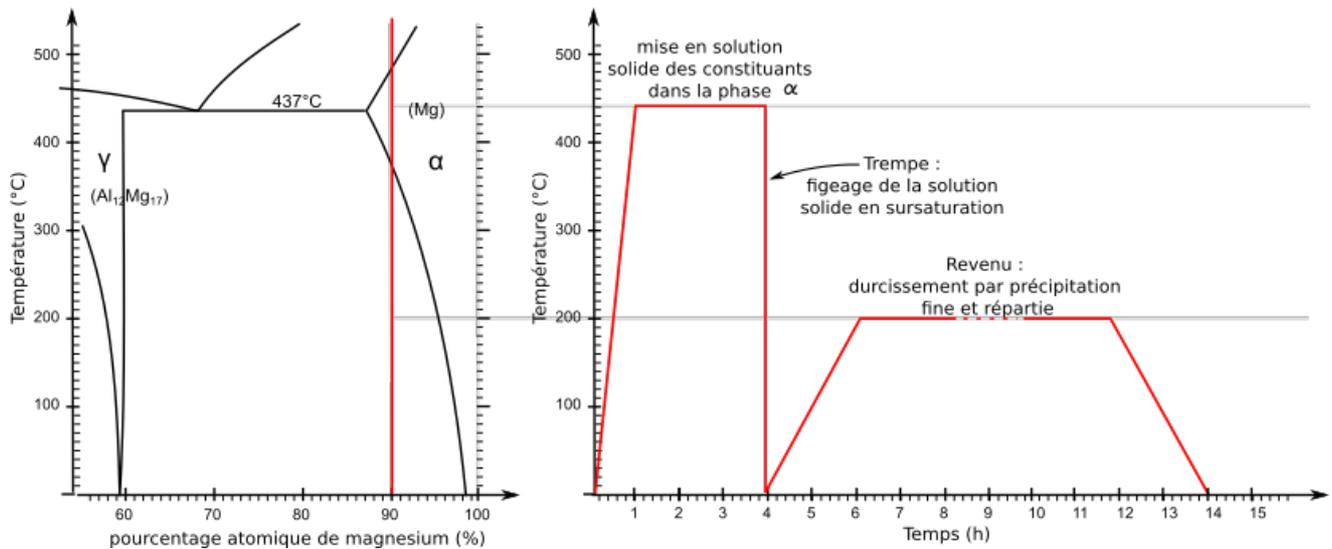
En reportant cette longueur sur le diagramme, on en déduit qu'il faut au **moins 90 % de magnésium** dans l'alliage pour que le taux de phase  $\gamma$  soit inférieur à 20 %. La température de fusion serait alors supérieure à 600°C.



Une autre solution consisterait à utiliser le deuxième eutectique, présent dans le domaine bi-phasé entre  $\gamma$  ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) et le composé  $Al_3Mg_2$ . Par la même méthode, on désigne alors un alliage composé de 56 % d'aluminium avec 44 % de Mg. La température de fusion serait alors moindre : 450°C. Cependant, il ne s'agit donc plus à proprement dit d'un alliage de magnésium, mais d'un alliage d'aluminium.

**Question 4.8**

L'AZ91 est un alliage de magnésium contenant 8,3 à 9,7 % d'aluminium et près d'1 % de zinc afin d'améliorer sa moulabilité. Sur le diagramme de phase, on se situe autour de 90 % de magnésium.



Les vitesses et durées des traitements dépendent essentiellement des formes de la pièce. Ici, on a une pièce de l'ordre d'1 kg sous forme d'une pièce creuse dont les parois sont relativement fines (moins de 10 mm). Le graphe ci-dessus propose :

- une chauffe d'une heure jusqu'au premier plateau, permettant une chauffe homogène pour éviter les déformations et/ou endommagements dûs à des gradients de dilatations ;
- un maintien 3 h à 450°C afin d'être dans le domaine  $\alpha$ , et de permettre une dissolution progressive des éléments alliage dans une solution solide de structure identique à la phase  $\alpha$  ;
- une trempe réalisée (refroidissement rapide) afin de figer la solution solide en état de sursaturation ;
- un revenu permettant d'obtenir une température homogène entre 100°C et 250°C afin de favoriser une précipitation fine et répartie sous forme de lamelles de  $\gamma$  dans la phase  $\alpha$ . La rampe notamment de refroidissement est assez lente (100°C/h) afin de ne pas favoriser l'apparition de fissures dans le matériau durci qui a donc perdu de sa ductilité.

#### Question 4.9

L'alliage de magnésium traité T6 (mise en solution, trempé, revenu) possède une contrainte à rupture  $\sigma_m$  (275 MPa) comparable à celle de l'alliage AlSi10Mg traité T6 également.

La limite élastique  $\sigma_{P0.2}$  (145 MPa) ainsi que le module élastique (45 GPa) en traction sont cependant un tiers plus faible.

Ainsi sous une même sollicitation, on peut s'attendre, pour une pièce en alliage de magnésium, à des déformations plus élevées ainsi qu'à des déformations irréversibles atteintes à des niveaux de chargement plus faibles.

#### Question 4.10

Les contraintes de Von Mises maximales sont atteintes à proximité du coude, près des surfaces fonctionnelles de la liaison L12 qui est bloquée. Leur valeur reste toutefois inférieure à 9,7 MPa. Ce qui reste très inférieur à la limite seuil de plasticité de 145 MPa. Les déplacements maximaux à l'autre extrémité sont de 0,136mm. Comme la limite élastique n'est pas atteinte, ce déplacement est réversible.

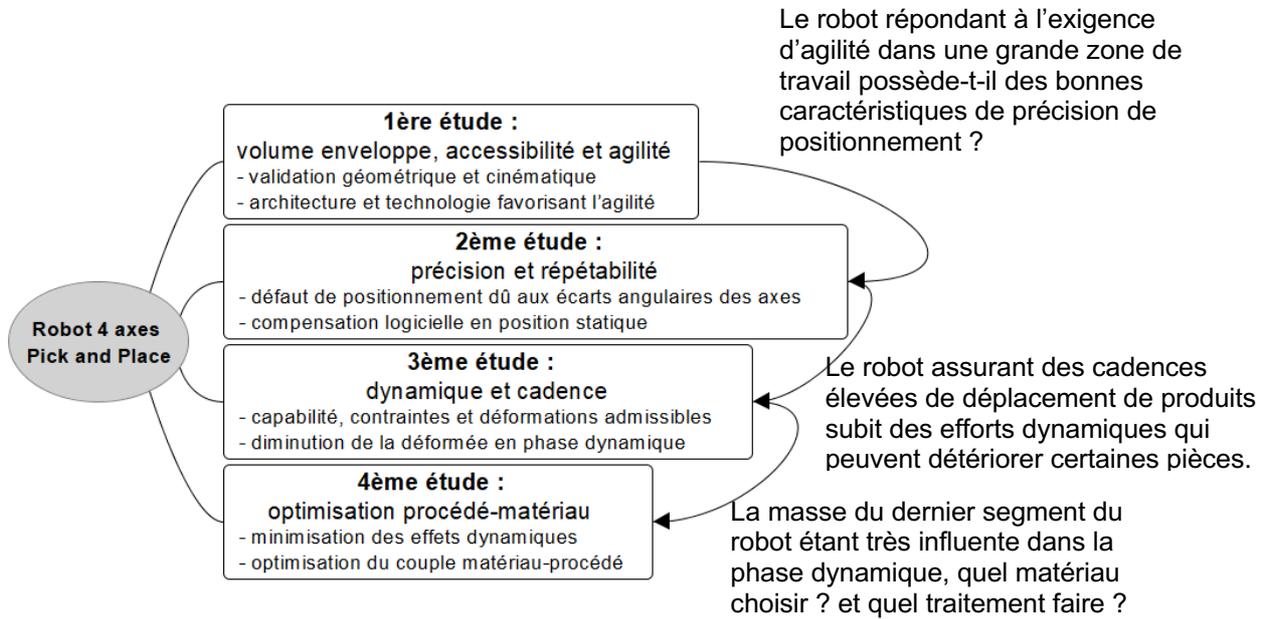
#### Question 4.11

Le changement de matériau, de l'alliage AlSi10Mg de densité de 2,65 g·cm<sup>-3</sup> pour l'alliage AZ91 de densité de 1,81 g·cm<sup>-3</sup>, en supposant que la géométrie de la pièce est inchangée, permet un gain de masse de 32 %.

## 5. Synthèse

### Question 5.1

La synthèse du sujet peut prendre la forme d'une carte mentale telle que celle-ci :



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

## 1. Présentation du sujet

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

<http://www.devenirenseignant.gouv.fr/cid137747/sujets-rapports-des-jurys-agregation-2019.html>

Les auteurs du sujet remercient la société Stäubli, et plus particulièrement messieurs Dupenloup et Seralta pour leur accueil dans leurs locaux sur le site de Faverges en Haute Savoie et pour les renseignements communiqués.

Le sujet s'appuie sur la conception et l'implantation d'un robot de manutention qui évolue à forte cadence dans une ligne de production agroalimentaire. L'utilisation du robot dans le système d'automatisation permet de réduire la pénibilité au travail relatif au conditionnement de produits en environnement complexe :

- une température d'ambiance comprise entre 1°C et 12°C ;
- un milieu répondant aux normes d'hygiène sanitaire ;
- un produit à manipuler à -18°C ;
- une cadence de 800 produits par minute ;
- une période active hebdomadaire de 144 heures sans arrêt.

Les produits surgelés, palets cylindriques, sortent d'un tunnel de surgélation. Le robot et son implantation doivent permettre de les saisir un par un, quelle que soit leur position sur le tapis amont, et les déposer dans une boîte en carton préformée. Cette boîte de 8 palets se déplace en ligne droite en continu sur une bande transporteuse de sortie.

Le sujet considère l'installation de plusieurs lignes de production afin d'assurer la productivité, la configuration du robot au sein de chaque ligne, le dimensionnement et la commande du robot.

Après une étude économique d'exploitation, le constructeur propose comme composant principal un robot 4 axes dit « à plans parallèles » aux performances élevées en termes de volume de l'enveloppe de travail, de répétabilité de positionnement, de vitesse de déplacement, d'adaptation au milieu alimentaire et de sûreté de fonctionnement.



Robot 4 axes dit « à plans parallèles »

L'objectif des études demandées est de justifier les différents choix réalisés par l'installateur des lignes d'emballages en vue de garantir au client les performances nécessaires pour cette application agro-industrielle.

Pour cela, le sujet propose de vérifier :

- si le choix d'architecture et de technologie des axes permet de garantir une accessibilité et une enveloppe de travail suffisante ;
- si la conception détaillée des liaisons et leur mode d'obtention permet de garantir une bonne précision et/ou répétabilité ;
- si les grandes cadences annoncées sont atteignables sans mettre en péril les performances de précision de positionnement ni la durée de vie du système ;
- et enfin, si le choix de matériau et sa mise en œuvre pour la fabrication du corps d'avant-bras du robot sont en accord avec les études précédentes.

## **2. Analyse globale des résultats**

Les candidats dans leur ensemble se sont bien appropriés le support et en ont compris la problématique. L'indépendance des parties et la progressivité de la difficulté dans chaque partie ont permis à de nombreux candidats de démontrer leurs compétences. La diversité des compétences à mobiliser semble avoir permis à différents profils de candidats de se mettre en valeur. Les candidats les plus performants ont démontré maîtrise, rigueur et esprit critique dans les champs de compétences de l'ingénierie mécanique abordés. Ils ont par ailleurs traité, même partiellement, toutes les parties du sujet.

Même si les parties sont indépendantes, certains candidats semblent faire l'impasse sur des pans entiers du sujet, liés spécifiquement à certaines disciplines fondamentales en ingénierie mécanique. Cela ne peut pas conduire à un résultat convenable.

La suite de ce rapport met en exergue les points qui ont été moins bien traités afin de guider les futurs candidats vers une meilleure exploitation de leurs compétences.

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

### *Étude 1 – Exigence d'enveloppe de travail*

Cette première partie, relativement simple, avait pour but de valider l'implantation du robot vis-à-vis des exigences (cadences, encombrement). Le candidat était invité à réfléchir sur les spécificités liées à l'agilité du robot en analysant le flux des produits à transférer dans la chaîne d'emballage. Cette analyse permettait d'apprécier la rapidité et la précision des mouvements du préhenseur.

L'étude a été traitée par la quasi-totalité des candidats, ce qui démontre pour la plupart une bonne capacité d'analyse.

### *Étude géométrique de l'implantation*

Cette sous-partie concerne la gestion du flux de produits dans une chaîne d'emballage. Une lecture attentive de l'ensemble du sujet permet de bien commencer l'épreuve. La mise en situation et l'extrait du diagramme des exigences fournissent les informations nécessaires pour construire une démarche de validation.

### *Étude de l'agilité du robot*

Dans cette partie une analyse géométrique des configurations accessibles par le robot était proposée. De nombreux candidats n'ont pas bien identifié les longueurs fixes et les angles variables de la structure du robot à axes parallèles qui permettaient de construire les différentes configurations étudiées. L'algorithme de choix de mouvements pour atteindre la meilleure configuration reposait sur l'identification du paramètre limitant la durée de cycle. Cela a été très rarement traité avec pertinence.

### Étude de la liaison globale et compacte L<sub>32</sub>

Beaucoup de candidats ont traité cette partie plus orientée sur la technologie des solutions constructives et leur étude mécanique. Certains donnent des réponses intuitives, mais ont manqué de rigueur dans l'écriture du modèle cinématique de chaque liaison de la structure, entraînant ainsi des mauvais résultats et une incompréhension de la structure cinématique du dispositif « montée-descente et rotation du préhenseur ». Si une majorité de candidats réussit à modéliser et analyser la liaison, peu d'entre eux, en revanche, ont le recul et la culture technologique nécessaires pour commenter son intérêt au regard des contextes d'usage du robot.

### *Étude 2 – Exigence de grande performance de positionnement*

Cette partie de l'épreuve demandait de mobiliser des compétences en rapport avec l'analyse des surfaces fonctionnelles, la conception, le tolérancement, la fabrication et le contrôle géométrique des pièces mécaniques en vue de spécifier, garantir et contrôler des écarts géométriques qui pourraient être préjudiciables aux exigences fonctionnelles.

Peu de candidats se sont mis en valeur sur la lecture ou l'écriture de spécifications géométriques. Certains ignorent même le concept de tolérance. Les notions d'industrialisation abordées dans cette partie, bien que limitées, sont très rarement abordées par les candidats et encore plus rarement justifiées.

Les candidats, manquant de culture technologique, ont eu beaucoup de difficultés à poursuivre l'étude pour définir les spécifications géométriques à imposer aux surfaces fonctionnelles. Par exemple, si la surface fonctionnelle prépondérante dans une liaison pivot est un plan, c'est son vecteur normal qui sera l'élément géométrique qui détermine le vecteur directeur de l'axe du pivot. Tout défaut de position ou d'orientation se caractérise par une composante du torseur de petits déplacements.

Les questions portant sur le contrôle de défauts géométriques sur machine à mesurer tridimensionnelle sont plus largement abordées et montrent que la majorité des candidats a des notions. Cependant, le jury souhaite souligner que les étapes d'une démarche de mise en œuvre doivent être brièvement justifiées.

### *Étude 3 – Performance dynamique et exigence de cadence*

#### *Validation de la vitesse et de l'accélération verticales maximales nécessaires au fonctionnement à haute cadence*

Dans un premier temps, les candidats étaient amenés à compléter des chronogrammes et, dans un deuxième temps, à vérifier que les capacités de chaque axe permettaient de répondre aux exigences.

De nombreux candidats ont intuitivement bien décrit les chronogrammes. Quelques-uns seulement ont proposé une démarche rigoureuse de validation en identifiant les cas critiques.

#### *Détermination des efforts dynamiques subis par l'avant-bras en phase d'accélération ou de décélération.*

Cette partie a été abordée par de nombreux candidats mais souvent de manière partielle parfois superficielle. Le jury souhaite toutefois souligner que la simple énonciation du théorème ou principe physique à exploiter ne suffit pas à décrire une démarche d'analyse ou de calcul. Il convient de citer les hypothèses et les étapes, les isolements successifs, voire de commenter le résultat attendu. La validité des applications numériques est fortement dépendante du bon choix d'unité des variables.

#### *Déformée et contraintes induites par les effets dynamiques*

Dans cette partie, des résultats de simulations numériques devaient être analysés par les candidats. De très nombreux candidats ont abordé cette sous-partie, présentée de façon indépendante du reste du questionnement. Notons cependant que beaucoup de réponses étaient très superficielles. Il convient de justifier et argumenter toute réponse au regard des propriétés du matériau, des hypothèses et de la mise en données des simulations, ou encore vis-à-vis des phases de vie du robot identifiées comme critiques. Il est parfois pertinent d'utiliser des schémas ou croquis pour illustrer une réponse.

Se sont particulièrement mis en valeur sur cette partie, les candidats rigoureux et structurés qui verbalisent leurs observations, justifient leur analyse et argumentent par des critères chiffrés. Certains ont montré, par leur bon sens du comportement mécanique, une approche correcte du problème de résistance et de déformée.

Les futurs candidats devraient porter leur vigilance sur les points suivants :

- de simples commentaires sur les couleurs ne constituent pas une analyse mécanique fine ;
- toute simulation doit être analysée au regard du cas de chargement étudié et des hypothèses énoncées ;
- les notions de déplacement et déformation, de force et contrainte ne doivent pas être confondues. La réversibilité des déformations dans le domaine élastique est peu exploitée.
- de nombreux candidats ont des automatismes de dimensionnement vis-à-vis de la limite élastique, et n'ont pas évoqué la notion de fatigue pouvant être prépondérante dans un système industriel évoluant à forte cadence.

#### *Étude 4 – Minimisation des effets dynamiques : optimisation du couple matériau-procédé du corps de l'avant-bras*

Cette partie avait pour objectif de proposer un couple matériau-procédé pour l'avant-bras minimisant sa masse tout en garantissant les exigences principales. La justification des choix de matériaux réalisés par les concepteurs ainsi que le choix d'un procédé de mise en forme primaire adapté étaient attendus. Enfin, le sujet proposait d'étudier les traitements possibles du matériau. Les conséquences du changement de matériau constituant le bras étaient alors analysées via une nouvelle simulation numérique.

Bien que constituant la fin du sujet, cette partie a souvent été traitée en tout ou partie selon les compétences maîtrisées par les candidats. Les parties relatives aux choix de matériaux par diagramme d'Ashby et à l'analyse des résultats de simulation ont été traitées par la majorité des candidats, mais rarement avec le recul nécessaire pour conclure.

L'analyse des diagrammes d'équilibre d'un alliage binaire est bien maîtrisée par les candidats les plus performants.

#### *Synthèse*

Très peu de candidats ont abordé cette partie. Parmi ceux qui ont proposé une synthèse sous forme de carte mentale, beaucoup se sont contentés d'énoncer les différentes études proposées sans s'inscrire dans une démarche plus analytique et sans faire apparaître le fil conducteur du sujet. Ils auraient pu ainsi mettre en avant les contraintes ayant conduit au choix de conception des solutions, mais aussi les interdépendances des réponses apportées par les ingénieurs.

#### **Conseils généraux aux futurs candidats**

Le premier des conseils pour aborder cette épreuve est de s'approprier les objectifs de l'étude qui repose essentiellement sur l'analyse spécialisée dans le domaine de la mécanique d'un système pluri technologique. Cette analyse est donc centrée sur le choix et la conception mécanique de solutions constructives. Ces dernières sont le résultat d'études relatives à l'architecture globale de mécanismes (agencement de pièces, précision des liaisons...), à leur dimensionnement (morphologie, résistances, inerties, déformées, tenues...) et à la performance du système (productivité, cycle de vie, nuisances et impacts...). La réussite de l'épreuve requiert une culture technologique minimale reposant sur la connaissance des principes mécaniques, des solutions constructives de base et des technologies actuelles. Cette culture doit être enrichie par la connaissance des procédés d'obtention de pièces mécaniques et des moyens de réalisation des surfaces fonctionnelles. Cela permet de qualifier un produit réalisé et d'apprécier la performance globale attendue d'un système.

Pour l'analyse, il est essentiel de poser d'emblée les modèles avec la plus grande rigueur scientifique (outils mathématiques, conditions et hypothèses d'application, domaines de validité), quelle que soit leur

complexité. Sans cela, le risque est grand de ne pas converger vers la bonne solution ou vers la bonne prédiction. Autrement dit, les études mécaniques souffrent obligatoirement de l'implicite et du sous-entendu.

Un conseil sur la communication est à renouveler à l'occasion des épreuves écrites. L'ingénierie mécanique au cours de son histoire s'est toujours dotée d'outils de représentation et de communication spécifiques. Pour que le dialogue soit univoque entre les différents acteurs de l'économie industrielle, ces outils ont été souvent formalisés par des normes. Le langage de communication en mécanique est devenu universel. La rédaction des réponses au questionnement peut être agréable à lire à condition toutefois qu'elle soit propre (sans rature), claire (aérée et sur-soulignée), concise (expressions littérales sans équivoque) et soignée (ex. : unités employées, précisions de langage). De plus il faut rappeler que la maîtrise de la langue française fait partie du référentiel de compétences de l'enseignant.

#### 4. Conclusion

Cette année encore, les compétences évaluées dans cette épreuve étaient variées. Cela a permis aux candidats d'exprimer leur potentiel dans divers champs de l'ingénierie mécanique tout en validant leur maîtrise et leur rigueur sur les compétences qui fondent notre discipline.

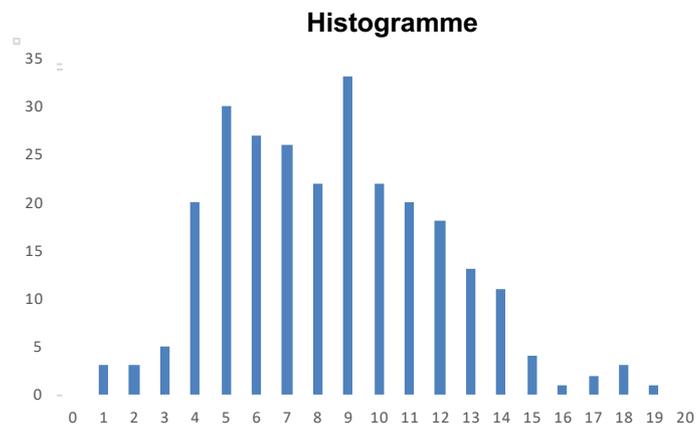
Certaines parties du sujet, pourtant très classiques, ont été étonnamment mal traitées et les résultats en dessous des attentes du jury.

Pour réussir pleinement cette épreuve, la maîtrise des méthodes et outils centraux de l'ingénierie mécanique doit s'accompagner d'une vision large, permettant de faire les liens entre les différents champs d'expertise en vue de répondre à une problématique globale.

#### 5. Résultats

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

- 18,3/20 comme meilleure note ;
- 0/20 comme note la plus basse.



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

## Étude d'un bras collaboratif

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

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

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

### **Contexte pédagogique de la séquence de formation imposée**

La séquence pédagogique à construire est associée au contexte pédagogique suivant :

- titre de la séquence – analyser et modéliser les composants réalisant la fonction « acquérir » ;
- niveau de formation visé – première série S, enseignement spécifique de sciences de l'ingénieur ;
- effectif – classe de 36 élèves, groupe à effectif réduit de 18 élèves ;
- volume horaire – 7 heures hebdomadaires (2 h classe entière + 2 h TD + 2h TP + 1h TPE).

Les supports pédagogiques à disposition dans le laboratoire de sciences de l'ingénieur sont judicieusement choisis pour répondre au besoin pédagogique de la séquence imposée :

- robot haptique ;
- système incubateur ;
- robot Evolap ;
- hémomixer (balance de don du sang) ;
- cordeuse de raquettes SP55 ;
- drone didactique D2C ;
- compacteur Big Belly ;
- pilote hydraulique de bateau.

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

- le programme du niveau de formation visé (fichier Programme Bac SSI.pdf) ;
- le document d'accompagnement (fichier Document Ressource SSI.pdf) ;
- une proposition de liste de séquences adaptée au niveau de formation visé (fichier Séquences Pédagogiques SSI.pdf).

### **Production attendue**

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

- recensé les compétences à développer et les savoir-faire et savoirs à faire acquérir aux élèves ;
- identifié les prérequis et le positionnement temporel de la séquence dans une progression pédagogique (vis-à-vis de la proposition de liste de séquences fournie) ;

- spécifié les modalités pédagogiques et didactiques (TP, TD, cours, projet, évaluation, remédiation...), leurs coordinations et leurs organisations.

## **Partie 1.2 – Prise en main du support didactisé (durée : 0h30)**

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

### **Problématique associée à ce TP**

Pour réduire les risques de troubles musculo-squelettiques, certains constructeurs de matériel de manutention proposent des solutions de levage intelligentes qui assistent l'opérateur dans la manipulation de charges lourdes.

Un robot collaboratif permet d'assister l'humain dans les tâches industrielles où il est nécessaire d'appliquer un effort répétitif pendant le travail.

L'objectif de la commande collaborative est de faire ressentir une masse légère à l'utilisateur même si le robot avec lequel il collabore déplace une lourde charge. Elle consiste à mesurer l'intention de l'humain, force appliquée sur la poignée de manipulation (capteur d'effort), puis à calculer la commande correspondante du robot (consigne de vitesse).

### **Présentation du support**

Le support proposé est le robot CoMAX, support pédagogique qui s'inspire du robot collaboratif industriel SAPELEM.

Le logiciel Comax\_EMP (Environnement Multimédia Pédagogique), accessible depuis le bureau, présente de manière interactive le système et ses constituants.

### **Le robot SAPELEM**

Le système repose sur l'utilisation d'un système de levage motorisé à câble associé à une poignée communicante intégrant le capteur d'effort. La poignée communique en permanence (via une liaison sans fil) l'intention de l'opérateur au système de levage.

Celui-ci réagit alors en conséquence et assiste l'opérateur pour qu'il puisse déplacer l'objet manutentionné sans en percevoir son poids.

Le système s'auto-ajuste dans le cas de charges variables (bidons que l'on vide) et intègre de nombreuses sécurités (coupure d'alimentation, surcharges, etc).

Le diagramme des exigences du robot SAPELEM est donné dans le document ressource DR1.



### **Le robot collaboratif CoMAX**

Une interface de commande et d'acquisition installée sur le poste informatique permet, entre autres :

- de piloter le robot CoMAX selon quatre types de commandes possibles (mode collaboratif, mode asservissement de position, mode asservissement de vitesse, mode asservissement d'intensité) ;
- de réaliser des mesures (intensité du courant, position et vitesse moteur, effort sur la poignée).

Les diagrammes d'exigence du robot CoMAX sont fournis sur les documents ressource DR2 et DR3.

Un synoptique de la commande collaborative est fourni figure 1, issue de l'interface de pilotage du système.

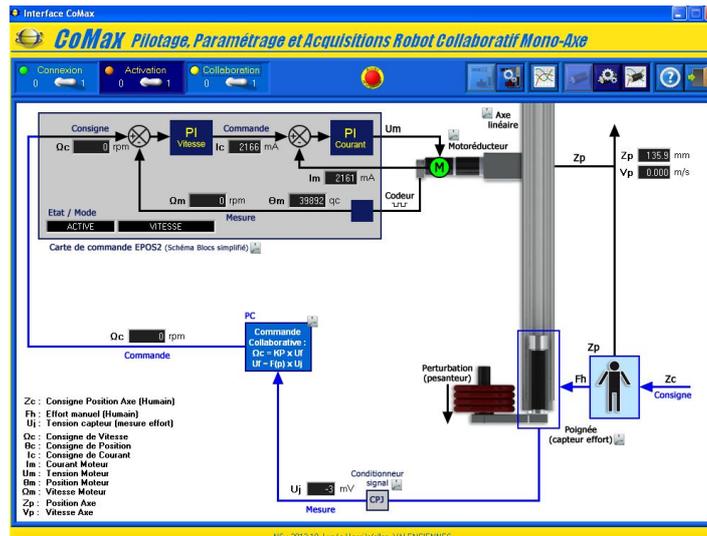


Figure 1 – Commande collaborative du robot CoMAX

Le dossier ressource, fourni sous format numérique, comprend :

- DR1 – diagramme des exigences SAPELEM ;
- DR2 – diagrammes des exigences CoMAX ;
- DR3 – exigences techniques CoMAX ;
- DR4 – aide à la manipulation et protocoles ;
- DR5 – diagramme d'états de l'interface ;
- DR6 – descriptif du sous-système annexe ;
- DR7 – aide à l'utilisation de Scilab-Xcos.

Le dossier technique, fourni sous format numérique, comprend :

- DT1 – cahier des charges ;
- DT2 – géométrie de la potence articulée ;
- DT3 – axe linéaire ;
- DT4 – motoréducteur ;
- DT5a – capteur de force ;
- DT5b – conditionneur capteur de force ;
- DT6 – codeur.

### Activité 1 Analyse des exigences du cahier des charges

Mettre en service le système depuis l'interface de pilotage en activant les boutons « Connexion » puis « Activation ». Activer le mode collaboratif « Collaboration ». Agir manuellement sur la poignée et observer les évolutions des différentes grandeurs physiques mesurables et observables depuis le synoptique de la page d'accueil de l'interface.

Renouveler l'expérience avec des masses supplémentaires embarquées.

a) Indiquer à quel besoin répond le système et son domaine d'application.

b) Proposer un schéma cinématique global du robot collaboratif, sans représenter l'actionneur ni les transmetteurs.

Désactiver alors la commande collaborative à l'aide du bouton de sélection.

## Activité 2 Analyse du comportement de la boucle collaborative.

a) Désactiver le filtre réjecteur : depuis le menu « Paramétrer Comax », sélectionner « Commande collaborative », décocher « Filtre réjecteur du mode de structure ». Quitter ce menu.

Réactiver la boucle collaborative et observer la différence de comportement en actionnant manuellement la poignée.

b) Visualiser le signal du capteur d'effort en mode collaboratif en suivant le protocole suivant :

- si nécessaire, enlever les masses ajoutées et quitter le mode collaboratif ;
- depuis le menu « Positionner comax », positionner l'axe en position haute ;
- accrocher une masse de 1 kg à la poignée (voir figure ci-contre) ;
- accéder au menu « Acquisition axe », puis « Paramétrer Acquisition » et sélectionner « entrée analogique 1 » dans « Variable » ;
- quitter ce menu ;
- quitter le menu « Acquisition axe », sélectionner le mode collaboratif, enfin revenir à « Acquisition axe ».



Mesurer les fréquences des oscillations observées.

c) Préciser quelle exigence technique du bras n'est pas satisfaite (voir DR3).

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

### Problématique technique et scientifique :

Analyser les phénomènes vibratoires et les maîtriser en réglant la commande collaborative

La structure porteuse du bras induit des phénomènes vibratoires qui peuvent perturber fortement son comportement lors de son utilisation.

Les objectifs sont :

- d'analyser les solutions techniques retenues dans la conception du robot CoMAX par une analyse qualitative du fonctionnement ;
- d'analyser le comportement vibratoire de la structure porteuse ;
- de modéliser le comportement de la chaîne d'énergie du robot en vue du réglage de la commande collaborative ;
- de proposer un réglage de la commande collaborative.

Pour la suite du TP, réactiver le filtre réjecteur.

### 1.3.1 Analyse structurelle de l'axe linéaire

Objectif : présenter la structure de la chaîne de puissance.

**Activité 3** À partir des documents techniques, et/ou de l'EMP (logiciel Comax\_EMP), compléter sur le document réponse DRep1 la structure fonctionnelle de la chaîne de puissance.

**Activité 4** À partir des documents techniques DT3 et DT4, déterminer le rapport de transmission de l'axe collaboratif  $K_{tran} = \frac{V}{\omega_m}$  où  $V$  est la vitesse linéaire de l'axe (en  $m \cdot s^{-1}$ ) et  $\omega_m$  la vitesse du moteur (en  $rad \cdot s^{-1}$ ).

$\omega$

$\omega$

$V$

### 1.3.2 Élaboration d'un modèle de connaissance de la chaîne d'énergie

Objectif : identifier les actions mécaniques mises en jeu.

Le couple  $c_m$  fourni par l'actionneur sur l'axe collaboratif peut s'exprimer par :

$$c_m(t) = J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \pm c_s + c_{pes}$$

avec  $\omega_m(t)$  la vitesse angulaire du moteur,  $J_{eq}$  l'inertie équivalente de l'ensemble des pièces en mouvement ramenée à l'arbre moteur,  $c_s$  le couple de frottement sec maximal et  $c_{pes}$  le couple dû à l'action de la pesanteur ramené à l'arbre moteur.

On rappelle que le couple moteur  $c_m$  est lié à l'intensité du courant dans l'induit  $i$  par la constante de couple :  $c_m(t) = K_m \cdot i(t)$

La constante de couple du moteur est  $K_m = 30,2 \text{ mN}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ .

#### Activité 5 Analyse du comportement en boucle ouverte

Suivre le protocole suivant :

- mettre une masse de 1 kg sur le support de masse ;
- désactiver si nécessaire la commande collaborative et repositionner l'axe en position intermédiaire ;
- sélectionner « Acquisition Axe » puis préparer les acquisitions en cliquant « Paramétrer Acquisition », puis « Paramètres par défaut » et sélectionner « Asservissement en Courant ». Rajouter l'acquisition de la vitesse moteur ;
- revenir au menu « Acquisition axe » ;
- lancer une sollicitation en Courant (BO) en cliquant sur « Commander Axe ». Depuis le mode asservissement, sélectionner COURANT(BO) et régler la consigne à la valeur voulue (500 mA) ;

Observer les courbes et justifier le comportement de l'axe.

En repartant de la position Intermédiaire, renouveler le protocole précédent (sollicitation en courant) pour les valeurs de courant  $i = 3\,000 \text{ mA}$  et  $i = 5\,000 \text{ mA}$  (si nécessaire, se remettre en position intermédiaire à chaque mesure).

Expliquer le comportement observé.

**Activité 6** Déterminer expérimentalement  $C_{mm}$  et  $C_{md}$  les couples moteurs à la limite du mouvement respectivement en montée et en descente avec une masse de 1kg. En déduire les valeurs des couples  $C_{pes}$  et  $C_s$ .

### 1.3.3 Analyse structurelle de la commande collaborative

Objectifs :

- identifier la structure de la commande collaborative ;
- proposer un modèle de comportement du capteur d'effort.

La structure de commande collaborative du CoMax est donnée ci-après.



**Activité 7** À partir des documents techniques, et/ou de l'environnement multimédia pédagogique (EMP), compléter sur le document réponse DRep1 la structure fonctionnelle de la chaîne d'information.

**Activité 8** Proposer un protocole pour identifier expérimentalement la valeur du gain de mesure  $G_j$  défini par  $G_j = \frac{U_j}{F}$  où  $U_j$  est la tension mesurée par le capteur (mV) affichée sur le synoptique de l'IHM (figure 1) et  $F$  l'effort utilisateur (N).

### 1.3.4 Mise en œuvre d'une commande collaborative

Objectif : mettre en œuvre sur un sous-système indépendant, une commande de vitesse proportionnelle à un effort appliqué.

Le matériel mis à disposition pour cette question est le suivant :

- un moto-réducteur à courant continu de rapport de réduction 1:53, avec un encodeur monté sur l'arbre moteur. Cet encodeur est composé d'un aimant rotorique (4 pôles nord et de 4 pôles sud) et de 2 cellules à effet Hall montées en quadrature sur le stator du moteur ;
- une alimentation extérieure ;
- une carte de type Arduino UNO (micro-contrôleur) avec 6 entrées analogiques notées A0 à A5, munies d'un convertisseur 10 bits, et 14 entrées/sorties numériques notées 0 à 13 ;



Entrées/sorties numériques



Puissance (Masse 3,3V 5V) Entrées analogiques

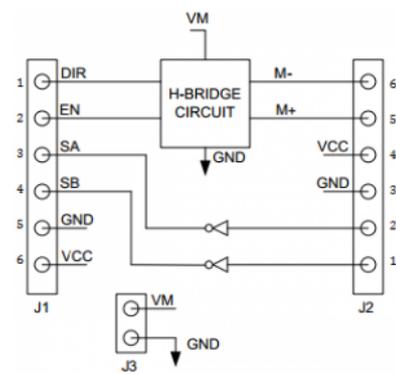
- un module de commande pour moteur CC PModHB5. Il s'agit d'une interface de puissance contenant un hacheur, permettant de piloter un moteur à courant continu (de 6V à 12V maxi), 2 A maximal en pointe. Il comporte :
  - o une entrée logique DIR pour le réglage du sens de rotation du moteur ;
  - o une entrée numérique EN pour un signal PWM (Pulse Width Modulation) réglant la tension du moteur ;
  - o deux sorties SA et SB avec trigger de Schmitt pour récupérer les informations issues des 2 cellules à effet Hall du codeur ;
  - o la masse GND ;
  - o une entrée d'alimentation 3,3 V.

Carte de commande



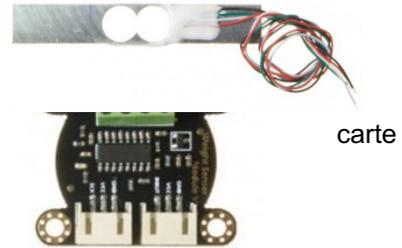
Alimentation 6V

Moteur et codeur



PmodHB5 block diagram (top-down view)

- un capteur de force 1 kg, constitué d'une barre d'aluminium avec jauges de déformation en pont de Wheatstone. Il est relié à une interface SEN0160 comprenant une amplification et un convertisseur analogique numérique HX711 et se raccordant à la Arduino.

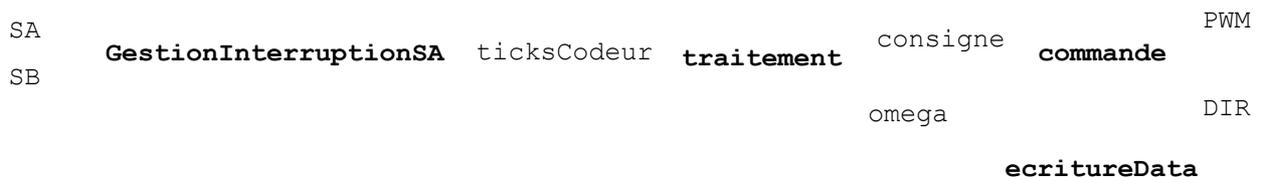


Un document ressource de ce sous-système est fourni DR6.

La structure globale du programme donné dans le document réponse DRep2 est accessible sous Arduino dans le fichier « Contrôle\_Commande.ino ».

Ouvrir sous Arduino ce fichier. Il comporte :

- une entête déclarative – fichiers d'inclusion, déclaration des constantes et des variables globales ;
- une fonction setup – configuration des broches, initialisation des variables, des fonctionnalités et des interruptions ;
- les instructions, dont la fonction loop qui est exécutée en boucle. Ici cette fonction permet juste de lancer un timer exécutant la fonction **traitement** à cadence fixe. Les fonctions et variables utilisées s'organisent selon le schéma ci-dessous.



Pour mettre en place une commande numérique, il faut que les calculs de la commande du moteur se fassent à un intervalle de temps régulier. Pour cela, on utilise un timer qui permet d'exécuter une fonction précise tous les x millisecondes. Le timer est importé avec le module `SimpleTimer`. Dans ce programme, la fonction **traitement** est exécutée à cadence fixe (toutes les 20 ms).

```
void traitement(){
  // Calcul de la vitesse de rotation
  omega=ticksCodeur/(dt*16) ; //vitesse moteur en tour/s
  // commande moteur
  int consigne=255 ; // à modifier Activité 9
  commande(consigne);

  // Ecriture des données sur la liaison série
  ecritureData();
  // Réinitialisation ticks codeur
  ticksCodeur = 0;
}
```

Sur une carte Arduino UNO, il existe deux lignes d'interruption (numérotées 0 et 1), correspondant aux broches 2 et 3, reliées aux signaux SA et SB. L'intérêt d'une ligne d'interruption est qu'elle permet, comme son nom l'indique, d'interrompre le déroulement des calculs sur le micro-contrôleur pour effectuer un traitement spécifique, en l'occurrence la mise à jour du compteur d'impulsions, avant de rendre la main à la boucle principale.

### Activité 9 Mise en place d'une mesure de position et de vitesse.

a) Téléverser ce programme dans la carte et tester pour différentes valeurs de commande (entre 0 et 255). La commande est modifiable dans la fonction `traitement` :

```
int consigne=255 ; commande à modifier
```

Dans ce programme, deux interruptions déclenchent les fonctions `GestionInterruptionSA()` et `GestionInterruptionSB()` à chaque transition sur les broches 2 et 3, correspondant aux signaux SA et SB du codeur.

Les signaux SA et SB issus du codeur évoluent en quadrature ainsi que sur la figure suivante :



b) Préciser le lien entre les signaux SA et SB et l'angle de rotation du moteur, sachant que l'encodeur est composé de 4 pôles nord et 4 pôles sud sur l'aimant rotorique. Justifier l'intérêt de l'utilisation des deux signaux pour la mesure de l'angle moteur.

La fonction `GestionInterruptionSA()` gère le compteur `ticksCodeur` lors d'une interruption sur SA.

```
void GestionInterruptionSA() {  
  if (digitalRead(SA) == digitalRead(SB)) {  
    ticksCodeur--;  
  }  
  else {  
    ticksCodeur++;  
  }  
}
```

c) Analyser et expliquer la structure de cette fonction. Par analogie, compléter la fonction `GestionInterruptionSB()`.

d) Expliquer comment est réalisée la mesure de la vitesse dans la fonction `traitement`.

La vitesse du moteur est visualisable dans Outils/Moniteur série.

On intègre maintenant le capteur d'effort et son interface SEN0160.

Pour toute masse suspendue, le programme « SimpleMesure.ino » permet d'acquérir et d'afficher la valeur numérique brute en sortie du capteur et la valeur de la masse correspondante.

```

// Hx711.DOUT - pin #A2
// Hx711.SCK - pin #A3

#include <Hx711.h>
Hx711 capteur(A2, A3) ;

void setup() {
Serial.begin(115200);
// étalonnage du capteur (dépend de la maquette et de la température)
//réglage de l'offset du capteur :
capteur.setOffset(623) ;
//réglage du gain du capteur :
capteur.setScale(1/8.8) ;
}

void loop() {
int valeur = capteur.getAverageValue(25);
Serial.print(" Valeur numérique moyenne sur 25 ech : ");
Serial.println(valeur);
Serial.print(" Masse mesurée équivalente : ");
Serial.print(capteur.getGram(valeur), 1);
Serial.println(" g");
delay(200);
}

```

Entête déclarative

Initialisation

Instructions

### Activité 10

Ouvrir et tester ce programme à l'aide des masses suspendues fournies. Vérifier si l'étalonnage du capteur est correctement réalisé.

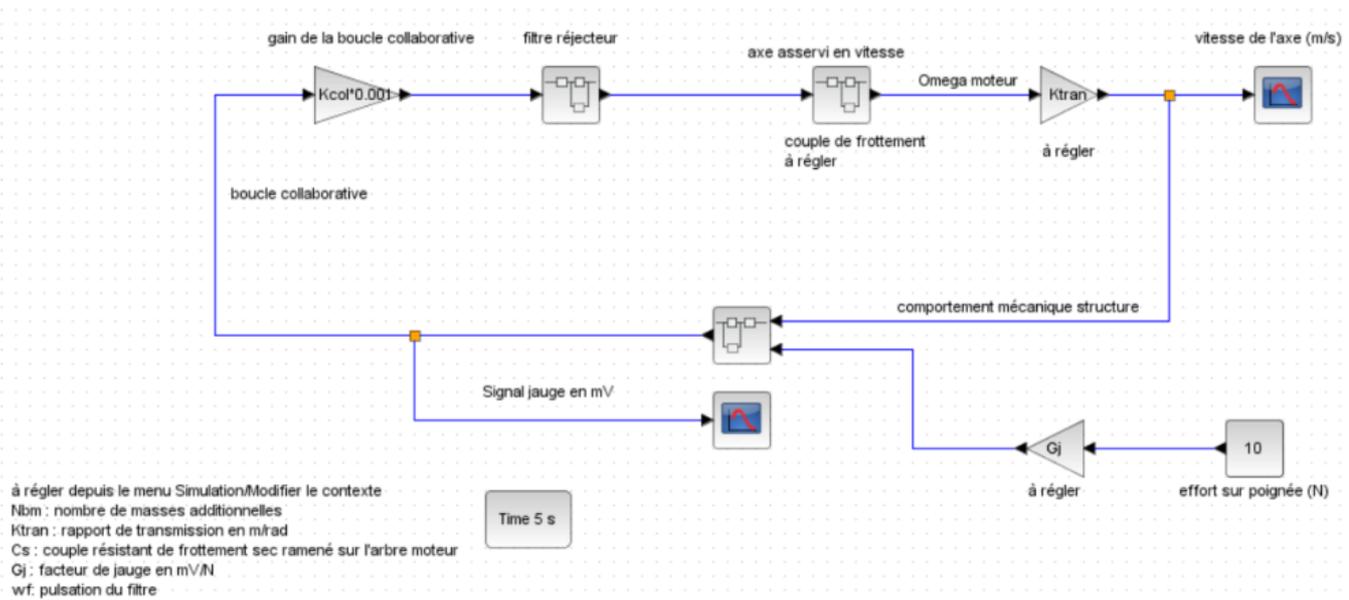
Modifier le programme Arduino précédent « Controle\_Commande.ino » pour faire en sorte que la tension de commande soit proportionnelle à l'effort sur le capteur (coefficient de proportionnalité 1/5). Tester.

#### 1.3.5 Modélisation de la commande collaborative

Objectifs : modéliser la commande collaborative et valider ce modèle.

Le modèle Scilab de la boucle collaborative ainsi que du comportement vibratoire de la structure est fourni dans le fichier « boucle collaborative.zcos ».

La commande comporte en série un correcteur proportionnel et un filtre réjecteur.



### Activité 11

Ouvrir et justifier le modèle proposé. Depuis le menu « Simulation », « Modifier le contexte », régler les valeurs de  $N_{bm}$  (nombre de masses choisi à 1 ici),  $K_{tran}$ ,  $c_s$  et  $G_j$  puis analyser la validité de ce modèle en comparant les fréquences obtenues avec celle mesurées à l'activité 2.

#### 1.3.6 Réglage de la commande collaborative

La commande collaborative comporte en série un correcteur proportionnel et un filtre réjecteur. La fonction de transfert de ce filtre dans le domaine de Laplace est :

$$H_{rej}(s) = \frac{1 + 2\xi \frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}}{1 + 2 \frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}}$$

### Activité 12 Analyse de la fonction du filtre

Depuis Scilab-Xcos, ouvrir le fichier « filtreréjecteur.zcos ». Lancer la simulation temporelle et/ou fréquentielle, analyser les résultats.

Justifier le rôle de ce filtre.

À partir des résultats précédents, proposer un réglage pour la valeur de la pulsation  $\omega_0$  du filtre.

### Activité 13 Réglage du filtre et validation de la commande

Régler ce filtre sur le modèle Scilab précédent « boucle collaborative.zcos » à partir du menu « Modifier le contexte ». Valider le réglage de cette commande.

En conclusion, justifier comment ce filtre permet de satisfaire l'exigence technique d'un déplacement sans oscillation.

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

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

### Production attendue

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

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

### **Phase 2 – Préparation de l'exposé (durée : 1h00)**

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

#### **Production attendue**

Un document numérique doit être réalisé afin de :

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

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

# Rapport du jury de l'épreuve d'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système 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 données, de simulation, de représentation ;
- analyser et vérifier ou comparer les performances de tout ou partie de ce système pluritechnique obtenues par des mesures ou issues de modèles de comportement et de connaissance ;
- justifier ou critiquer les solutions constructives retenues et les choix relatifs à la réalisation (hypothèses, comparaison multicritère des choix techniques et des organisations, évaluations économiques, etc.) en regard du cahier des charges ;
- élaborer, justifier, conduire et exploiter un protocole expérimental ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- concevoir et organiser le plan d'une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé à un niveau de classe donné. Elle prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par les candidats au cours des activités pratiques.

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

## Déroulement de l'épreuve

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

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

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

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

#### **Premier temps (durée 0h45)**

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

- du titre de la séquence ;
- du niveau de formation visé ;
- des caractéristiques d'une classe (nombre d'élèves, volume horaire en classe entière et en

groupe à effectif réduit) ;

- d'une proposition de progression pédagogique adaptée au niveau de formation ;
- de la situation temporelle de la séquence dans la progression pédagogique annuelle ;
- du référentiel du niveau de formation visé ;
- d'un document d'accompagnement (ressources) pour faire la classe ;
- d'une liste non exhaustive de systèmes didactiques d'un laboratoire de sciences industrielles de l'ingénieur.

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

### **Deuxième temps (durée 0h30)**

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

### **Troisième temps (durée 2h00)**

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

### **Quatrième temps (durée 0h45)**

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

- en situant la séance à caractère expérimental dans la proposition de séquence pédagogique ;
- en précisant l'organisation matérielle et pédagogique de la séance (nombre d'élèves, systèmes utilisés, travail en îlots) ;
- en décrivant la (ou les) démarche(s) pédagogique(s) retenue(s) (démarche d'investigation, de résolution de problème technique, de projet...) ;
- en détaillant le scénario des activités que doivent réaliser les élèves ;
- en proposant et en mettant en œuvre au moins un protocole expérimental différent de ceux proposés au cours du troisième temps ;
- en illustrant les différentes analyses que devront effectuer les élèves ;
- en explicitant clairement l'apport de la séance proposée dans le développement des compétences des élèves.

Pendant toute la durée de cette phase, les candidats ont accès aux logiciels de simulation, au système et aux matériels de travaux pratiques. Les candidats doivent donc entreprendre de réaliser

de nouvelles simulations ou expérimentations utiles et adaptées au niveau de formation visé par la séquence pour alimenter et étayer la trame de la séance qu'ils ont choisi de développer.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les candidats doivent également s'attacher à :

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

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

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

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

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

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

Les supports retenus lors de la session 2019 sont les suivants :

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

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

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

## **2. Analyse globale des résultats**

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

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

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

#### **Compréhension du système pluritechnologique support des activités pratiques**

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

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

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

#### **Résolution des problèmes posés et exploitation des résultats**

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

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

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

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

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

Le jury précise que les supports de travaux pratiques sont principalement issus des laboratoires des filières S-SI, STI2D, CPGE et couvrent l'ensemble des champs disciplinaires transversaux des sciences de l'ingénieur.

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

### **Conception d'une activité pédagogique à caractère expérimental**

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

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

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

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

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

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

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

Le jury conseille aux futurs candidats d'étudier préalablement et attentivement les programmes et les objectifs de formation des baccalauréats S (option sciences de l'ingénieur), STI2D et des CPGE, ainsi que les commentaires associés. L'étude précédente associée à la lecture des documents « ressources pour faire la classe » et des guides d'équipement, leur permettra de pouvoir proposer une exploitation pédagogique en adéquation avec le niveau imposé. Une réflexion pédagogique sur les objectifs de formation de ces séries et classes post bac est indispensable pour réussir cette partie de l'épreuve.

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

### **Présentation orale devant un jury**

L'exposé oral est centré sur la problématique pédagogique proposée, les manipulations visant à répondre à la problématique scientifique et technique ayant déjà été évaluées. Cette évolution de l'exposé oral, introduite à la session 2018, permet de mettre en valeur les qualités d'ingénierie pédagogique des candidats. Quelques rares candidats ne la prennent pas en compte malgré les différents rappels sur les attendus de cette présentation orale, tant dans le sujet que dans les consignes données par les interrogateurs. Ces candidats perdent alors du temps qui leur serait nécessaire pour avoir une réflexion pédagogique plus aboutie.

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

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

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

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

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

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

### **Comportement des candidats**

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

Les candidats se présentant au concours de l'agrégation se destinent à être de futurs cadres de l'Éducation nationale. Ils se doivent d'avoir un vocabulaire, un comportement et une tenue en adéquation avec le métier d'enseignant. Dans quelques cas, heureusement très rares, certains candidats cherchent à initier une forme de complicité avec les interrogateurs, ce qui ne peut en aucun cas être la posture à adopter dans un concours de recrutement d'enseignants.

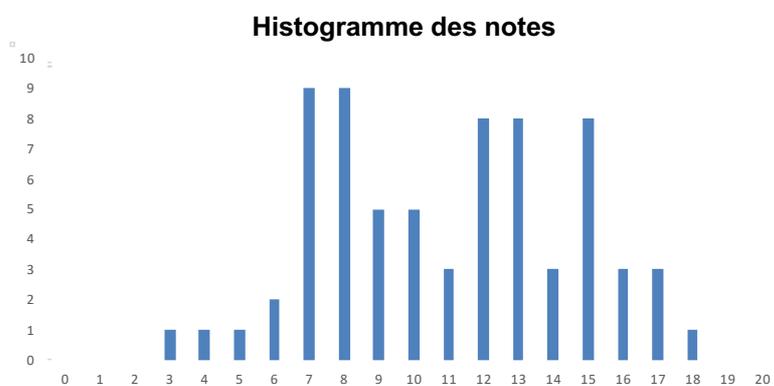
## **4. Conclusion**

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

## 5. Résultats

70 candidats ont été évalués lors de cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est 10,5/20 et l'écart-type 3,6 avec :

- 17,4/20 comme meilleure note ;
- 2,6/20 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 : BANC D'ETUDE DE VIBRATIONS



**MATÉRIEL CONFORME AUX NORMES CE**  
Tête de série contrôlée par un organisme agréé  
(BUREAU VERITAS)

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES : On e  
souligne jamais

Encombrement : L x P x H = 1800 x 750 x 2 000  
mm  
Masse : 200 kg (à vide)  
Niveau sonore inférieur à 70 dB  
Alimentation : 230 V monophasé 50Hz  
Puissance installée : 1,5 kW

<b>ÉTUDES PROPOSÉES</b>	
<b>THEME PEDAGOGIQUE :</b> <b>opérations d'inspection et / ou de maintenance</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Étude 1 : analyse vibratoire du multiplicateur</li><li>- Étude 2 : identification de défaut éventuel</li><li>- Étude 3 : alignement du moteur</li></ul>

## OBJECTIFS DE L'ÉPREUVE

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

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

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

- s'approprier un matériel ou équipement et son environnement associé si besoin à des systèmes informatiques de pilotage, de traitement, de simulation, de représentation ;
- conduire une expérimentation, une analyse de fonctionnement d'une solution, d'un procédé, d'un processus ;
- analyser le comportement d'une solution, d'un procédé, ou d'un processus à partir d'un modèle ;
- maîtriser, conduire et exploiter une simulation numérique ;
- exploiter les résultats obtenus et formuler des conclusions ;
- mener des démarches avec rigueur et évoluer avec autonomie (savoir-être) ;
- concevoir et organiser une séquence de formation pour un objectif pédagogique imposé (compétences visées et savoirs associés) à un niveau de classe donné ;
- savoir communiquer.

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

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

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

### Libellé de la séquence pédagogique

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

- Niveau brevet de technicien supérieur « Maintenance des systèmes ».
- Compétences visées

C 1 - RÉALISER LES INTERVENTIONS DE MAINTENANCE		
C 11 Diagnostiquer les pannes		Tâche : T 1.1
Données <sup>1</sup>	Compétences détaillées	Indicateurs de performance
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un bien en panne totale ou partielle.</li> <li>• Un ordre de travail.</li> <li>• La description des événements par l'exploitant.</li> <li>• La documentation technique du bien.</li> <li>• L'historique du bien.</li> <li>• Éventuellement une aide au diagnostic.</li> <li>• Les appareils de mesure et de contrôle.</li> <li>• Les moyens de surveillance du système et les moyens d'investigation.</li> <li>• Les outillages nécessaires.</li> <li>• Les documentations spécifiques des constructeurs.</li> <li>• Les équipements de protection individuelle.</li> <li>• Les équipements de protection collective.</li> <li>• Une base de gestion de la maintenance (GMAO).</li> </ul>	<p><b>Établir</b> le constat de défaillance.</p> <p><b>Identifier</b> la fonction défaillante :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• fonction opérative élémentaire ;</li> <li>• fonction sécurité ;</li> <li>• fonction communication ;</li> <li>• fonction dialogue ;</li> <li>• fonction alimentation en énergie ;</li> <li>• fonction surveillance.</li> </ul> <p><b>Identifier et répertorier</b> les composants liés à la non réalisation de la fonction et susceptibles d'être défaillants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• chaîne d'action ;</li> <li>• chaîne d'acquisition ;</li> <li>• chaîne de sécurité ;</li> <li>• structure de communication ;</li> <li>• chaîne de dialogue ;</li> <li>• chaîne d'alimentation en énergie.</li> </ul> <p><b>Localiser</b> la panne :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hiérarchiser les hypothèses ;</li> <li>• définir et réaliser les tests ;</li> <li>mesures, contrôles permettant de valider ou non les hypothèses.</li> </ul> <p><b>Identifier</b> la cause de défaillance.</p> <p><b>Déclencher</b> une intervention de réparation ou de dépannage.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La collecte des informations liées aux circonstances de la panne est correctement réalisée.</li> <li>• La fonction défaillante est identifiée.</li> <li>• Les composants de la chaîne fonctionnelle sont répertoriés.</li> <li>• La hiérarchisation est logique.</li> <li>• Les points de test et de contrôle sont identifiés.</li> <li>• Les appareils de mesure et de contrôle sont correctement choisis et mis en œuvre.</li> <li>• L'identification de l'élément défectueux est correcte.</li> <li>• La chronologie des tests, mesures, contrôles est pertinente et justifiée.</li> <li>• La cause de défaillance est plausible.</li> <li>• La durée du diagnostic est optimale.</li> <li>• La demande d'intervention est établie.</li> </ul>

C 1 - RÉALISER LES INTERVENTIONS DE MAINTENANCE		
C 12 Réparer, dépanner et éventuellement remettre en service		Tâches : T 1.3, T 1.4, T 6.1
Données	Compétences détaillées	Indicateurs de performance
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un bien en panne totale ou partielle.</li> <li>• Un ordre de travail.</li> <li>• La documentation technique du bien.</li> <li>• La localisation du composant défectueux.</li> <li>• Les outillages et appareils nécessaires.</li> <li>• Les équipements de protection.</li> <li>• La pièce de rechange ou son équivalence.</li> <li>• Un composant provisoire et les moyens d'adaptation.</li> <li>• Un planning d'intervention.</li> <li>• Une base de gestion de la maintenance (GMAO).</li> </ul>	<p><b>Effectuer</b> la consignation du bien et <b>mettre en œuvre</b> les mesures de prévention.</p> <p><b>Déposer</b> le composant en panne et <b>vérifier</b> l'état des composants périphériques.</p> <p><b>Dans le cadre d'une réparation : réaliser</b> l'échange standard du composant en panne ou <b>intégrer</b> un composant nouveau.</p> <p><b>Dans le cadre d'un dépannage :</b> <b>Réaliser</b> ou <b>faire réaliser</b> l'adaptation nécessaire, <b>monter</b> le composant provisoire.</p> <p><b>Effectuer la déconsignation</b> du bien.</p> <p><b>Effectuer</b> les réglages et/ou les paramétrages nécessaires.</p> <p><b>Procéder</b> à la remise en service et vérifier le bon fonctionnement du bien.</p> <p><b>Déclencher</b> si nécessaire la réparation du composant défectueux.</p> <p><b>Dans le cadre d'un dépannage, déclencher</b> une réparation future*.</p> <p><b>Renseigner</b> l'historique (ou la GMAO) et <b>mettre à jour</b>, si nécessaire, la documentation technique.</p> <p><b>Rendre compte</b> au client ou à l'exploitant.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les procédures de sécurité et les mesures de prévention sont respectées.</li> <li>• La dépose est effectuée dans les règles de l'art.</li> <li>• L'expertise des autres composants est correcte.</li> <li>• La réparation est effectuée dans les règles de l'art.</li> <li>• L'adaptation du composant provisoire est effectuée dans les règles de l'art.</li> <li>• Le bien est déconsigné.</li> <li>• Les réglages et/ou les paramétrages sont corrects.</li> <li>• La réparation, ou le dépannage, a été effectuée dans un temps minimum.</li> <li>• Les procédures de remise en service sont respectées.</li> <li>• Le bien a retrouvé son état spécifié</li> <li>• La commande de la pièce de rechange est effectuée.</li> <li>• Le compte rendu d'intervention est rédigé.</li> <li>• Les renseignements sont exploitables et corrects.</li> <li>• La base de gestion de la maintenance (GMAO) est correctement renseignée.</li> </ul>

## Savoirs associés

<b>S 10</b>	<b>TECHNIQUES DE MAINTENANCE ET DE CONDUITE</b>
-------------	---

Le technicien de maintenance intervient sur une grande variété de systèmes techniques comportant plusieurs technologies en interaction. Il doit être capable de mettre en œuvre les techniques de maintenance et de conduite avec une autonomie impliquant une bonne maîtrise des méthodes, des procédures et des outils pour répondre à sa mission. Son activité comporte en conséquence une vision approfondie des possibilités d'action, des probabilités d'apparition de divers événements et une bonne estimation des impacts de son action sur l'usage et l'évolution du bien. Il doit posséder en outre une bonne maîtrise des outils de suivi et de communication qui permettent de pérenniser les fonctionnements obtenus par la maintenance mise en place et de les optimiser aux plans technico-économique et énergétique.

<b>S 10.2</b>	<b>Opérations de maintenance corrective et préventive</b>	Systèmes			
	Connaissances	Limites de connaissances	Prod.	Énerg.	Éolien
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Types d'actions de réparation</b> - Dépose-repose du sous-ensemble.</li> <li>- Remplacement du composant interne défectueux.</li> <li>- Réglages, mises au point, essais, remises en service.</li> </ul>	Se limiter à la recherche des modalités de l'intervention.	3	3	3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Procédures et moyens relatifs aux actions de réparation</b></li> <li>- Consignation des différentes énergies présentes sur le système.</li> <li>- Manutention (principes et moyens liés au levage et à la manutention).</li> <li>- Choix de l'outillage ou du matériel adapté à l'intervention.</li> </ul>	Consignation et manutention (incluant la gestion des risques de manutention) : niveau permettant l'autonomie totale et la maîtrise de gestion d'équipement dans les cas courants. Niveau permettant l'interaction avec les spécialistes dans des cas difficiles.	3	3	3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Alignement et équilibrage dynamique d'organes tournants</b> (ligne d'arbres, de poulies, etc.).</li> </ul>	Maîtrise complète et en autonomie de la mise en œuvre des appareillages.	3	1	3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Procédures et moyens de nettoyage, dégraissage des composants</b></li> </ul>	Choix et précautions à prendre dans l'utilisation des produits détergents.	3	2	3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Procédures et moyens liés au remplacement des fluides</b></li> <li>- Choix de l'outillage.</li> <li>- Méthode.</li> <li>- Matériel adapté à l'intervention.</li> <li>- Recyclage des fluides récupérés.</li> </ul>	Formation à l'attestation d'aptitude requise pour les fluides frigorigènes.	3	4	3

S 10.6	Opérations de contrôle, de surveillance et d'inspection	Systèmes		
		Prod.	Énerg.	Éolien
Connaissances		Limites de connaissances		
<b>La mise en œuvre des opérations de contrôle</b> - Analyse vibratoire : types de mesures vibratoires, matériels employés, définition d'une mesure vibratoire, exploitation des mesures vibratoires.		Le niveau de maîtrise doit permettre : - de suivre une procédure définie de surveillance ; - de définir quel type de surveillance est la validation du fonctionnement du bien ; - d'extraire d'une supervision les données pertinentes à la qualité de fonctionnement.		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mise en œuvre des moyens de surveillance et de contrôle intégrés.</li> <li>Inspection d'un système par examen des caractéristiques significatives en regard d'une norme, d'une réglementation ou d'une préconisation.</li> </ul>		3	3	3
		3	3	3

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.

### MISE EN SITUATION

#### Accouplements flexibles



#### Roulement

SKF 6206

#### Moteur asynchrone triphasé

P = 1,5 kW  
n = 1 500 tr/min  
Roulement arrière :  
SKF 6204 ZZ C3  
Roulement avant :  
SKF 6205 ZZ C3

#### Multiplicateur

1 / 1,76  
Entrée : 44 dents  
Sortie : 25 dents  
Roulement entrée :  
SKF 6205 ZZ C3  
Roulement sortie :  
SKF 6207 ZZ C3

#### Pompe centrifuge monocellulaire

Débit : 20 m<sup>3</sup>/h  
Pression : 1 bar  
Roulements :  
SKF 6306 ZZ C3

Ce banc d'étude des vibrations permet, par son dimensionnement et sa constitution, de mettre en évidence une grande majorité des phénomènes vibratoires existants sur des machines tournantes :

- un roulement neuf, est monté dans un support permettant d'appliquer une charge variable. Un second roulement défectueux est fourni afin de permettre l'étude comparative entre un roulement en bon état et un roulement usagé ;
- un balourd est mis en évidence sur deux plans par le déséquilibre gradué de deux disques en rotation ;
- ce banc autorise le désalignement du moteur par rapport à l'axe de rotation des éléments adjacents ;
- le réducteur, monté en multiplicateur, permet d'étudier les bruits d'engrènement ;
- la fixation du moteur par trois supports élastiques permet d'étudier la filtration des vibrations en fonction de la fréquence de rotation du balourd d'excitation ;
- la charge, composée d'un réseau hydraulique eau élémentaire (pompe centrifuge, vannes manuelles sur le circuit d'admission et de refoulement, manomètre et vacuomètre), permet l'étude éventuelle des bruits d'aubages (sur demande uniquement) ainsi que des bruits engendrés par la cavitation générée par la fermeture de la vanne du circuit d'admission. La transparence des parties des canalisations d'admission et de refoulement permet de visualiser le phénomène de cavitation ;
- un indicateur de débit à flotteur sur le refoulement est proposé en équipement optionnel, de façon à pouvoir caractériser la pompe (courbe débit-pression).

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

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

#### **Objectif(s)**

L'objectif de cette première partie est de « prendre en main » le matériel et le logiciel d'analyse vibratoire avec des manipulations proposées qui doivent permettre d'acquérir le maximum d'autonomie pour la suite de l'épreuve.

#### **Moyens :**

- banc d'étude de vibrations ;
- collecteur de données FALCON ; collecteur, analyseur vibratoire, équilibreur, enregistreur ;
- capteurs accéléromètres ASH201-A équipés de leur cordon de raccordement ;
- cordon de liaison collecteur de données FALCON / PC, USB ;
- PC équipé du logiciel d'analyse de vibrations NEST i4.0.

L'ensemble des documents nécessaires à l'exploitation de cette partie est disponible dans le dossier sur le bureau : dossier ressources.

#### **Activités à réaliser**

##### **Activité 1 : effectuer des mesures sur le banc d'étude de vibrations**

###### **Documents du dossier ressources utilisés :**

- analyse vibratoire / 1 maintenance ;
- manuels utilisation / FALCON Manuel utilisateur ;
- manuels utilisation / NEST i4.0 Manuel Utilisateur.

###### **Manipulation :**

- à partir du logiciel NEST i4.0, charger la ronde « BEV » dans le collecteur de données FALCON à l'aide du cordon USB (collecteur en mode « Communication » Liaison directe par USB – commande *HOME / collecte / NEST -> Instrument / BEV / Envoyer* ;

- à vitesse maximale et vannes de pompe complètement ouvertes, effectuer le relevé de mesures des vibrations au niveau du roulement de palier d'entrée 3 du multiplicateur (capteur d'accélération à l'entrée 3RH) et celles au niveau du roulement de palier de sortie 4 du multiplicateur (capteur d'accélération à la sortie 4RH) ;
- décharger la ronde « BEV » à partir du collecteur de données FALCON dans le logiciel NEST i4.0 à l'aide du cordon USB (collecteur en mode « Communication ») en utilisant la commande *HOME / collecte / Instrument -> NEST / BEV / Décharger*.

## **Activité 2 : analyser les mesures, paramètres et types de courbes**

### **Documents du dossier ressources utilisés :**

- analyse vibratoire / 2 analyse vibratoire ;
- analyse vibratoire / 3 surveillance machines ;
- manuels utilisation / VIBGRAPH manuel utilisateur.

### **Manipulation :**

- pour les paliers d'entrée et de sortie du multiplicateur, afficher les résultats de mesure en utilisant la commande *Home / analyste / BEV*.

### **Questionnement :**

- identifier et justifier les points de mesure ainsi que les paramètres de surveillance ;
- pour le multiplicateur, sur les paliers d'entrée et de sortie, proposer les spectres utiles à exploiter.

## **PREMIERE PHASE : DEUXIEME PARTIE (DUREE ≈ 2H)**

### **Première phase – Deuxième partie (durée 2h environ)**

*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.*

### **Objectif**

L'objectif de cette deuxième partie est d'approfondir l'analyse vibratoire, de justifier son utilité comme outil de surveillance ou d'analyse de systèmes pour en assurer la maintenance.

### **Moyens**

- banc d'étude de vibrations ;
- collecteur de données FALCON (collecteur, analyseur vibratoire, équilibreur, enregistreur) ;
- capteurs accéléromètres ASH201-A équipés de leur cordon de raccordement ;
- cordon de liaison collecteur de données FALCON / PC : USB ;
- PC équipé du logiciel d'analyse de vibrations NEST i4.0.

### **Documents ressources**

L'ensemble des documents nécessaires à l'exploitation de cette partie est disponible dans le dossier sur le bureau : dossier ressources.

## **Étude 1 : identification des différentes sources de défauts dans les spectres**

### **Activité 3 : analyser les mesures, identifier les différentes sources de vibrations et présenter une synthèse**

**Documents du dossier ressources utilisés :**

- analyse vibratoire / 4 origine vibrations ;
- manuels utilisation / NEST i4.0 manuel utilisateur ;
- manuels utilisation / VIBGRAPH manuel utilisateur.

**Manipulation :**

- pour les paliers d'entrée et de sortie du multiplicateur, afficher les spectres basses fréquences et moyennes fréquences : *Home / analyste / BEV / 3RH Spectre BF et Spectre MF* puis *4RH Spectre BF et Spectre MF*.

**Questionnement :**

- repérer les valeurs et niveaux des pics associés à un éventuel balourd, à un éventuel déalignement, aux phénomènes magnétiques du moteur d'entraînement, à l'engrenage et aux roulements ;
- conclure sur des défauts éventuels ;
- présenter une synthèse de vos travaux à l'examineur en décrivant fonctionnellement le système et en vous limitant aux manipulations effectuées et aux questions posées.

**Étude 2 : identification de défaut éventuel****Activité 4 : choisir un modèle et déterminer des fréquences théoriques de défauts de roulements****Documents du dossier ressources utilisés :**

- analyse vibratoire / 4 origine vibrations.

**Logiciel utilisé :**

- logiciel roulement / vib4.

**Manipulation :**

- lancer le logiciel vib4 et démarrer le mouvement puis observer les réponses temporelles pour un défaut sur la bague extérieure, la bague intérieure et une bille.

**Questionnement**

Pour un roulement à billes à gorge profonde, les données étant  $Z$  = nombre d'éléments roulants,  $d$  = diamètre des éléments roulants,  $DE$  = diamètre du chemin de roulement de la bague externe,  $DI$  = diamètre du chemin de roulement de la bague interne,  $DM$  = « diamètre primitif » du roulement ( $DM=(DE+DI)/2$ ) et  $F0$  = fréquence de rotation de l'arbre (la bague externe étant fixe) :

- proposer un modèle d'étude cinématique permettant de déterminer les fréquences de rotation de la cage (FC) et celles correspondant à un défaut sur la bague externe (FE), sur la bague interne (FI) et sur les éléments roulants (FB) ;
- déterminer littéralement ces fréquences FC, FE, FI, FB en fonction des données précédentes  $Z$ ,  $d$ ,  $DE$ ,  $DI$ ,  $DM$ ,  $F0$ .

**Logiciel utilisé Excel avec le fichier :**

- logiciel roulement / fréquences roulements.xlsx.

**Manipulation :**

- ouvrir le fichier avec Excel et entrer la valeur de la vitesse de rotation de l'arbre moteur.

**Questionnement :**

- pour les roulements d'entrée et de sortie du multiplicateur, déterminer les valeurs numériques FC, FE, FI, FB pour la fréquence F0 mesurée sur les courbes de spectres.

**Activité 5 : mesurer des fréquences réelles de défauts de roulements et calculer des écarts****Documents du dossier ressources utilisés :**

- analyse vibratoire / 4 origine vibrations ;
- manuels utilisation / VIBGRAPH Manuel utilisateur.

**Questionnement :**

- à partir des relevés sur les spectres fréquentiels des roulements d'entrée et de sortie du multiplicateur, relever les valeurs numériques des fréquences f0, p0, p1, p2, p3, p4, C1, E1, B1 et I1 et indiquer les correspondances et écarts éventuels avec les fréquences caractéristiques FC, FE, FI, FB pour la fréquence F0 mesurée, des roulements d'entrée et de sortie du multiplicateur et identifier d'éventuels défauts ;
- proposer un protocole pour détecter un défaut éventuel d'un roulement.

**Activité 6 : éditer un rapport de surveillance, identifier des défauts éventuels en corrélation avec la norme****Documents du dossier ressources utilisés :**

- manuels utilisation / NEST i4.0 Manuel Utilisateur ;
- norme extraits / NORME.

**Manipulation :**

- éditer un rapport complet : Home / analyste / BEV / Avis / imprimante / Rapport complet DOCX.

**Questionnement :**

- relever les valeurs des seuils d'alarme : pAl, Al et Dg ;
- comparer ces niveaux avec la norme en vigueur et les codes de couleurs ;
- conclure quant au respect de la norme.

**Étude 3 : alignement du moteur****Activité 7 : choisir un protocole pour réaliser l'alignement du moteur****Questionnement :**

- proposer un protocole de mesures pour aligner le moteur ;
- en prenant en compte les conclusions des études précédentes, proposer les mesures à réaliser et les réglages correspondants ;
- présenter votre protocole à l'examineur.

**Activité 8 : réaliser l'alignement moteur****Manipulation :**

- effectuer les réglages pour aligner le moteur.

### **Première phase – Troisième partie (durée 1h30 environ)**

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

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

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

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

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

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

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

## 1. Présentation de l'épreuve

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

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

## Déroulement de l'épreuve

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

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

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

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

#### Première partie (durée ≈ 0h30)

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

#### Deuxième partie (durée ≈ 2h00)

Pour cette partie, après la présentation du système aux examinateurs, les candidats doivent suivre le questionnement proposé afin de répondre à la problématique proposée dans le TP. Cette partie permet aux candidats, par la mobilisation de compétences caractéristiques du

---

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

niveau de l'agrégation, d'analyser les problèmes posés puis d'exploiter les résultats obtenus (hypothèses, modèles, expérimentations, mesures, résultats numériques, etc.) pour justifier les solutions.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Thèmes d'études retenus lors de la session 2019 :

- analyse vibratoire de machines tournantes ;
- vérification de performances techniques ;
- validation de procédés et de matériaux ;
- identification et analyse de comportement de structure ;
- qualification d'un processus de réalisation de pièces usinées ;

- validation et choix de solution constructive.

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

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

### **Compétences attendues par le jury**

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

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

## **2. Analyse globale des résultats**

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

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

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

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

Pour cette partie, le jury recommande :

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

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

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

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

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

La maîtrise des connaissances fondamentales dans les domaines de la mécanique, de l'automatique, de la conception, de la pré-industrialisation, de l'industrialisation, du contrôle et de la maintenance des

produits est indispensable pour mettre en œuvre les différents équipements proposés et pour résoudre les problématiques auxquelles ils sont confrontés.

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

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

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

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

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

Le jury recommande aux candidats de :

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

- proposer et justifier les protocoles expérimentaux et/ou de simulation à mettre en œuvre avec les élèves ;
- définir les modalités d'évaluation des compétences visées.

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

Le jury conseille aux futurs candidats d'étudier préalablement et attentivement les programmes et les objectifs de formation des baccalauréats STI2D (enseignement spécifique de spécialité ITEC), des BTS et des DUT du champ de la spécialité, ainsi que les modalités de certification (les programmes ou référentiels sont fournis en annexe aux candidats) et les documents d'accompagnement : ressources pour le lycée général et technologique et guides d'équipement (cf. Eduscol).

### **Concernant la présentation orale devant un jury**

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

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

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

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

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

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

## **Concernant le comportement des candidats**

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

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

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

## **4. Conclusion**

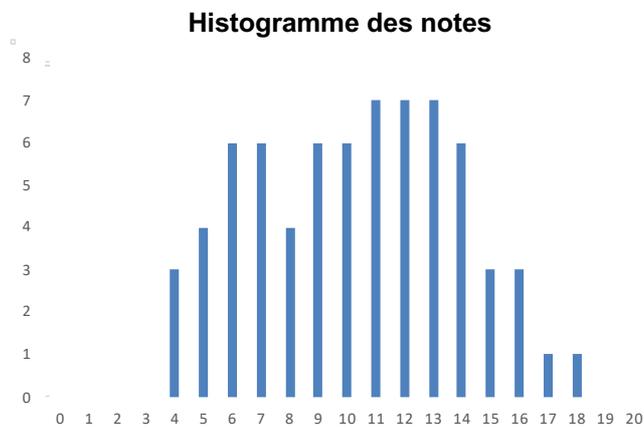
Le jury est conscient de la difficulté de cette épreuve exigeante mais fondamentale en sciences industrielles de l'ingénieur. Pour cette session de l'agrégation, les résultats de la deuxième épreuve d'admission sont encourageants. Les candidats des prochaines sessions de cette épreuve trouveront dans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

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

## 5. Résultats

70 candidats ont composé pour cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 9,8/20, et l'écart-type 3,5 avec :

- 17,7 comme meilleure note ;
- 03,5 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. Les dossiers et exposés insuffisamment préparés et/ou inadaptés aux exigences de l'épreuve n'ont pas permis à d'autres candidats de faire preuve de leurs compétences.

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

### Le dossier industriel

Le choix du support, produit ou système technologique représentatif des technologies actuelles, est déterminant pour permettre un transfert pertinent vers l'enseignement. Au-delà du choix du support en lui-même, l'identification d'une problématique claire et réelle nécessitant la mise en place d'une démarche d'ingénieur permet de présenter des développements cohérents. La problématique choisie ne doit pas se limiter à une simple vérification des performances indiquées dans le cahier des charges du support.

Le choix de la ou des formations considérées pour l'application pédagogique doit être en adéquation avec la nature du support et la problématique traitée.

Les développements scientifiques et technologiques, du niveau de l'agrégation, doivent être justifiés au regard de la problématique.

Le dossier industriel doit aborder plusieurs dimensions :

- socio-culturelle pour mettre en contexte le problème traité vis-à-vis d'une question sociétale, dont le développement durable ;
- scientifique pour appliquer des démarches, pour conduire et analyser des expérimentations, des modélisations, des simulations ;
- ingénierie pour analyser les résultats des développements scientifiques et apporter des réponses technologiques concrètes aux problématiques.

Ce dossier doit comporter une exploitation pédagogique qui s'appuie sur le support et les problématiques retenus, les investigations scientifiques et technologiques proposées. Elle doit être en cohérence avec le niveau d'enseignement choisi et les programmes ou référentiels associés.

L'exploitation pédagogique doit préférentiellement concerner l'enseignement du second degré : cycle terminal du baccalauréat général spécialité SI, cycle terminal du baccalauréat STI2D, l'enseignement supérieur : STS, CPGE...

Le dossier présenté doit résulter d'un travail personnel du candidat, les références scientifiques et pédagogiques doivent être citées explicitement dans le texte en lien avec une bibliographie (le jury utilise des moyens de détection de plagiat).

Le niveau de confidentialité ne doit pas nuire à la constitution du dossier et au dialogue avec le jury.

Les fichiers numériques joints (sur clef USB) ne doivent pas se limiter au dossier au format pdf.

L'ensemble des fichiers pertinents issus des « outils numériques métiers » doivent être joints.

Le jury apprécie particulièrement :

- les dossiers élaborés autour d'une véritable problématique, clairement définie, résultant d'une relation authentique avec l'entreprise ;
- les dossiers clairement structurés comportant des schémas, graphes et autres images s'appuyant sur une documentation technique authentique et sur une maquette numérique... ;
- les dossiers n'excédant pas 40 pages (annexes éventuelles comprises), rédigés dans une langue française soignée ;
- les dossiers rédigés de façon très lisible ;
- des démarches scientifiques et technologiques rigoureuses, adaptées, formalisées et étayées par des expérimentations et dont l'analyse critique permet de répondre à la problématique traitée ;
- les « outils métiers » adaptés aux développements scientifiques entrepris et utilisés avec pertinence ;
- un regard critique sur les écarts identifiés ;
- des exploitations pédagogiques cohérentes avec les considérations scientifiques et technologiques développées ;
- des exploitations pédagogiques précises (niveau d'enseignement, contexte, matériel choisi, position de la séquence dans la progression des apprentissages, contenu et déroulement de la séquence, modalités d'évaluation, détail d'une séance, documents pour le professeur, documents pour les élèves...)
- la capacité à se projeter sur différents niveaux de formation (second degré et enseignement supérieur) ;
- la connaissance et la prise en compte de la diversité de publics que peut rencontrer le professeur au sein d'une même formation ou au gré de ses affectations ;
- les propositions d'exploitations pédagogiques justifiées, mises en perspective dans un cadre interdisciplinaire.

Les dossiers, dans leur majorité, sont bien présentés et construits de manière cohérente. Cependant, le jury regrette que leur structure soit parfois stéréotypée notamment pour la partie pédagogique.

## **L'exposé et les échanges avec le jury**

Durant les 30 minutes de l'exposé, les candidats doivent mettre en valeur leurs qualités de didacticien et de pédagogue pour expliquer leurs choix, leurs démarches et leurs analyses.

Ensuite, les 30 minutes d'échange avec le jury permettent d'approfondir certains points présentés dans le dossier ou durant l'exposé. Ces échanges portent autant sur les développements scientifiques et technologiques engagés que sur les propositions d'exploitations pédagogiques qui en découlent. Le jury élargit son questionnement pour vérifier que les candidats ont entrepris une réflexion sur :

- les finalités de l'enseignement technologique et ses interactions avec d'autres disciplines ;
- les démarches d'apprentissage utilisées pour l'enseignement des sciences industrielles de l'ingénieur ;
- les missions à assurer par un enseignant au sein du système éducatif ;
- la connaissance du contexte d'exercice et le fonctionnement d'un établissement dans son ensemble ;
- les situations au cours desquelles il est en position de faire partager les valeurs de la République en tant qu'agent du service public d'éducation.

Le jury apprécie particulièrement :

- les exposés clairement structurés ;
- une expression maîtrisée, un vocabulaire technique adapté, une fluidité des propos ;
- les supports visuels, notamment les schémas, lisibles et judicieusement utilisés ;
- la bonne écoute des questions, les réponses argumentées et concises ;
- les réponses démontrant la connaissance du contexte d'exercice et du fonctionnement d'un établissement dans son ensemble ;
- les échanges démontrant un vif intérêt pour les évolutions du système éducatif dans son ensemble et de la discipline en particulier.

Il est inutile, lors de l'exposé, de présenter les filières d'enseignement choisies.

Les présentations orales ont été, pour une grande majorité de candidats, préparées soigneusement avec un temps d'exposé maîtrisé.

Afin d'assurer une équité entre tous, quel que soit le support choisi, les candidats ne sont pas autorisés à apporter et présenter des supports physiques (produits, échantillons, maquettes didactiques...). S'ils existent, ces éléments pourront être mis en valeur à travers les documents présentés.

## **4. Conclusion**

Les candidats qui se sont distingués montrent en même temps une solide expertise scientifique et technologique, un esprit d'analyse et de synthèse couplé à une maîtrise pédagogique et didactique de leur discipline.

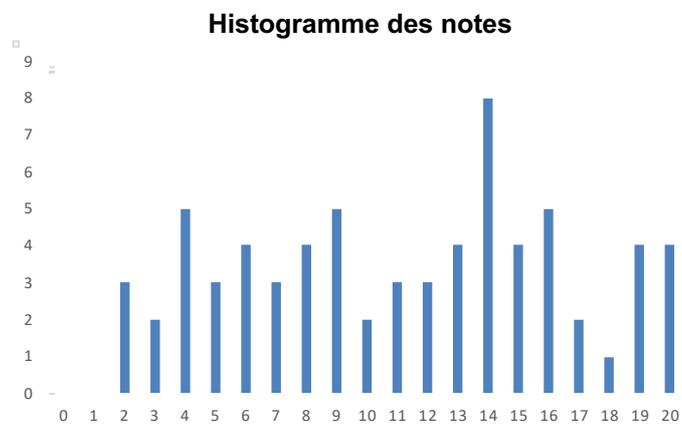
Le jury a constaté avec satisfaction que, pour la grande majorité des candidats, la dimension éducative du métier de professeur est correctement appréhendée et qu'une réelle réflexion a été menée sur la transmission des valeurs de la République.

Le présent texte réactualise les recommandations émises dans des rapports de jurys antérieurs, il pourra servir utilement d'appui à la préparation des futurs candidats.

## 5. Résultats

69 candidats ont été évalués. La moyenne des notes obtenues est de 10,8/20 et l'écart-type 5,3 avec :

- 20 comme meilleure note ;
- 1,4 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 des candidats à agir en agent du service public d'éducation, en vérifiant qu'ils intègrent dans l'organisation de leur enseignement :

- la conception des apprentissages des élèves en fonction de leurs besoins personnels ;
- la prise en compte de la diversité des conditions d'exercice du métier et la connaissance réfléchie des contextes associés ;
- le fonctionnement des différentes entités éducatives existant au sein de la société et d'un EPLE (institution scolaire, établissement, classe, équipe éducative...);
- les valeurs portées par l'Éducation nationale, dont celles de la République.

Les candidats doivent prendre en compte ces exigences dans la conception des séquences pédagogiques présentées au jury. Il s'agit de faire acquérir, à l'élève, des compétences alliant des connaissances scientifiques et technologiques et des savoir-faire associés, mais également d'installer des comportements responsables et respectueux des valeurs républicaines.

Cet objectif exigeant induit une posture réflexive des candidats lors de la préparation et de la présentation d'une séquence pédagogique. En particulier, les stratégies pédagogiques proposées devront permettre d'atteindre l'objectif de formation visé dans le cadre de « l'école inclusive ». Il est indispensable de donner du sens aux enseignements en ne les déconnectant pas d'un contexte sociétal identifiable. Cela doit contribuer à convaincre les élèves du bien-fondé des valeurs républicaines et à se les approprier.

L'éducation aux valeurs républicaines doit conduire à adopter des démarches pédagogiques spécifiques, variées et adaptées. Il s'agit en particulier de doter chaque futur citoyen d'une culture faisant de lui un acteur éclairé et responsable de l'usage des technologies et des enjeux éthiques associés. À dessein, il est nécessaire de lui faire acquérir des comportements fondateurs de sa réussite personnelle et le conduire à penser et construire son rapport au monde. Les modalités pédagogiques, déployées en sciences industrielles de l'ingénieur, sont nombreuses et sont autant d'opportunités offertes à l'enseignant pour apprendre aux élèves :

- à travailler en équipe et coopérer à la réussite d'un projet ;
- à assumer une responsabilité individuelle et collective ;
- à travailler en groupe à l'émergence et à la sélection d'idées issues d'un débat et donc favoriser le respect de l'altérité ;
- à développer des compétences relationnelles en lui permettant de savoir communiquer une idée personnelle ou porter la parole d'un groupe ;
- à comprendre les références et besoins divers qui ont conduit à la création d'objets ou de systèmes à partir de l'analyse des « modes », des normes, des lois... ;
- à différencier, par le déploiement de démarches rigoureuses, ce qui relève des sciences et de la connaissance de ce qui relève des opinions et des croyances. L'observation de systèmes réels, l'analyse de leur comportement, de la construction ou de l'utilisation de modèles multiphysiques participent à cet objectif ;
- à observer les faits et situations divers suivant une approche systémique et rationnelle ;
- à adopter un positionnement citoyen assumé au sein de la société en ayant une connaissance approfondie de ses enjeux au sens du développement durable. L'impact environnemental, les

- coûts énergétiques, de transformation et de transport, la durée de vie des produits et leur recyclage, sont des marqueurs associés à privilégier ;
- à réfléchir collectivement à son environnement, aux usages sociaux des objets et aux conséquences induites ;
  - à comprendre les enjeux sociétaux liés au respect de l'égalité républicaine entre hommes et femmes ;
  - ...

Ces différentes approches permettent d'évaluer la posture du candidat par rapport au besoin de transmettre les valeurs et les principes de la République à l'école. La dimension civique de l'enseignement doit être explicite.

Pour prendre en compte cette dimension du métier d'enseignant dans la conception de séquences pédagogiques, les candidats peuvent s'appuyer sur différents textes réglementaires et ressources pédagogiques disponibles :

- les programmes d'enseignement moral et civique ;
- le socle commun de connaissances, de compétences et de culture ;
- l'instruction relative au déploiement de l'éducation au développement durable dans l'ensemble des écoles et établissements scolaires pour la période 2015-2018 (NOR : MENE1501684C, circulaire n° 2015-018 du 4-2-2015, MENESR – DGESCO) ;
- le parcours Avenir ;
- la banque de ressources « Pour une pédagogie de la laïcité à l'école » - Abdenmour BIDAR - la documentation française 2012 ;
- les ressources numériques en ligne du réseau de création et d'accompagnement pédagogiques CANOPÉ – éducation et société ;
- les ressources du portail national des professionnels de l'éducation – Éduscol – établissements et vie scolaire ;
- référentiel de compétences des métiers du professorat et de l'éducation – [education.gouv.org](http://education.gouv.org).