



Concours du second degré

Rapport de jury

AGRÉGATION

SECTION SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGENIEUR

OPTION INGÉNIÉRIE ÉLECTRIQUE

Concours externe

Session 2016

Rapport de jury présenté par

Monsieur Samuel VIOLLIN

Inspecteur général de l'éducation nationale

Président de jury

Sommaire

Membres du jury de la session 2016	3
Résultats statistiques	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	23
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	49
Éléments de correction de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	52
Rapport du jury de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation	71
Exemple de sujet pour l'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique	76
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'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale d'un système pluritechnique	87
Rapport du jury de l'épreuve d'activité pratique et d'exploitation pédagogique relatives à l'approche spécialisée d'un système pluritechnique	88
Rapport du jury de l'épreuve de soutenance d'un dossier industriel	93
Rapport sur la transmission des valeurs et principes de la République	96

Membres du jury

Président

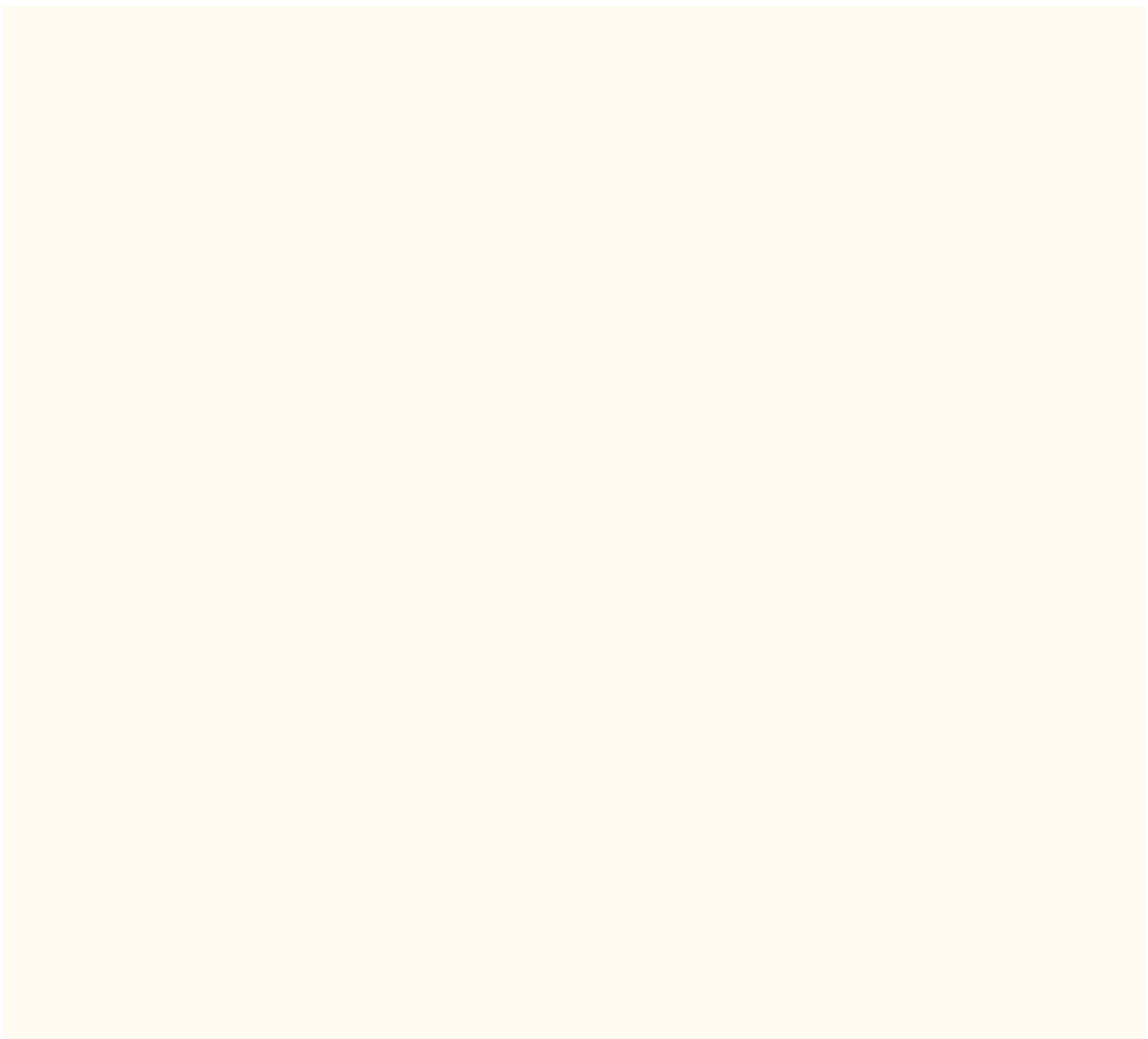
VIOLLIN Samuel – Inspecteur général de l'éducation nationale-Groupe STI

Vice-président

GARNIER Éric – Inspecteur d'Académie – Inspecteur Pédagogique Régional – Limoges

Secrétaire du jury

ROBERT Bruno – Professeur des Universités – Université de Reims Champagne-Ardenne – Reims



Remerciements

Les épreuves d'admission de l'agrégation externe section sciences industrielles de l'ingénieur, option sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique se sont déroulées dans d'excellentes conditions au lycée La Martinière Monplaisir à Lyon, du 23 mai inclus au 3 juin 2016 inclus. Les membres du jury adressent de vifs remerciements à Monsieur le Proviseur de cet établissement ainsi qu'à l'ensemble de ses collaborateurs pour l'accueil chaleureux qui leur a été réservé.

Résultats statistiques de la session 2016

Inscrits	Nombre de postes	Présents aux trois épreuves d'admissibilité	Admissibles	Admis
628	31	226	72	31

Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le premier candidat admissible	19,81
Moyenne obtenue aux épreuves écrites par le dernier candidat admissible	7,01
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le premier candidat admis	17,63
Moyenne obtenue aux épreuves écrites et orales par le dernier candidat admis	9,36

Avant-propos

Cette année 31 postes étaient offerts à l'agrégation SII option IE, en augmentation significative par rapport à la session précédente (20 postes pour la session 2014). Le nombre d'inscrits est également en augmentation, passant de 511 pour la session 2015 à 628 pour la session 2016. Cette progression du nombre d'inscrits est un élément positif. Il est important que le vivier des candidats bien préparés se développe pour recruter les enseignants de haut niveau nécessaire à l'enseignement des sciences industrielles de l'ingénieur dans le champ de l'ingénierie électrique.

L'État recrute des professeurs agrégés pour leurs hautes compétences scientifiques et technologiques, associées à de grandes compétences pédagogiques. Celles-ci sont évaluées dans les trois épreuves d'admission. Proposer une séquence pédagogique nécessite de s'y être bien préparé. Cela mobilise des compétences pédagogiques construites dans la durée pendant le cursus de préparation au concours.

Les coefficients des épreuves (1 pour chacune des épreuves d'admissibilité et 2 pour chacune des épreuves d'admission) et leur définition mettent en évidence la nécessité d'une bonne préparation pour l'élaboration de séquences pédagogiques.

La direction générale des ressources humaines a adressé un texte aux présidents de concours de recrutement de professeurs, pour les nouvelles épreuves des CAPES, CAPET, CAPLP et CAPEPS. Ce rappel s'applique également aux agrégations: *« ...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 ».....*

« Par ailleurs, dans le cadre de la grande mobilisation pour les valeurs de la république engagé en janvier 2015, le principe de l'évaluation des candidats sur leur capacité à faire partager ces valeurs lors du concours de recrutement des enseignants a été renforcé à la session 2015...

Ces éléments d'interrogation interviennent également désormais à l'occasion des épreuves d'admission de l'agrégation externe, conformément à l'article 8 de l'arrêté du 28 décembre 2009 dans sa rédaction issues de l'arrêté du 25 juillet 2014. »

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

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

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

Lors des épreuves d'admission, les candidats ont à leur disposition des ordinateurs reliés à l'Internet.
Seuls les sites ne nécessitant pas d'identification sont autorisés.

Cette session 2016 s'est révélée être d'un bon niveau. Le jury félicite les candidats et leurs formateurs. Parmi les 72 candidats admissibles, huit ne se sont pas présentés aux épreuves d'admission.

L'agrégation est un concours prestigieux qui impose de la part des candidats un comportement et une présentation irréprochable. Le jury y est attentif et invite les candidats à avoir un comportement et une tenue adaptée aux circonstances particulières d'un concours de recrutement de cadres de catégorie A de la fonction publique.

Ce rapport a été rédigé pour être utile aux futurs candidats de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur option ingénierie électrique et à leurs formateurs. Tous sont invités à se l'approprier par une lecture attentive.

Samuel VIOLLIN
Président du jury

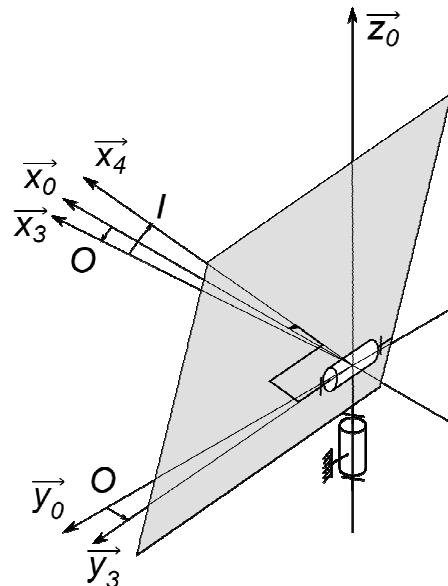
Éléments de correction de l'épreuve de sciences industrielles de l'ingénieur

Question 1

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

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

Question 2



Question 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$f_i = \frac{S_a}{S_h} = \vec{x}_4 \cdot \vec{x}_2 = \vec{x}_4 \cdot \vec{u} = u_x \cdot \cos I \cdot \cos O + u_y \cdot \cos I \cdot \sin O - u_z \cdot \sin I.$$

Question 4

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

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

Question 5

Le rendement de l'ensemble de captation est exprimé par :

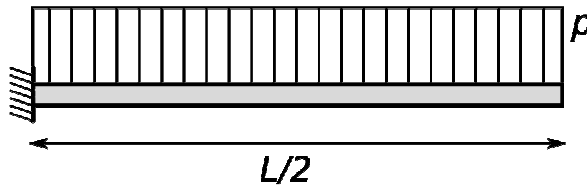
$$\eta_{capt} = \eta_{incl} \cdot \eta_{refl} \cdot \eta_{trans} \cdot \eta_{omb} \cdot \eta_{mas} = 0,86 \times 0,88 \times 0,95 \times 0,96 \times 0,97 = 0,67.$$

La puissance rayonnée sur le récepteur thermique s'en déduit :

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

Question 6

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



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

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

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

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

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

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

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

Les conditions limites (pente nulle à l'encastrement) permettent de calculer : $\text{cste} = -\frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z}$.

$$\text{D'où : } \frac{dy}{dx} = \frac{p}{6 \cdot E \cdot I_z} \cdot \left(\frac{L}{2} - x \right)^3 - \frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z}.$$

$$\text{L'angle à l'extrémité de la poutre vaut alors : } \varepsilon \equiv \left| y' \left(\frac{L}{2} \right) \right| = \frac{p \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z}.$$

Question 7

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

La poutre IPN80 ne convient donc pas.

Question 8

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

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

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

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

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

Question 9

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

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

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

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

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

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

Question 10

Si le cumul d'erreur vaut $\pm 2,5 \times 10^{-3}$ rad, alors le secteur angulaire qui élargit la tache vaut 5×10^{-3} rad. À 600 m, la tache s'élargit de 3 m. L'image du soleil étant déjà large de 5,6 m, la tache finale sera large de 8,6 m, ce qui est bien inférieur aux dimensions du récepteur (12 m x 14 m). La tâche est donc totalement incluse dans le récepteur.

Le facteur de concentration du champ de captation s'exprime donc comme un rapport de surfaces. C'est en effet le rapport de la surface utile du champ héliostatique ($75\,000 \text{ m}^2$) et de la surface de la tache perçue par le récepteur. Soit :

$$F_c = \frac{75\,500}{\frac{\pi \cdot 8,6^2}{4}} = 1\,299,8.$$

On en déduit la valeur de la puissance surfacique incidente sur le récepteur dans des conditions nominales de fonctionnement telles que $I_{\text{PG}} = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$\phi = \eta_{\text{capt}} \cdot I_{\text{SG}} \cdot F_c = 870 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Question 11

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

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

Question 12

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

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

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

On en déduit :

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

Ou encore :

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

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

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

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

Question 13

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Question 14

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

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

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

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

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

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

Soit :

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

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

Question 15

Les valeurs des températures et des pressions sont :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Il reste donc à déterminer les valeurs des enthalpies. Grâce au tableau (DT N°1), on peut lire :

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

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

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

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

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

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

Soit :

$$H_{sis} = 209,3 + (6,07 - 0,71) \cdot \frac{(2592 - 209,3)}{(8,07 - 0,71)},$$
$$H_{sis} = 1944 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On en déduit donc H_{st} :

$$H_{st} = H_{et} - (H_{et} - H_{sis}) \cdot \eta_{is},$$
$$H_{st} = 2801 - (2801 - 1944) \cdot 0,90,$$
$$H_{st} = 2023 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On en déduit donc le rendement thermodynamique du cycle :

$$\eta_{cycle} = \frac{(H_{et} - H_{st})}{(H_{et} - H_{scond})},$$
$$\eta_{cycle} = \frac{(2801 - 2023)}{(2801 - 209,3)},$$
$$\eta_{cycle} = 0,3.$$

Question 16

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

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

Question 17

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

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

Question 18

Voir le corrigé sur le document réponse N°2

Question 19

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

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

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

$$F_{pn} = \cos(\varphi_n) = \frac{P_n}{S_n} = \frac{11}{12} = 0,917 \quad \text{et} \quad \varphi_n \approx 23^\circ 33'.$$

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

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

Question 20

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

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

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

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

On en déduit la réactance synchrone :

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

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

Question 21

L'expression de la force électromotrice interne est déterminée en exploitant le schéma équivalent représenté sur le document réponse N°2. Soit :

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

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

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

L'application numérique donne :

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

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

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

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

Des mêmes relations, on déduit l'angle interne :

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

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

Les pertes électriques de l'inducteur s'en déduisent :

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

Question 22

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

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

Question 23

Par la loi de conservation du flux, en supposant que la longueur de l'induit L_r est identique à celle de l'inducteur :

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

Soit la largeur de dent à l'alésage :

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

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

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

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

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

On déduit alors :

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

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

Question 24

Voir le document réponse N°4.

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

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

Question 25

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

Question 26

Soit la section des dents :

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

La masse des dents s'en déduit :

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

On exprime alors les pertes majorées dans les dents de la manière suivante :

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

Soit la section de la couronne :

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

La masse de la couronne s'en déduit :

$$m_c = \rho_s \cdot S_c \cdot L_r = 7\,800 \times 0,8445 \times 0,3 = 1976 \text{ kg}.$$

On exprime alors les pertes majorées dans la couronne de la manière suivante :

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

Question 27

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

$$P_{Ft} = 1146^2 \cdot [P_{Fd} + P_{Fc}] = 1313 \times (3,278 + 10,72) = 18,38 \text{ kW} \{18,15 \text{ kW}\}.$$

Question 28

Les pertes Joule peuvent être déterminées de trois manières différentes.

Après avoir calculé la résistance des enroulements d'induit et l'intensité nominale du courant d'induit (Question 19), les pertes Joule dans les trois phases de l'induit sont exprimées par :

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

Une autre possibilité consiste à exprimer directement les pertes Joule à partir des puissances nominales énoncées, sans utiliser l'intensité nominale du courant d'induit :

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

Enfin, sans connaître l'intensité nominale du courant d'induit ni la résistance des enroulements d'induit mais directement à partir de la mesure de résistance entre deux bornes sans connaître le couplage, telle qu'énoncée, on trouve :

$$P_{ji} = \frac{3}{2} R_c \cdot I_n^2 = \frac{R_c}{2} \cdot \frac{S_n^2}{U_n^2} = \frac{64}{2} \times \frac{12^2}{6,6^2} \cdot 10^3 = 105,8 \text{ kW}.$$

Question 29

En définissant η_e , le rendement nominal de l'alternateur, le rendement du groupe réducteur-alternateur-transformateur est exprimé par :

$$\eta_n = \eta_r \cdot \eta_e \cdot \eta_{ts}.$$

La puissance électrique nominale de l'alternateur étant connue, la puissance P_a qu'il absorbe est obtenue en y additionnant, outre les trois pertes calculées plus haut (Questions 21, 27 et 28), les pertes mécaniques, des pertes non évaluées à l'induit et à l'inducteur ainsi que les pertes résiduelles :

$$P_a = P_n + \sum \text{pertes} = P_n + [P_{jf} + P_{Ft} + P_{ji}] + [P_{fp} + P_{fg} + P_v] + [P_{Fi} + P_{Ti} + P_{Pf} + P_{ex}] + P_r.$$

L'expression du rendement du groupe, au point nominal, est donc :

$$\eta_n = \eta_r \cdot \frac{P_n}{P_n + [P_{jf} + P_{Ft} + P_{ji}] + [P_{fp} + P_{fg} + P_v] + [P_{Fi} + P_{Ti} + P_{Pf} + P_{ex}] + P_r} \cdot \eta_{ts}.$$

L'application numérique permet d'obtenir :

$$\eta_n = 0,989 \times \frac{11 \cdot 10^6}{11 \cdot 10^6 + 226,28 \cdot 10^3 + 73,36 \cdot 10^3 + 15,34 \cdot 10^3} \times 0,993$$

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

Question 30

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

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

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

Le rendement intégrant les auxiliaires est alors :

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

Question 31

Sur sa durée de vie, le coût de la centrale est :

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

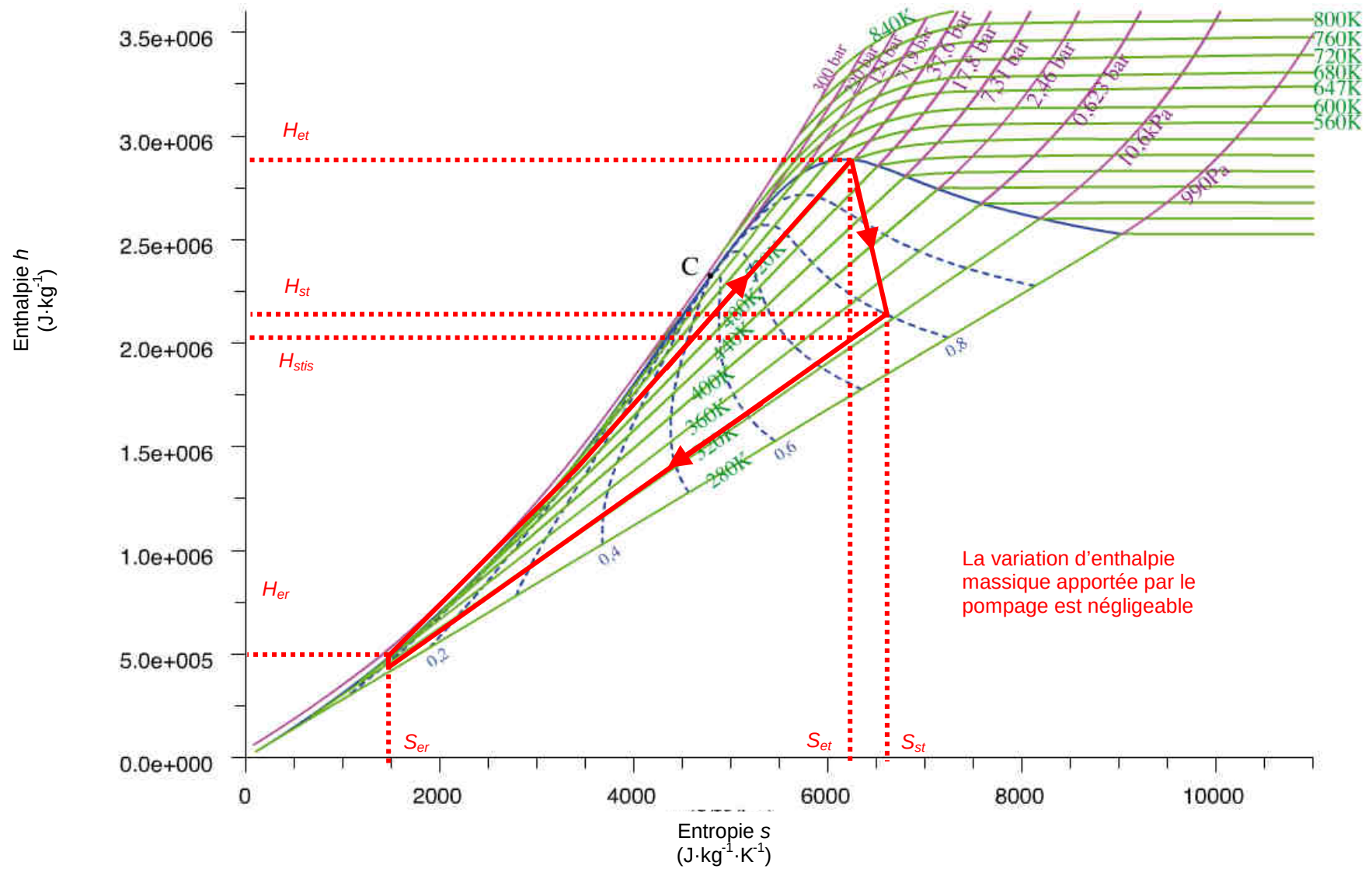
L'énergie produite sur la durée de vie est :

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

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

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

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



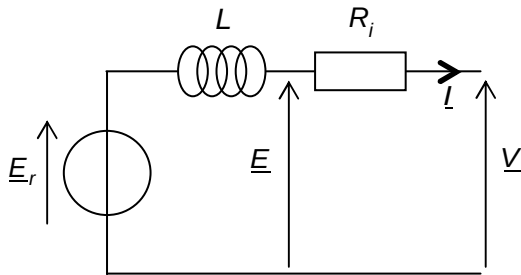


Schéma électrique du modèle de Behn-Eschenburg

Significations des paramètres du modèle de Behn-Eschenburg

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

L représente l'inductance cyclique.

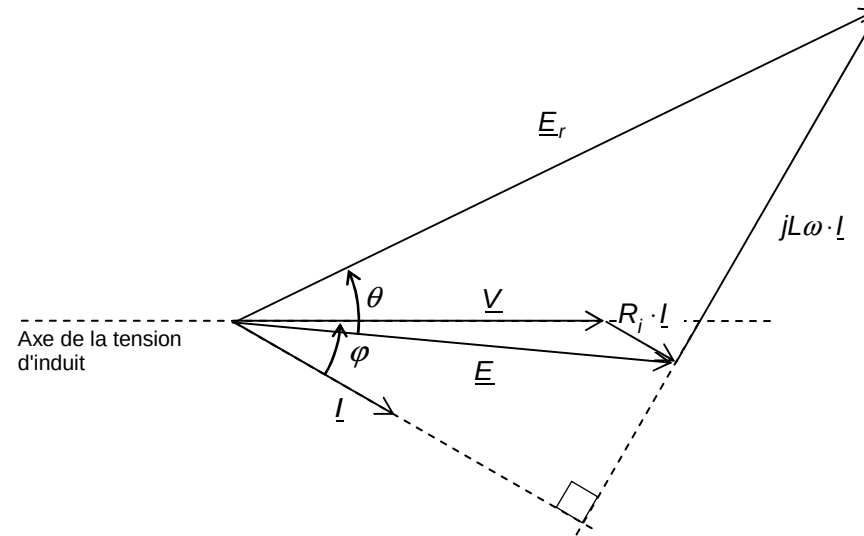
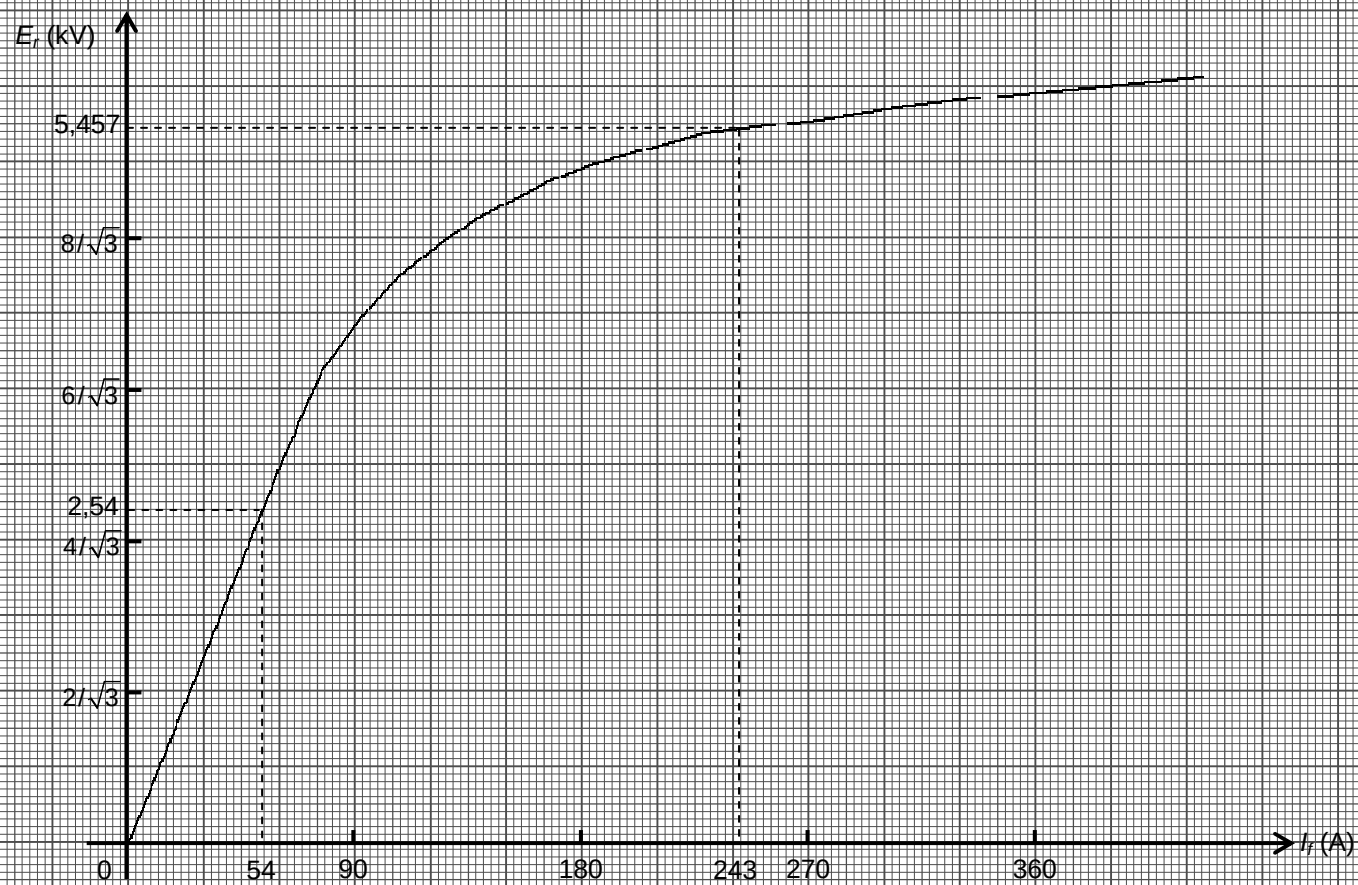
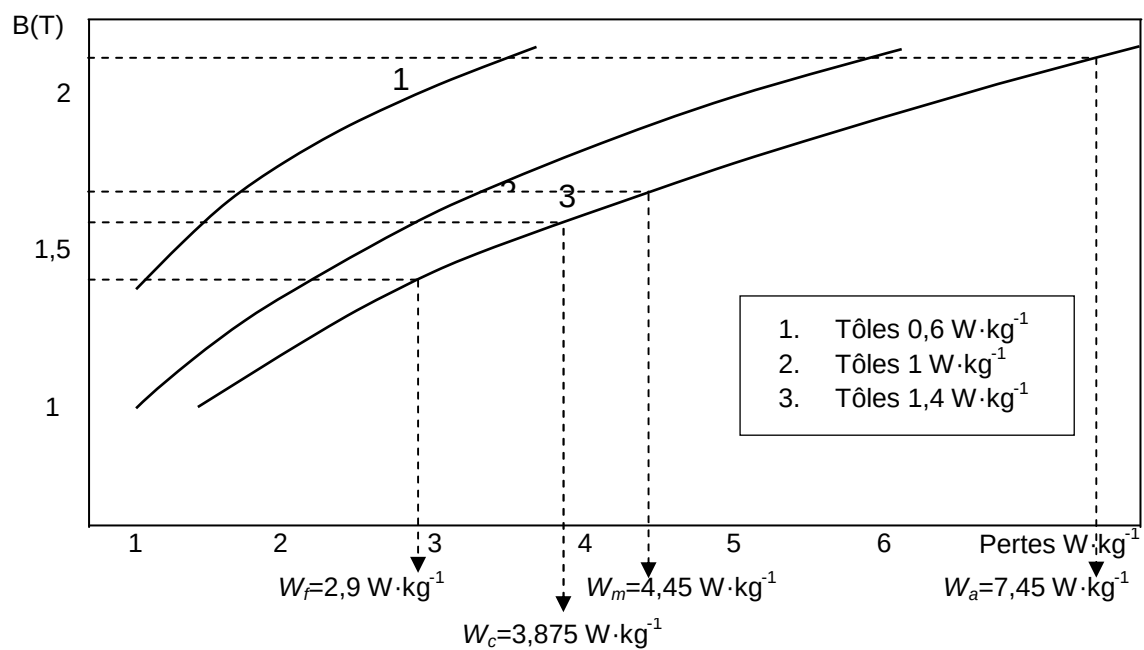


Diagramme de Fresnel

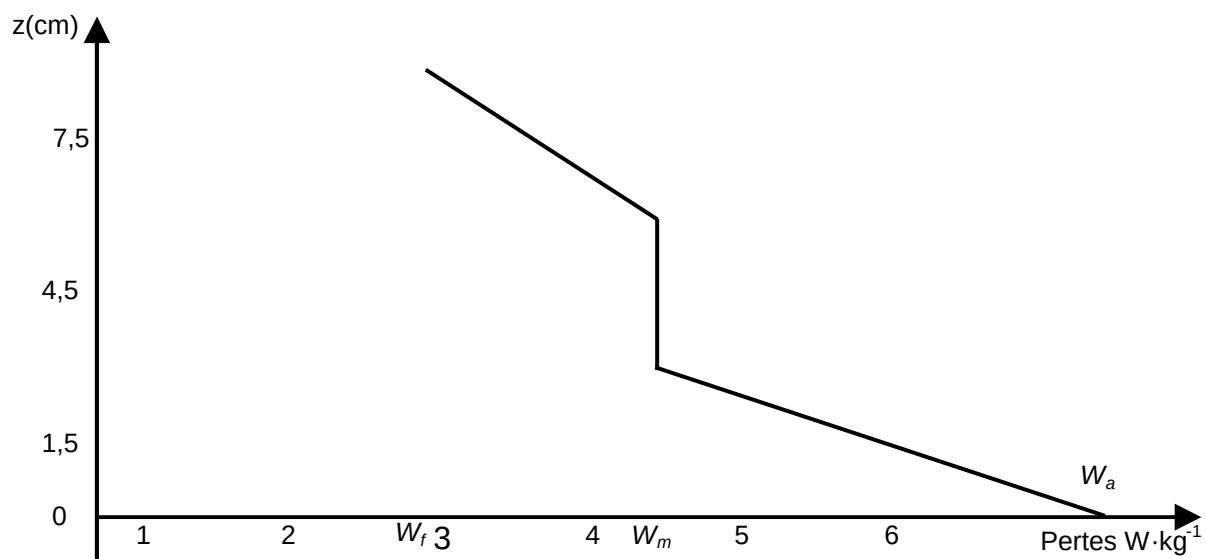
Document Réponse N°3 : « Paramètres de Behn-Eschenburg »



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

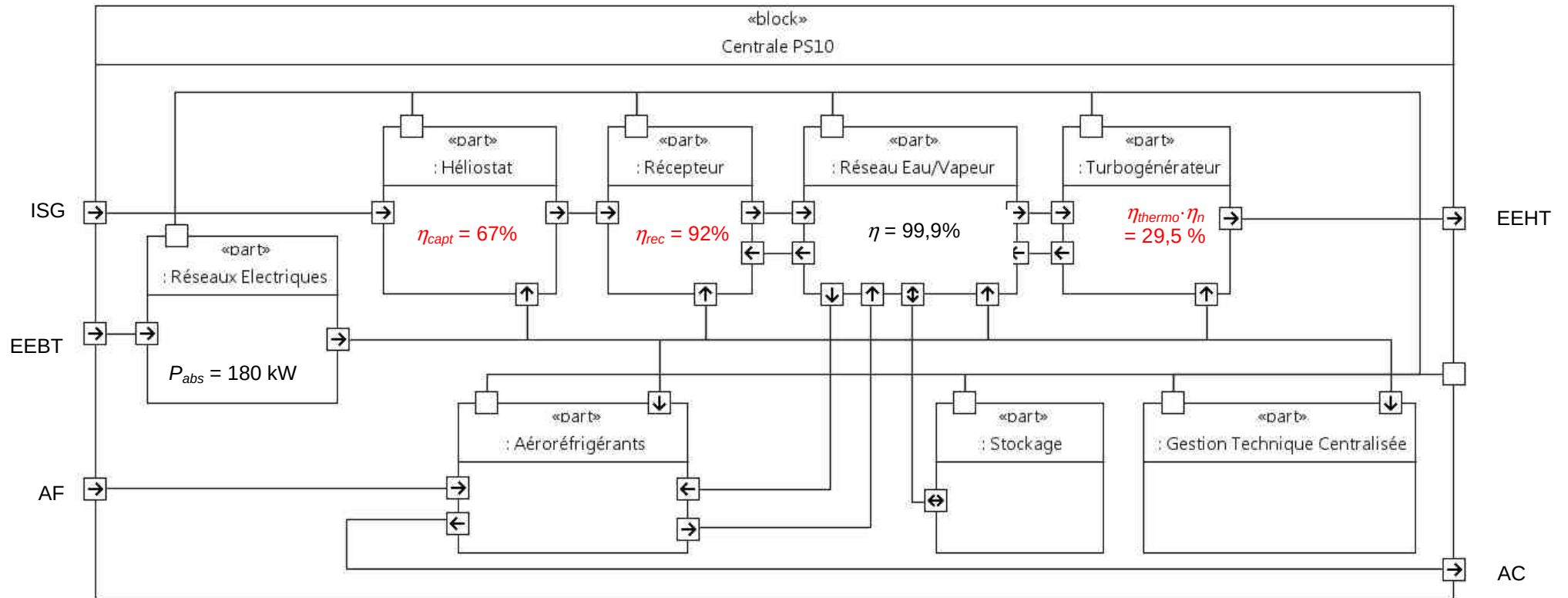


I- Estimation des pertes massiques



II- Profil des pertes massiques dans une dent

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



Légende :

EEBT : Énergie Électrique BT

ISG : Irradiance Solaire Globale portée par la direction du soleil $W \cdot m^{-2}$

AF : Air Froid

AC : Air Chaud

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

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

1. Présentation du sujet

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

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

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

La partie 2 permet d'évaluer l'impact des héliostats sur le rendement du champ de captation et le facteur de concentration, paramètre déterminant pour les performances du récepteur. La partie 3 s'intéresse au rendement du récepteur et à l'irradiance minimale permettant d'initier la production d'énergie. La partie 4 vise à déterminer le rendement du cycle thermodynamique. La partie 5 concerne différentes pertes dans l'alternateur et évalue son rendement. La partie 6 est une synthèse des résultats et permet de conclure sur la rentabilité économique de la centrale.

2. Analyse globale des résultats

L'évaluation des copies montre une très forte hétérogénéité. Un petit nombre de candidats bien préparés traitent correctement les deux tiers du sujet mais, pour un bon nombre de candidats visiblement non préparés, les fondamentaux ne sont pas acquis. Or il est nécessaire d'avoir une vision claire de l'ensemble de la problématique abordée pour satisfaire au questionnement avec cohérence dans chacun de ses aspects transversaux.

En effet, bien que de nombreux candidats aient abordé les questions de mécanique et de thermique, peu sont parvenus à obtenir des résultats corrects, surtout en mécanique. Plus des trois quarts des

candidats n'ont pas traité les questions de thermodynamiques. Sur l'ensemble du sujet, c'est la partie abordant la modélisation des pertes de l'alternateur qui a été traitée avec le plus de succès. Toutefois, faute de maîtriser le calcul algébrique, des candidats échouent dès les premiers développements des calculs utilisant les nombres complexes.

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

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie 2 – Modélisation de la captation du rayonnement solaire

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

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

Le schéma cinématique de la question 2 est présenté avec quelque succès par une moitié des candidats. Le jury s'attendait à une plus grande proportion de réponses correctes en spécialité IE pour cette question. Le calcul des paramètres de position de l'héliostat (question 3) débouche très rarement. La majorité des candidats IE (et IC) n'aborde pas cette question, moins d'un sur dix obtient des résultats partiels. La plupart des candidats se contentent de projeter les vecteurs, sans parvenir à exprimer une condition géométrique de pointage, ou alors de façon très approximative.

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

Les questions 6 à 9 s'intéressent à un problème de résistance des matériaux. Par symétrie, il se résume à une poutre encastrée soumise à un chargement uniforme. Une dizaine de candidats parviennent à exprimer le moment fléchissant et aucun la flèche. Deux savent mettre en évidence les lois de similitude pour une section IPN homothétique et un seul trouve le moment quadratique de la section du treillis.

La question 10, relative au facteur de concentration, est abordée par un tiers des candidats et une dizaine d'entre eux ont obtenu des résultats probants.

Partie 3 – Modélisation thermique du récepteur

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

L'interprétation critique de l'hypothèse consistant à négliger les pertes en face arrière est souvent faite qualitativement. Il était attendu une analyse quantitative des ordres de grandeurs des coefficients données en annexe un tiers des candidats adoptent cette démarche scientifique.

L'analyse du modèle acausal du récepteur est abordée par un candidat sur cinq. L'application

numérique du rendement par contre est très souvent traitée correctement. Le calcul de l'irradiance minimale est peu abordé et plus rarement réussi.

Une coquille s'est glissée dans le sujet : un exposant a disparu dans la valeur numérique de E ($E = 50 \cdot 106 \text{ W}$ et il fallait lire $E = 50 \cdot 10^6 \text{ W}$). Les applications numériques réalisées avec la valeur 50106 W ont été comptées justes pour ne pas pénaliser les candidats.

Partie 4 – Modélisation du cycle thermodynamique

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

Le rendement de Carnot n'est connu que par un candidat sur douze et, parmi eux, moins de la moitié seulement réalisent l'application numérique en Kelvin.

Le tracé du cycle de Rankine et son exploitation sont abordés dans la même proportion que le cycle de Carnot, avec un taux de réussite voisin. L'analyse critique des deux approches est abordée par un candidat sur dix et traitée avec succès par un pour cent.

Partie 5 – Modélisation de l'alternateur

Cette partie vise à évaluer le rendement de l'alternateur en déterminant quelques pertes électriques et ferromagnétiques. Elle exploite un modèle élémentaire de cette machine. À de rares exceptions près, tous les candidats ont traité cette partie.

Les hypothèses permettant d'exploiter un modèle équivalent monophasé sont connues de manière incomplète ou imprécise. L'identification des tensions sur le schéma électrique et le diagramme de Fresnel sont assez bien traités mais les dénominations de R_i et L sont souvent vagues, indiquant un faible degré de compréhension du modèle.

Les calculs du courant nominal et du facteur de puissance (question 19) et de la réactance synchrone (question 20) sont de loin les questions les mieux réussies, traitées avec succès par les 2/3 des candidats pour l'une et la moitié des candidats pour l'autre.

Un tiers des candidats n'aborde pas la question 21, traitant des pertes Joule dans l'inducteur, et un autre tiers n'obtient aucun résultat correct faute de savoir calculer avec des nombres complexes. La question 22 de connaissance générale sur l'origine des pertes ferromagnétiques est traitée avec certains succès par près des deux tiers des candidats.

Les questions 23-27 conduisent pas à pas à déterminer les pertes ferromagnétiques. De 50% à 80% des candidats ne les abordent pas et 20% n'obtiennent aucun résultat. Les principales difficultés rencontrées ont trait aux calculs géométriques élémentaires, à l'application de la loi de conservation du flux et au calcul d'une moyenne pondérée. Moins d'un candidat sur dix répond correctement à la question 25 relative à la condition d'application du théorème de superposition.

La question 28, à propos des pertes Joule dans l'induit, est bien traitée à l'image du calcul du courant nominal en question 19.

Une moitié des candidats ne traite pas le calcul du rendement en question 29 et un quart échoue. Le rendement est parfois écrit en convention de récepteur et non en convention générateur et on rencontre trop souvent des sommes ou des moyennes de rendements.

Partie 6 – Rentabilité de la centrale PS10

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

Le document réponse question 30 qui sert de support au bilan est souvent complété correctement mais les applications et raisonnements permettant d'obtenir le rendement global de la production sont

souvent faux.

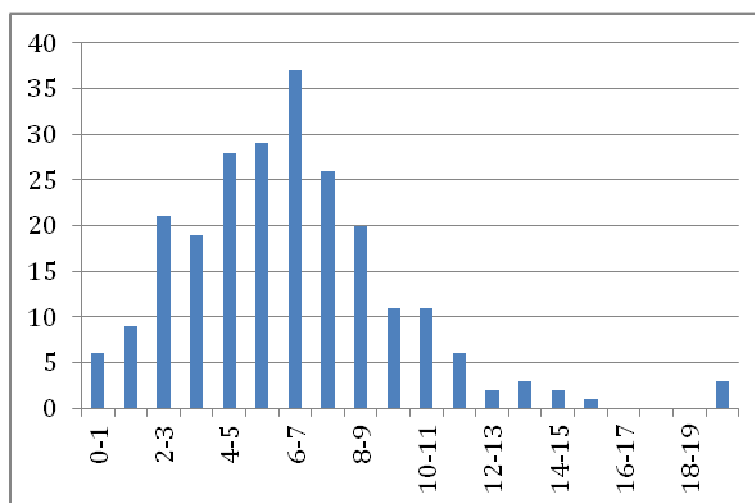
Le calcul de rentabilité de la centrale est très largement abordé et beaucoup de candidats aboutissent à une évaluation économique cohérente. Cependant une conclusion critique sur les résultats numériques obtenus était aussi attendue.

4. Conclusion

Les différentes parties de ce sujet abordent bon nombre des compétences fondamentales nécessaires pour enseigner aujourd'hui dans les filières technologiques ou scientifique, que ce soit en STI2D en SSI ou en classes préparatoires : savoir interpréter un diagramme SysML, représenter un schéma cinématique, mettre en œuvre un calcul vectoriel ou par les complexes, écrire un programme simple, savoir modéliser de manière élémentaire le fonctionnement d'une machine électrique, utiliser des rendements dans une chaîne de transmission de puissance ou encore calculer la déformation d'une poutre dans le cadre de sollicitations simples, exploiter des modélisations multi-physiques, ou encore prendre en compte une contrainte économique telle que le retour sur investissement.

Le jury invite les candidats à s'assurer qu'outre les savoirs scientifiques basiques, ils maîtrisent aussi ces fondamentaux. Le jury rappelle en outre aux candidats qu'il n'est pas pertinent de restreindre le traitement du sujet aux seules parties correspondant à leurs zones de confort. Non seulement, il est nécessaire, pour le moins, qu'ils abordent toutes les parties du sujet mais il convient aussi, dans le cadre de leur préparation, qu'ils s'investissent réellement dans tous les champs disciplinaires des sciences de l'ingénieur.

5. Résultats



234 copies ont été évaluées. La moyenne des notes obtenues est de 6,32 / 20. L'écart-type est 3,33. La meilleure note est 20/20. La plus faible est 0,25/20.

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

Question 1

Différents types d'informations circulent dans le cas où l'opérateur se trouve en salle de désamérisation :

- identifiant de l'opérateur (RFID, USB et Wifi pour requête au serveur) puis ses droits (retour du serveur en Wifi),
- identifiant de fût (RFID, USB et Wifi pour requête au serveur) puis sa masse, sa position et la date d'entrée en désamérisation (retour du serveur en Wifi),
- informations de désamérisation (ex : concentration, quantité d'eau) (Wifi)
- informations climatiques (Zigbee)

Question 2

Voir document réponse.

Question 3

Voir document réponse.

Question 4

Les observations sur les différentes documentations nous donnent les informations regroupées dans le tableau ci-dessous :

Standard	RFID IEEE 802.15.4	Zigbee IEEE 802.15.4	Wi-Fi IEEE 802.11.n
Porteuse	13,6 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz, 5 GHz
Débit	106 à 424 kbits/s ou 26 kbits/s	250 kbits/s	11 à 300 Mbits/s
Portée	0 à 6 cm	40 à 120 m	10 à 100 m

La fréquence porteuse du RFID n'étant pas sur la même que les autres réseaux, il est peu probable que les informations Zigbee et Wifi viennent perturber la transmission RFID.

Question 5

Types de modulation :

	Type de modulation	Explication
MIFARE Classic (NXP)	ASK 100%	L'amplitude de la porteuse semble s'annuler par moment.
RF-HDT-DVB	ASK 10%	L'amplitude de la porteuse est réduite d'environ 10%. En effet : $\frac{a-b}{a+b} = \frac{19-15}{19+15} = 0,118 \approx 12\%$ Le signal modulant est un signal numérique.

Question 6

Ce choix de modulation peut être justifié par les éléments suivants :

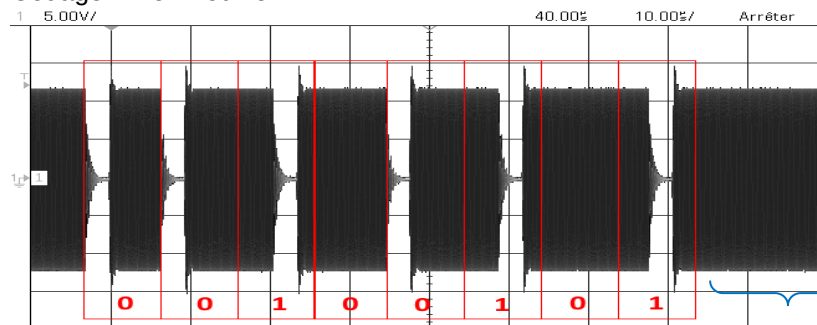
Le transpondeur doit être télé-alimenté. La modulation ASK est plus adaptée à la télé-alimentation, d'autant plus qu'il n'y a pas un vrai problème de bruit, le niveau du signal étant important.

La porteuse sert d'horloge au transpondeur. Il n'est pas souhaitable de la moduler en fréquence.

Au niveau du transpondeur, les circuits de détection sont beaucoup plus simples à réaliser et consomment moins pour une modulation d'amplitude que pour une modulation de phase (pas besoin de PLL, synchronisation, etc.)

Question 7

Codage Miller modifié :



La salve de bits extraite de cette capture est donc : 0 0 1 0 0 1 0 1

Le premier '0' correspond au bit de start.

Le tout est suivi du symbole de fin de communication (E).

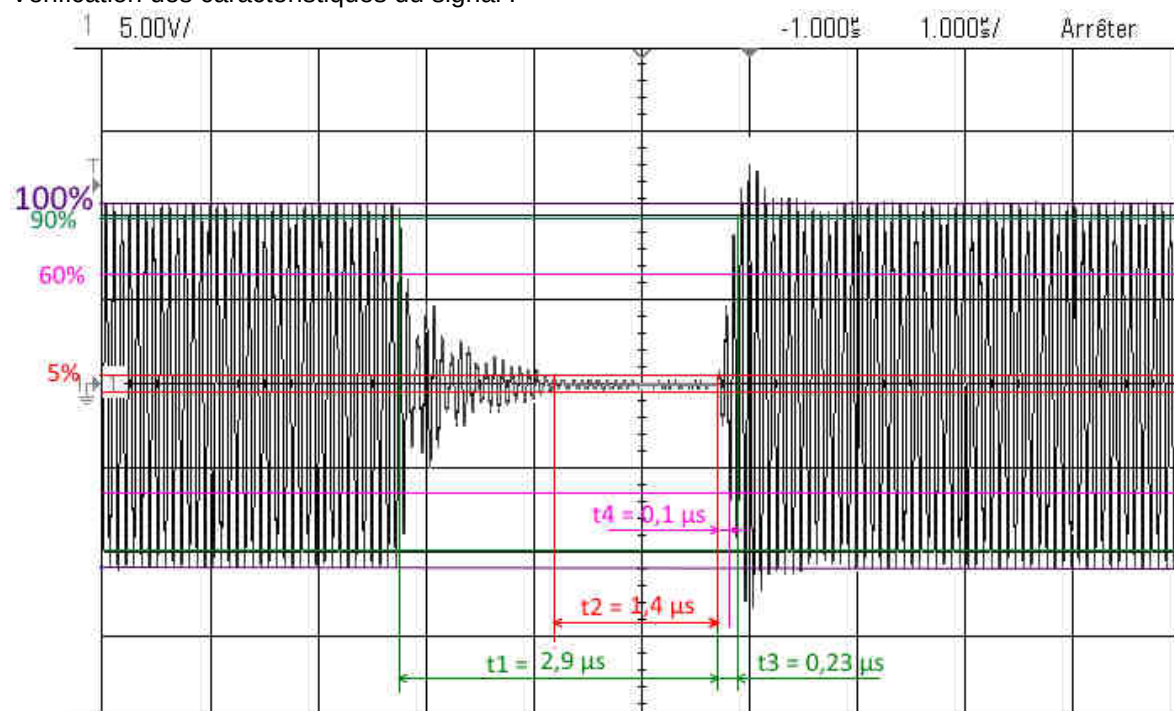
La code transmis est le code binaire : 0b1010010 soit en hexadécimal : 0x52 ce qui correspond à la commande « WUPA ». Cette commande est envoyée par le lecteur sans contact pour sonder le champ proche à la recherche de cartes de type ISO 14443 type A.

Question 8

L'avantage de ce type de codage modifié est de conserver suffisamment de porteuse pour permettre l'alimentation du badge.

Question 9

Vérification des caractéristiques du signal :

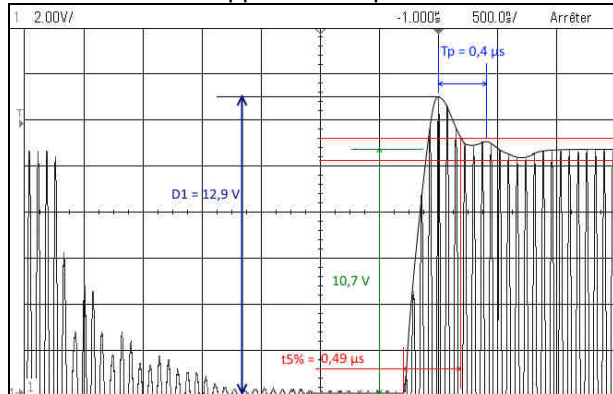


On relève : $t_1 = 2,9 \mu s < 3 \mu s$; $0,5 \mu s < t_2 = 1,4 \mu s < t_1$, $t_3 = 0,23 \mu s < 1,5 \mu s$ et $t_4 = 0,1 \mu s < 0,4 \mu s$
 Les valeurs sont validées par rapport au tableau donné dans la norme IOS/IEC 14443 mais restent, toutefois, voisines des limites spécifiées dans la documentation. Le facteur Q de l'antenne semble un peu faible au détriment de la portée du lecteur RFID.

Le relevé ayant été fait avec l'aide d'une antenne de mesure, cette dernière peut influencer sur le résultat. Toutefois, l'antenne de mesure ayant une influence limitée sur la forme de la réponse à l'échelon, la méthode pourra suffire pour valider la conception de l'antenne du lecteur couplée à son étage de sortie.

Question 10

L'allure de l'enveloppe dans la phase de montée est représentée sur la figure ci-dessous :



L'allure de cette enveloppe peut être approximée par la réponse indicielle d'un système du deuxième ordre dont le coefficient d'amortissement serait inférieur à 1.

Question 11

L'expression de la fonction de transfert est :

$$H(p) = \frac{S(p)}{E(p)} = \frac{K}{1 + \frac{2m}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

dans laquelle K est le gain statique, m le coefficient d'amortissement (sans unité) et ω_0 la pulsation propre du système en rad/s.

Question 12

Les relevés permettent d'obtenir les résultats suivant :

$$D_{1\%} \cong \frac{12,9 - 10,7}{10,7} = 21\%$$

$$D_{1\%} = 0,2056 = e^{-\frac{m \cdot \pi}{\sqrt{1-m^2}}}$$

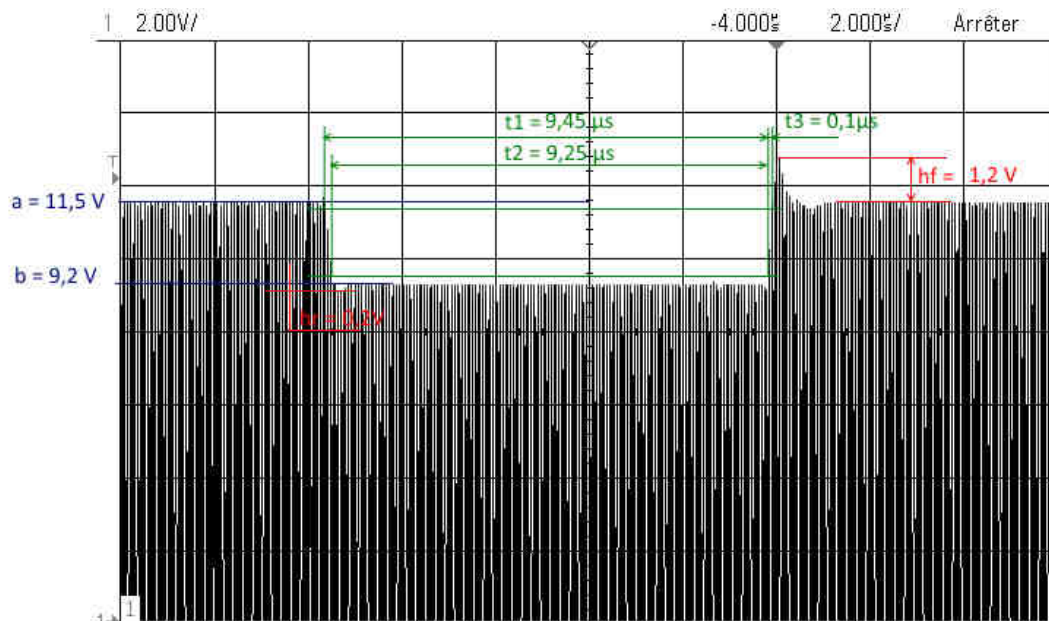
$$\text{d'où : } m = \sqrt{\frac{\ln(0,2056)^2}{\pi^2 + \ln(0,2056)^2}} \cong 0,44$$

$$T_p \cong 0,4 \mu s$$

temps de réponse à 5% = 0,49 μs

Question 13

Le relevé suivant permet d'extraire les caractéristiques de la transmission qui doivent être conformes au standard ISO/IEC 15693 :



On obtient :

- la durée $t_1 = 9,45 \mu s$ qui correspond à la valeur attendue aux erreurs de mesures près
- la durée $t_2 = 9,25 \mu s < t_1$ et $t_3 = 0,1 \mu s < 4,5 \mu s$
- la durée $h_r = 0,2 V < 0,1 \times (a - b) = 0,23 \Rightarrow$ respecté
- la durée $h_f = 1,2 > 0,1 \times (a - b) = 0,23 \Rightarrow$ non respecté
- l'indice de modulation $m = \frac{a - b}{a + b} = \frac{11,5 - 9,2}{11,5 + 9,2} = 11,1 \%$

On a donc bien la relation d'ordre suivante : $10 \% < \text{Indice} = 11,1 \% < 30 \%$

Compte tenu de l'indice de modulation, la requête pourra être interprétée correctement par l'étiquette ou transpondeur. Toutefois, certaines valeurs dépassent les limites.

On en déduit le débit binaire de cette transmission sachant que, d'après l'annexe :

- deux bits sont transportés par symbole,
- le niveau bas du symbole ne représente que $1/8^{\text{ème}}$ de la paire de bits.

On détermine la durée d'un bit : $T_b = \frac{9,44 \cdot 10^{-6} \times 8}{2}$

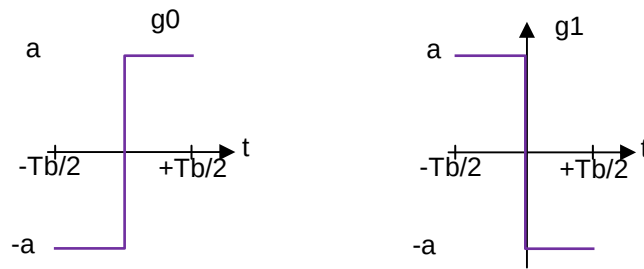
Il vient alors le débit en requête : $D_{req} = \frac{1}{9,44 \cdot 10^{-6} \times 4} = 26,5 \text{ kbps}$

Question 14

La capture de la figure 12 du sujet montre en deuxième partie de chronogramme (réponse en provenance de la carte) une variation de l'amplitude de la porteuse. Cette dernière semble augmentée cycliquement suivant deux modulants de fréquences différentes comme si une charge résistive était successivement ajoutée puis enlevée de façon à faire varier la consommation énergétique dans l'antenne de la carte puis dans celle du lecteur. Cette solution permet d'éviter toute utilisation d'un système de modulation complexe et consommatrice d'énergie dans une carte alimentée par la seule porteuse.

Question 15

On peut supposer que les 2 symboles élémentaires qui composent le signal encodé sont :



Question 16

Les transformées de Fourier G_0 et G_1 de ces 2 signaux donnent alors :

$$G_0(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_0(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \text{ et } G_1(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

$$\text{Or } g_0(t) = -g_1(t) \text{ d'où : } G_0(f) = -G_1(f) = \int_{-\frac{Tb}{2}}^0 -a \cdot e^{-j2\pi ft} dt + \int_0^{\frac{Tb}{2}} a \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

$$\text{Soit } G_0(f) = -G_1(f) = a \cdot \left[\frac{e^{-j2\pi ft}}{j2\pi f} \right]_{-\frac{Tb}{2}}^0 - a \cdot \left[\frac{e^{-j2\pi ft}}{j2\pi f} \right]_0^{\frac{Tb}{2}}$$

$$\text{Soit } G_0(f) = -G_1(f) = a \cdot \frac{1 - e^{+j2\pi f \frac{Tb}{2}}}{j2\pi f} - a \cdot \frac{e^{-j2\pi f \frac{Tb}{2}} - 1}{j2\pi f}$$

$$\text{Soit } G_0(f) = -G_1(f) = \frac{a}{j2\pi f} \cdot \left(2 - e^{+j2\pi f \frac{Tb}{2}} - e^{-j2\pi f \frac{Tb}{2}} \right) = \frac{a}{j2\pi f} \cdot \left(e^{+j\pi f \frac{Tb}{2}} - e^{-j\pi f \frac{Tb}{2}} \right)^2$$

$$\text{Soit } G_0(f) = -G_1(f) = -\frac{\pi f \times a \cdot Tb}{j4\pi f} \cdot 4 \cdot j^2 \cdot \left(\frac{e^{+j\pi f \frac{Tb}{2}} - e^{-j\pi f \frac{Tb}{2}}}{2 \cdot j \times \pi f \frac{Tb}{2}} \right) \times \left(\frac{e^{+j\pi f \frac{Tb}{2}} - e^{-j\pi f \frac{Tb}{2}}}{2 \cdot j} \right)$$

$$\text{Soit : } G_0(f) = -G_1(f) = -j a \cdot Tb \cdot \text{sinc}\left(\pi f \frac{Tb}{2}\right) \cdot \sin\left(\pi f \frac{Tb}{2}\right) \text{ (CQFD)}$$

Question 17

Si les 2 symboles sont équiprobables, centrés et non corrélés, alors on a :

$$\sigma_a^2 = 1 \text{ et } m_a = 0$$

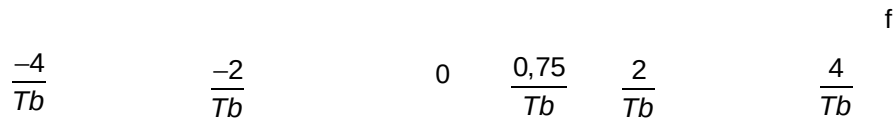
On obtient donc la densité spectrale de puissance suivante :

$$\|M(f)\|^2 = \frac{|G(f)|^2}{Tb}$$

$$\text{et il s'en déduit : } \|M(f)\|^2 = a^2 \cdot Tb \cdot \left(\text{sinc}\left(\pi \cdot f \cdot \frac{Tb}{2}\right) \right)^2 \cdot \left(\sin\left(\pi \cdot f \cdot \frac{Tb}{2}\right) \right)^2$$

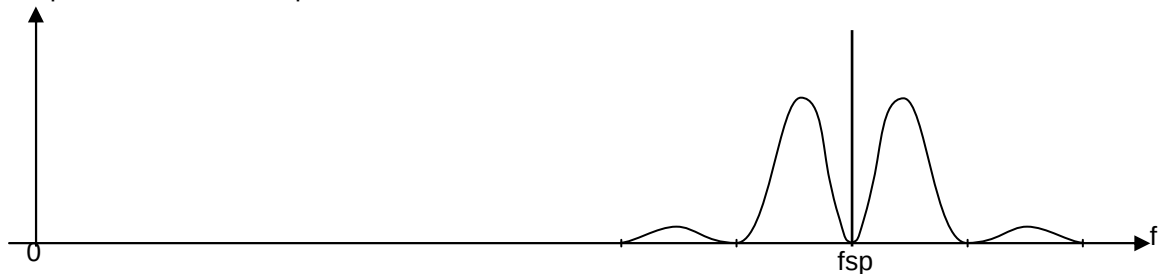
Question 18

L'allure de $\|M(f)\|^2$ est illustrée ci-dessous.



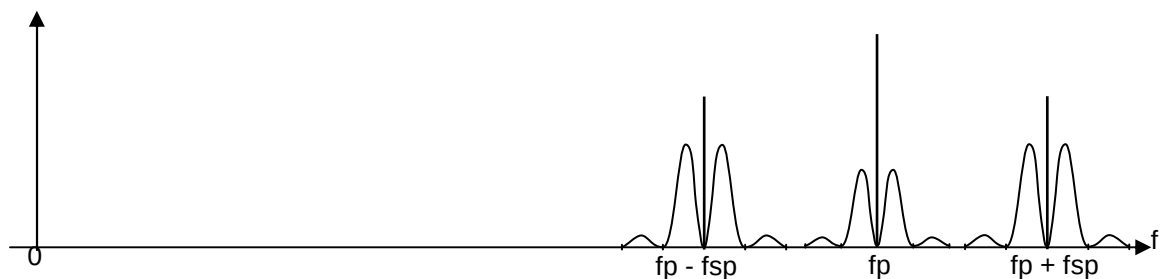
Question 19

La sous-porteuse OOK est représentée ci-dessous.



Question 20

La figure ci-dessous représente l'allure de la porteuse modulée.



Question 21

Sur la capture ci-contre, on relève les valeurs suivantes :

- la fréquence porteuse : $f_p \approx 13,556 \text{ MHz}$

- la fréquence de la sous-porteuse :

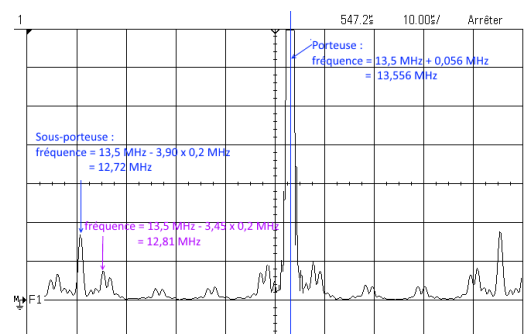
$f_{ps} \approx 13,556 \cdot 10^6 - 12,72 \cdot 10^6 \approx 836 \text{ kHz}$ (norme $\Rightarrow 847 \text{ kHz}$)

- la fréquence pour laquelle la densité spectrale de puissance du code Manchester est maximale :

$$\frac{0,75}{T_b} \approx 12,81 \cdot 10^6 - 12,72 \cdot 10^6 = 90 \text{ kHz}$$

On retrouve bien, sur cette capture, le spectre déduit de l'étude de la figure 13. On en déduit le débit en réponse :

$$D_{rep} \approx \frac{90000}{0,75} \approx 120 \text{ kbps} \quad (106 \text{ kbps d'après la documentation})$$



Question 22

Les observations aux relevés 15.a et 15.b sont les suivantes :



- le rapport signal sur bruit des étiquettes (TAG) est plus faible que dans le cas du badge ;
- un certain nombre de raies supplémentaires se sont superposées à la bande de fréquence contenant l'information. Selon la bande de fréquence utilisée pour la démodulation, ces raies vont perturber l'interprétation de la réponse par le lecteur RFID. On peut parler d'interférences ;
- il s'agit également de la superposition des réponses en provenance de TAGs multiples situés à portée du lecteur. (Tiroir sous la table de travail) On constate, en effet, un lien avec la fréquence de la sous porteuse. Cette capture met en évidence des collisions non gérées par le lecteur.

Question 23

L'anticollision dans le cas du standard ISO/IEC 14443 utilise l'UID qui est un numéro unique pour la carte et qui dépend du constructeur comme dans le cas de l'adresse MAC.

Suite à la requête anticollision L1, toutes les cartes présentes dans le champ du lecteur retournent leur UID. Si plusieurs cartes répondent il, y a au moins un bit erroné comme dans l'exemple 0001 0C01 01C1 ... avec la lettre C signifiant *collision*. Pour le bit erroné, le lecteur apporte une correction (exemple : mettre un 1 à la place du C puisque nécessairement les 2 types d'UID existent) et retourne l'UID corrigé avec une requête de sélection.

Suite à une nouvelle requête d'anticollision avec l'UID partiel corrigé, toutes les cartes présentes dans le champ, et dont la première partie de l'UID correspond, retournent le reste de leur UID. L'opération est répétée jusqu'à ce qu'une seule carte réponde et soit activée. Pendant la suite de l'échange, une seule carte sera active dans le champ puisque le mécanisme est basé sur l'UID qui est un numéro unique.

Question 24

Un algorithme déterministe est un algorithme qui produit toujours le même résultat dans des conditions identiques. Ainsi, si ce sont toujours les mêmes badges qui se trouvent dans le champ du lecteur, le badge sélectionné est toujours le même.

Par ailleurs, si l'on observe l'algorithme de l'annexe 3, on constate que le nombre de requêtes d'anticollision est fixé par rapport à la taille des UID qui, elle, peut être anticipée. L'influence du nombre de cartes dans le champ est dès lors très faible. Il est donc possible de borner la valeur du temps nécessaire pour activer la carte avant de communiquer. Cette propriété correspond à celle d'un algorithme déterministe.

Il est donc possible d'utiliser ces solutions dans les systèmes temps-réel puisque le résultat est garanti.

Question 25

L'analyse de la documentation montre que toutes les étiquettes et tous les TAG disposent d'un mécanisme d'anticollision. La seule suspicion est sur le transpondeur de référence RF-HDT-DVBB qui

emploie le terme « Simultaneous identification of tags » avec pour valeur « Up to 50 tags ». Toutefois, la documentation précise que le tag respecte le standard « ISO/IEC 15693-3 » qui correspond à l'anticollision. En creusant un peu, on constate que le lecteur et le composant CLR632 qui l'équipe gèrent l'anticollision du standard ISO/IEC 14443 mais ne semblent pas gérer l'anticollision du standard ISO/IEC 15693. Ceci n'est toutefois pas gênant dans une utilisation normale de l'application (lecture de l'identifiant d'un seul fût à la fois). Une protection contre les interférences peut, par contre, être nécessaire.

Question 26

Les champs électromagnétiques dans une petite boucle sont exprimés par les relations suivantes dans lesquelles I_m est le courant fictif magnétique uniforme et l' est la longueur équivalente :

– pour le champ électrique E

$$\begin{aligned} E_r &= 0 \\ E_\theta &= 0 \\ E_\phi &= \left[\frac{I_m \cdot l' \cdot \sin \theta}{4\pi} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^2} + \frac{\beta}{jr} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r} \end{aligned}$$

– pour le champ magnétique H

$$\begin{aligned} H_r &= - \left[\frac{I_m \cdot l' \cdot \cos \theta}{2\pi\mu_0\omega} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{\beta}{(jr)^2} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r} \\ H_\theta &= - \left[\frac{I_m \cdot l' \cdot \sin \theta}{4\pi\mu_0\omega} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{\beta}{(jr)^2} + \frac{\beta^2}{jr} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r} \\ H_\phi &= 0 \end{aligned}$$

En effet, d'après le principe de dualité des équations de Maxwell : si les sources de deux systèmes sont duales, alors $\vec{M}_2 \rightleftharpoons \vec{J}_1$, $\vec{M}_2$ étant la densité d'une source fictive de courant magnétique et $\vec{J}_1$ étant la densité d'une source de courant électrique.

De plus, si les conditions aux limites sont duales, $\mu_2 \rightleftharpoons \varepsilon_1$; $\varepsilon_2 \rightleftharpoons \mu_1$, alors les champs du système 2 peuvent être trouvés à partir de la solution du système 1 par la substitution :

$$\vec{E}_2 \rightleftharpoons -\vec{H}_1 \text{ et } \vec{H}_2 \rightleftharpoons \vec{E}_1$$

Or, pour un dipôle électrique idéal, nous avons :

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= E_{1\theta} \cdot \vec{\theta} + E_{1r} \cdot \vec{r} \\ \vec{H}_1 &= H_{1\phi} \cdot \vec{\Phi} \end{aligned}$$

Les relations duales donnent :

$$\begin{aligned} \vec{H}_2 &= E_{1\theta} \cdot \vec{\theta} + E_{1r} \cdot \vec{r} \\ \vec{E}_2 &= -H_{1\phi} \cdot \vec{\Phi} \end{aligned}$$

On en déduit les composantes des champs électrique et magnétique :

$$\begin{aligned}
E_r &= 0 \\
E_\theta &= 0 \\
E_\varphi &= \left[\frac{I_m \cdot I' \cdot \sin \theta}{4\pi} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^2} + \frac{\beta}{jr} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_r &= - \left[\frac{I_m \cdot I' \cdot \cos \theta}{2\pi\mu_0\omega} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{\beta}{(jr)^2} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r} \\
H_\theta &= - \left[\frac{I_m \cdot I' \cdot \sin \theta}{4\pi\mu_0\omega} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{\beta}{(jr)^2} + \frac{\beta^2}{jr} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r}
\end{aligned}$$

$$H_\varphi = 0$$

Question 27

La documentation du lecteur RFID (annexe 1) spécifie qu'il fonctionne entre 0 et 6 cm (0 à 4 cm dans le tableau des données techniques de l'annexe 1) suivant les cartes, étiquettes ou TAG utilisés. Il n'est pas utile de faire fonctionner le système à des distances plus importantes car l'opérateur doit pouvoir être certain que le fût identifié est bien celui qu'il pointe.

Par ailleurs, la fréquence de la porteuse vaut 13,56 MHz, ce qui correspond à une longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300000000}{13560000} \approx 22 \text{ m.}$$

$$\text{Soit : } \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{22}{2\pi} = 3,52 \text{ m} \quad 0,06 \text{ m}$$

Question 28

Les champs électriques et magnétiques sont donnés par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
E_\varphi &= \left[\frac{I_m \cdot I' \cdot \sin \theta}{4\pi} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^2} + \frac{\beta}{jr} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r} \\
H_r &= - \left[\frac{I_m \cdot I' \cdot \cos \theta}{2\pi\mu_0\omega} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{\beta}{(jr)^2} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r} \\
H_\theta &= - \left[\frac{I_m \cdot I' \cdot \sin \theta}{4\pi\mu_0\omega} \cdot \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{\beta}{(jr)^2} + \frac{\beta^2}{jr} \right) \right] \cdot e^{-j\beta r}
\end{aligned}$$

avec :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \approx \frac{2\pi}{22} \approx 0,28 < 1$$

et donc :

$$\frac{1}{(jr)^2} \quad \frac{\beta}{jr}$$

par ailleurs $\beta r \ll 1$

donc : $e^{-j\beta r} \approx 1$

donc

$$E_{\varphi} = \left[\frac{I_m \cdot l' \cdot \sin \theta}{4\pi} \cdot \frac{1}{(jr)^2} \right]$$

$$H_r = - \left[\frac{I_m \cdot l' \cdot \cos \theta}{2\pi\mu_0\omega} \cdot \frac{1}{(jr)^3} \right]$$

$$H_{\theta} = - \left[\frac{I_m \cdot l' \cdot \sin \theta}{4\pi\mu_0\omega} \cdot \frac{1}{(jr)^3} \right]$$

On en déduit que, dans le cas d'une antenne boucle utilisée en champ proche, le champ magnétique est prédominant devant le champ électrique. Il ne se propage pas, l'énergie est emmagasinée, non pas rayonnée. Il peut être considéré comme quasi stationnaire. Enfin, il décroît très rapidement avec l'éloignement (puissance 3 de la distance r)

Question 29

Le calcul du champ à partir de la loi de Biot et Savart conduit à la relation :

$$H_x = \frac{I}{2} \frac{NR^2}{(d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Il ne fallait pas, ici, confondre B (induction magnétique) et H où $H = \frac{B}{\mu_0}$.

On a

$$\overline{r_z} = -\sin\theta \vec{z} ; \overline{dl_y} = -dl \vec{y} ; R = r \sin\theta$$

d'où

$$\sin\theta = \frac{R}{r} \text{ et } r = \sqrt{(d^2 + R^2)}$$

et

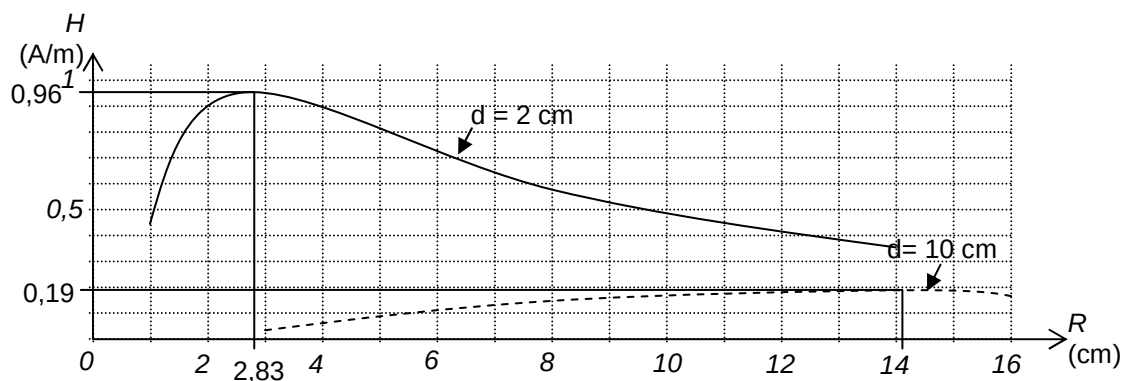
$$H_x = \frac{I}{4\pi} \oint_C \frac{dl \cdot \sin\theta}{r^2} = \frac{I}{4\pi} \oint_C \frac{dl \cdot R}{r^3} = \frac{I}{4\pi} \oint_C \frac{dl \cdot R}{(d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{I}{4\pi} \frac{2\pi R \cdot R}{(d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{I}{2} \frac{R^2}{(d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$$

On en déduit pour N spires :

$$H_x = \frac{I}{2} \frac{NR^2}{(d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Question 30

L'allure du champ est donnée ci-dessous :



Le maximum est obtenu pour $H'_x(R) = 0$.

$$\text{Soit : } H'_x(R) = \frac{I \cdot N}{2} \times \frac{2 \times R \times (d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{3}{2} \times R^2 \times 2 \times R \times (R^2 + d^2)^{\frac{1}{2}}}{(d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = 0.$$

$$\text{Soit : } 2R \times (d^2 + R^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{3}{2} \times R^2 \times 2R \times (R^2 + d^2)^{\frac{1}{2}} = 0 \text{ ou encore : } R^2 + d^2 - R^2 \times \frac{3}{2} = 0.$$

Soit : H_x maximum pour $R^2 = 2 \times d^2$ et $R = d \times \sqrt{2}$.

Pour $d = 2$ cm alors : $R_{\text{MAX}} = 2,83$ cm.

Pour $d = 10$ cm alors : $R_{\text{MAX}} = 14,14$ cm.

Question 31

Le nombre minimal de spires compte tenu des cartes et TAG à disposition est évalué sachant que le champ minimal, pour le standard ISO/IEC 14443, est de 1,5 A/m.

d	2 cm	10 cm
N	$\frac{1,5}{0,96} = 2$ spires de 2,83 cm	$\frac{1,5}{0,19} = 8$ spires de 14 cm de rayon

La documentation du TAG RF-HDT-DVBB précise, quant à elle, un champ typique pour activer le TAG de 115 dBμA/m. Si l'on convertit cette valeur en A/m, on obtient :

$$H_{\text{typ}} = 10^{\frac{115}{20}} \times 10^{-6} = 0,56 \text{ A/m}$$

Cette valeur est située en deçà de la valeur minimale requise pour les cartes MIFARE®. Le pire des cas en matière de champ requis est donc bien le respect du standard ISO/IEC 14443.

Toutefois, 8 spires d'un rayon de 14 cm (avec une bobine à air) pour atteindre une distance de fonctionnement semble peu envisageable.

Question 32

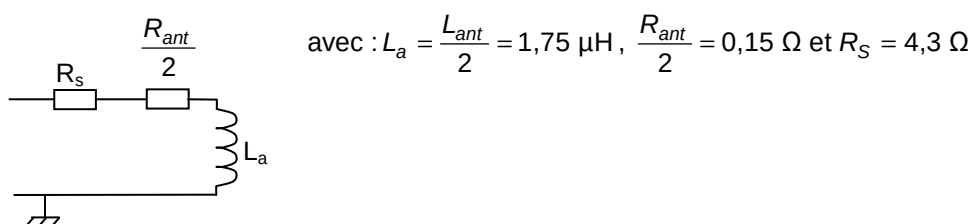
Si le métal est placé très près de l'antenne, le champ magnétique génère un courant de Foucault dans le métal. Ce courant absorbe de la puissance et mène à un désaccord de l'antenne par diminution de l'inductance équivalente et à une modification du facteur de qualité.

Sur la représentation du champ magnétique, on voit apparaître une diminution de l'amplitude du champ qui se traduit par une diminution de la portée.

La photo du lecteur montre, par ailleurs, que ce dernier comporte, dans la zone de champ, un certain nombre de composants et pièces métalliques susceptibles d'avoir un impact sur la portée de l'appareil en comparaison des données théoriques. Il n'a pas, non plus, d'écran magnétique qui lui permettrait de fonctionner correctement à proximité de tout le matériel que peut comporter le bureau (Tour PC, routeur Wifi etc.) Enfin, il faudra dérouler complètement le câble USB.

Question 33

Modèle électrique de la demi-antenne :



On rappelle que le facteur de qualité d'une antenne est défini comme le rapport entre l'énergie stockée et l'énergie perdue sur une période dans un circuit. Il représente les pertes hors désadaptation.

R_s permet, par ailleurs, d'ajuster le facteur de qualité en tenant compte de la limite de consommation du composant, on trouve donc :

$$Q = \frac{L_a \cdot \omega}{R_s + \frac{R_{ant}}{2}}$$

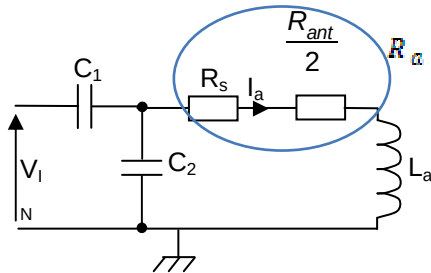
Application numérique :

$$Q \simeq \frac{1,75 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 13,56 \cdot 10^6}{4,3 + 0,15} = 32,5$$

En effet, la fréquence de fonctionnement du système RFID choisi est de 13,56 MHz et la résistance R_s vaut 4,3 Ω d'après l'annexe 1.

Question 34

Modèle électrique équivalent de l'ensemble demi-antenne set adaptation d'impédance :



L'expression de la fonction de transfert est :

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{jC_1\omega}{1 + j\omega \frac{R_a}{L_a} \times L_a (C_1 + C_2) + j^2\omega^2 \times L_a (C_1 + C_2)}$$

En effet,

$$\underline{V}_{C2} = \frac{\underline{V}_{IN} \cdot \frac{1}{jC_2\omega + \frac{1}{R_a + jL_a\omega}}}{\frac{1}{jC_1\omega} + \frac{1}{jC_2\omega + \frac{1}{R_a + jL_a\omega}}}$$

et

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{V}_{C2}}{R_a + jL_a\omega}$$

d'où

$$\frac{\underline{I}_a}{\underline{V}_{IN}} = \frac{1}{R_a + jL_a\omega} \times \frac{1}{\frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{jC_1\omega(R_a + jL_a\omega)} + 1} = \frac{jC_1\omega}{1 + j\omega \frac{R_a}{L_a} \times L_a (C_1 + C_2) + j^2\omega^2 \times L_a (C_1 + C_2)} = \underline{T}(j\omega)$$

Question 35

En posant la pulsation propre $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_a (C_1 + C_2)}}$ et le facteur de qualité $Q = \frac{L_a \omega_0}{R_a}$, on obtient :

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{C_1 Q \omega_0 \times j \frac{\omega}{Q \omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{Q \omega_0} + j^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = \frac{C_1 Q \omega_0}{j \frac{\omega}{Q \omega_0} + 1 + j \frac{Q \omega}{\omega_0}} = \frac{C_1 Q \omega_0}{1 + j \frac{Q \omega}{\omega_0} - j \frac{Q \omega_0}{\omega}} = \frac{K}{1 + j Q \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

avec

$$K = C_1 Q \omega_0 = C_1 \frac{L_a \omega_0^2}{R_a} = C_1 \frac{L_a}{R_a L_a (C_1 + C_2)} = \frac{C_1}{R_a (C_1 + C_2)}$$

et

$$Q = \frac{L_a \omega_0}{R_a} = \frac{L_a}{R_a \sqrt{L_a (C_1 + C_2)}} = \frac{\sqrt{L_a}}{R_a \sqrt{(C_1 + C_2)}}$$

Question 36

La fréquence f_0 et le courant maximum sont déterminés en utilisant les valeurs données en annexe 1. Soient $C_1 = 9,1 \text{ pF}$ et $C_2 = 68 + 1 = 69 \text{ pF}$, on en déduit :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_a (C_1 + C_2)}}$$

d'où

$$f_0 = \frac{1}{(2\pi \sqrt{L_a (C_1 + C_2)})} = \frac{1}{(2\pi \sqrt{(1,75 \cdot 10^{-6}) \times (9,1 \cdot 10^{-12} + 68 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12})})} = 13,61 \text{ MHz}$$

Pour cette fréquence $|\underline{T}(j\omega)|$ est maximum et vaut :

$$K = C_1 Q \omega_0 = \frac{C_1}{R_a (C_1 + C_2)} = \frac{9,1 \cdot 10^{-12}}{4,45 \times (9,1 \cdot 10^{-12} + 68 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12})} = 0,026$$

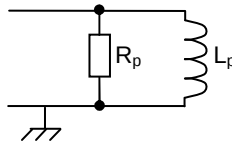
Il s'en déduit :

$$I_a = 5 \times 0,026 = 131 \text{ mA}$$

D'après la documentation, le signal présent en TX1 et TX2 est un signal rectangulaire d'amplitude $VOH \approx 4,85 \text{ V}$. Cette même documentation précise que L_0 et C_0 constituent un filtre passe bas EMC qui permet de réduire l'amplitude des harmoniques. On peut donc faire l'hypothèse d'un signal sinusoïdal d'amplitude proche de 5V.

Question 37

Schéma électrique parallèle de l'antenne :



avec :

$$\underline{Y}_{\text{série}} = \frac{1}{R_s + \frac{R_{\text{ant}}}{2} + jL_a \omega} = \underline{Y}_{\text{parallèle}} = \frac{R_s + \frac{R_{\text{ant}}}{2} - jL_a \omega}{\left(R_s + \frac{R_{\text{ant}}}{2} \right)^2 + L_a^2 \omega^2}$$

En égalant la partie réelle et la partie imaginaire, il vient :

$$\begin{cases} \frac{1}{R_p} = \frac{R_s + \frac{R_{ant}}{2}}{\left(R_s + \frac{R_{ant}}{2}\right)^2 + L_a^2 \omega^2} \\ \frac{1}{L_p \omega} = \frac{L_a \omega}{\left(R_s + \frac{R_{ant}}{2}\right)^2 + L_a^2 \omega^2} \end{cases}$$

Soit :

$$\begin{cases} R_p = \frac{\left(R_s + \frac{R_{ant}}{2}\right)^2 + L_a^2 \omega^2}{R_s + \frac{R_{ant}}{2}} \\ L_p = \frac{\left(R_s + \frac{R_{ant}}{2}\right)^2 + L_a^2 \omega^2}{L_a \omega^2} \end{cases}$$

Soit :

$$R_p = \left(R_s + \frac{R_{ant}}{2}\right) [1 + Q^2]$$

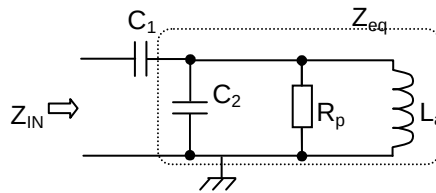
et

$$L_p = L_a \left[1 + \frac{1}{Q^2}\right]$$

Comme $Q \gg 1$, $R_p = \left(R_s + \frac{R_{ant}}{2}\right) [1 + Q^2]$ et $L_p \simeq L_a$

Question 38

Soit le schéma équivalent de l'adaptation d'impédance :



Soit :

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jL_a \omega} + jC_2 \omega,$$

$$Z_{eq} = \frac{R_p \cdot jL_a \omega}{jL_a \omega + R_p + jC_2 \omega \cdot R_p \cdot jL_a \omega}.$$

On en déduit :

$$\underline{Z_{IN}} = \frac{1}{jC_1 \omega} + Z_{eq} = \frac{1}{jC_1 \omega} + \frac{R_p \cdot jL_a \omega}{jL_a \omega + R_p + jC_2 \omega \cdot R_p \cdot jL_a \omega} = \frac{jL_a \omega + R_p + j^2 C_2 R_p L_a \omega^2 + j^2 R_p L_a C_1 \omega^2}{jC_1 \omega \cdot (jL_a \omega + R_p + j^2 C_2 R_p L_a \omega^2)}$$

$$\underline{Z}_{IN} = \frac{jL_a\omega + R_p - (C_2 + C_1)R_pL_a\omega^2}{jC_1\omega \cdot (R_p - C_2R_pL_a\omega^2) - C_1L_a\omega^2} = \frac{jL_a\omega + R_p(1 - (C_2 + C_1)L_a\omega^2)}{jC_1\omega \cdot (R_p - C_2R_pL_a\omega^2) - C_1L_a\omega^2}$$

Pour ω_0 , on a :

$$\begin{aligned}\Re[\underline{Z}_{IN}] &= \Re\left[\frac{jL_a\omega_0}{jC_1\omega_0 \cdot (R_p - C_2R_pL_a\omega_0^2) - C_1L_a\omega_0^2}\right] = \Re\left[\frac{-jL_a}{-jC_1 \cdot (R_p - C_2R_pL_a\omega_0^2) + C_1L_a\omega_0}\right] \\ &= \Re\left[\frac{-jL_a \cdot (jC_1 \cdot (R_p - C_2R_pL_a\omega_0^2) + C_1L_a\omega_0)}{-\left(jC_1 \cdot (R_p - C_2R_pL_a\omega_0^2)\right)^2 + (C_1L_a\omega_0)^2}\right] = \Re\left[\frac{\left((R_pC_1L_a - C_1C_2R_pL_a^2\omega_0^2) - jC_1L_a^2\omega_0\right)}{\left((R_pC_1 - C_1C_2R_pL_a\omega_0^2)\right)^2 + (C_1L_a\omega_0)^2}\right] \\ \Re[\underline{Z}_{IN}] &= \frac{R_pC_1L_a - C_1C_2R_pL_a^2\omega_0^2}{\left(R_pC_1 - C_1C_2R_pL_a\omega_0^2\right)^2 + (C_1L_a\omega_0)^2}\end{aligned}$$

Question 39

Comme $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_a(C_1 + C_2)}}$, on obtient :

$$\Re[\underline{Z}_{IN}] = \frac{R_pC_1L_a - C_1C_2R_pL_a^2 \frac{1}{L_a(C_1 + C_2)}}{\left(R_pC_1 - C_1C_2R_pL_a \frac{1}{L_a(C_1 + C_2)}\right)^2 + (C_1L_a)^2 \frac{1}{L_a(C_1 + C_2)}}$$

Soit :

$$\Re[\underline{Z}_{IN}] = \frac{R_pC_1L_a - C_1C_2R_pL_a^2 \frac{1}{L_a(C_1 + C_2)}}{\left(R_pC_1 - C_1C_2R_pL_a \frac{1}{L_a(C_1 + C_2)}\right)^2 + (C_1L_a)^2 \frac{1}{L_a(C_1 + C_2)}}$$

D'où :

$$\Re[\underline{Z}_{IN}] = \frac{R_pL_a(C_1 + C_2)}{R_p^2C_1^2 + L_a(C_1 + C_2)} = \frac{R_pL_a(C_1 + C_2)}{R_p^2C_1^2 + L_a(C_1 + C_2)}$$

Application numérique : $L_a = 1,75 \mu\text{H}$ et $R_a = 4,45 \Omega$ (d'après la question 33).

On trouve en annexe 1 : $C_1 = 9,1 \text{ pF}$ et $C_2 = 68 + 1 = 69 \text{ pF}$

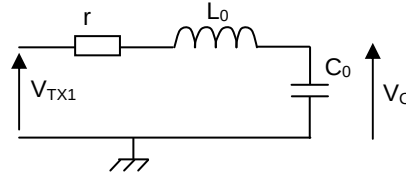
On calcule :

$$\begin{aligned}R_p &= 4,45 \times \left(1 + \frac{1,75 \cdot 10^{-6}}{4,45^2 \times (9,1 \cdot 10^{-12} + 69 \cdot 10^{-12})}\right) = 5040 \Omega \\ \Re[\underline{Z}_{IN}] &= \frac{5040 \times 1,75 \cdot 10^{-6} (9,1 \cdot 10^{-12} + 69 \cdot 10^{-12})}{5040^2 \times (9,1 \cdot 10^{-12})^2 + 1,75 \cdot 10^{-6} \times (9,1 \cdot 10^{-12} + 69 \cdot 10^{-12})} = 308 \Omega\end{aligned}$$

Afin de connecter une antenne externe via un câble, il faut faire une adaptation d'impédance 50Ω de chaque coté du câble. Pour cela, il faut, entre autres, recalculer C_1 et C_2 afin d'avoir la même pulsation propre mais avec une impédance d'entrée de 50Ω .

Question 40

Le schéma équivalent au filtre est le suivant :



On en déduit la transmittance : $\underline{T}(j\omega) = \frac{V_{C0}}{V_{TX1}}$

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{1}{r + jL_0\omega + \frac{1}{jC_0\omega}} = \frac{1}{1 + jrC_0\omega + (j\omega)^2 L_0C_0}$$

$$\underline{T}(j\omega) = \frac{1}{1 + 2jm\frac{\omega}{\omega_0} + \left(j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \text{ avec } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} \text{ et } m = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}}$$

Soient la fréquence propre $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{1 \cdot 10^{-6} \times 124 \cdot 10^{-12}}} \approx 14,3 \text{ MHz}$ et la résistance de

sortie de l'étage $r \approx 0$.

On constate que, effectivement, la fréquence de la porteuse de l'information (13,56 MHz) est dans la bande passante du filtre passe bas.

Dans tous les cas, les harmoniques possibles de la porteuse à 13,56 MHz sont éliminés.

Question 41

Éléments du modèle simplifié du couple Station de base et TAG :

On retrouve :

- C_1 et C_2 pour l'adaptation d'impédance de l'étage de sortie de la station de base,
- R_a et L_a sur le schéma équivalent de l'antenne de la station de base et de la résistance R_s ,
- L_t et R_t correspondent aux éléments équivalents de l'antenne du transpondeur ;
- R_L et C_L sont les éléments équivalents du circuit intégré dans le TAG. Ces éléments sont variables car dépendent de l'état du fonctionnement du composant. (CL comprend le condensateur d'accord et dépend de l'antenne du TAG et de sa taille) ;
- R_M et Données répondent au principe de fonctionnement de la réponse du TAG à une requête de la station de base sous la forme d'une modulation de sous porteuse ;
- k représente le couplage entre les deux antennes (station de base d'un côté et TAG de l'autre).

Question 42

Soit la fonction de transfert du transpondeur :

$$\underline{T}_2(j\omega) = \frac{Z_{LCL}}{Z_t + Z_{LCL}} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{R'_L} + jC_L\omega}}{R_t + jL_t\omega + \frac{1}{\frac{1}{R'_L} + jC_L\omega}} = \frac{R'_L}{R'_L + R_t + jL_t\omega + jR'_L C_L\omega - R'_L L_t C_L\omega^2}$$

$$= \frac{\frac{R_L'}{R_L' + R_t}}{1 + j\omega \frac{L_t + R_t R_L' C_L}{R_L' + R_t} - \omega^2 \frac{R_L' L_t C_L}{R_L' + R_t}} = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{Q \times \omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

avec :

- la fréquence propre : $\omega_0 = \sqrt{\frac{R_t + R_L'}{L_t R_L' C_L}}$;
- le facteur de qualité : $Q = \frac{\sqrt{(R_t + R_L') \times L_t R_L' C_L}}{L_t + R_L' R_t C_L}$
- l'amplification : $A_0 = \frac{R_L'}{R_L' + R_t}$

Question 43

Soit la fonction de transfert

$$|T_2(j\omega)| = \frac{A_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{Q^2 \cdot \omega_0^2}}}$$

$|T_2(j\omega)|$ est maximal pour :

$$\frac{d|T_2(j\omega)|}{d\omega} = 0$$

Soit :

$$\frac{d\left(\frac{A_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{Q^2 \cdot \omega_0^2}}}\right)}{d\omega} = 0$$

Soit :

$$A_0 \times \frac{-\frac{1}{2} \left[2 \times \left(-2 \frac{\omega}{\omega_0^2}\right) \times \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) + 2 \times \frac{\omega}{Q^2 \omega_0^2} \right]}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{Q^2 \times \omega_0^2}} = 0 \Leftrightarrow -4 \frac{\omega}{\omega_0^2} \times \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) + 2 \times \frac{\omega}{Q^2 \omega_0^2} = 0$$

Soit :

$$\Leftrightarrow -4 \frac{\omega}{\omega_0^2} + 4 \frac{\omega^3}{\omega_0^4} + 2 \frac{\omega}{Q^2 \omega_0^2} = 0 \Leftrightarrow \frac{2}{Q^2 \omega_0^2} - \frac{4}{\omega_0^2} + 4 \frac{\omega^2}{\omega_0^4} = 0 \text{ ou } \omega = 0$$

$$\Leftrightarrow \omega^2 = \omega_0^2 \left(1 - \frac{1}{2Q^2}\right)$$

On en déduit la fréquence de résonance du transpondeur :

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{R_t + R_L'}{L_t R_L' C_L} \cdot \left(1 - \frac{(L_t + R_L' R_t C_L')^2}{2 \cdot ((R_t + R_L') L_t R_L' C_L)}\right)}$$

Application numérique :

$$Q = \frac{\sqrt{(4,6 + 5000) \times 0,98 \times 10^{-6} \times 5000 \times 132 \times 10^{-12}}}{0,98 \times 10^{-6} + 5000 \times 4,6 \times 132 \times 10^{-12}} = 14,2$$

et

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{4,6 + 5000}{0,98 \cdot 10^{-6} \times 5000 \times 132 \cdot 10^{-12}}} \times \left(1 - \frac{1}{2 \times 14,2^2}\right) = 13,98 \text{ MHz}$$

Le système complet présente ainsi des résonances multiples (doubles en l'occurrence). Lorsque le transpondeur se meut dans le champ du lecteur, les pics de résonance se déplacent. Ceci fait que la porteuse et les bandes latérales de modulation sont transmises de manières différentes.

La télé-alimentation privilégie l'accord à 13,56 MHz alors que la modulation de charge privilégie l'accord à 13,56 MHz + fréquence de la sous-porteuse (sous-porteuse = 423,75 kHz) pour la bonne transmission de l'une des bandes latérales de modulation.

Question 44

Il s'agit d'un mécanisme de scrutation du port où se trouve le lecteur. On essaie de se connecter au TAG jusqu'à ce qu'il y en ait un.

Deux tâches sont exécutées en parallèle : l'affichage d'informations et la scrutation.

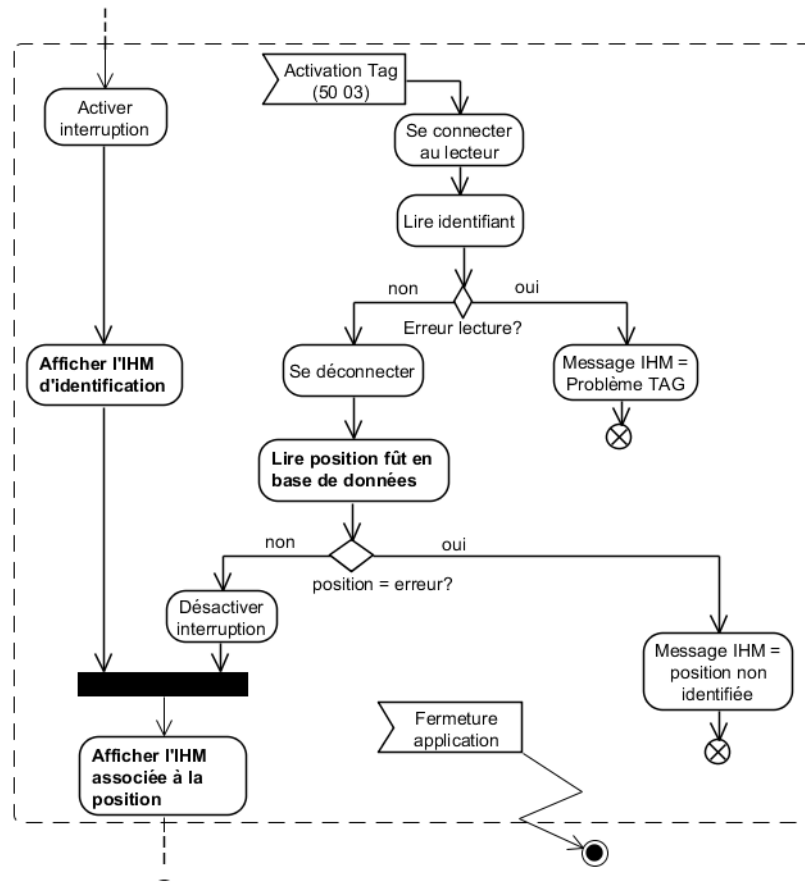
Cette solution peut être un peu lente. Le temps nécessaire entre le moment du passage du TAG et le moment où l'opérateur prend connaissance de la position normale du fût, est variable et dépend de plusieurs paramètres.

Question 45

On propose d'exploiter les événements se produisant sur le port où le lecteur USB est branché. En effet, la trame « 50 03 » (voir capture) n'apparaît que lors de l'activation du Tag. Lorsque cet événement survient, on va lancer la connexion au lecteur puis la lecture du TAG.

La solution proposée est la solution minimale attendue pour cette question :

- symbole de réception d'un événement,
- suppression de quelques tests.



Question 46

La mémoire partagée est la solution la plus rapide pour communiquer entre processus. Compte tenu du cahier des charges, plusieurs solutions sont acceptées dont la solution de simple synchronisation par sémaphore suivante :

```

const char *name = "/identifFut";
const int SIZE = 5;
Tag leTag;
int shm_fd;           // file descriptor
char *shm_base;       // base address
sem_t * laSynchronisation;
char *ptr;            // shm_base is fixed, ptr is movable
char* identifiant;
const char *name2 = "/identifFutSem";
shm_fd = shm_open(name, O_CREAT | O_RDWR, 0666);
//test valeur de retour
laSynchronisation=sem_open(name2, O_CREAT | O_RDWR,0666,0);
ftruncate(shm_fd, SIZE);

shm_base = (char *)mmap(0, SIZE, PROT_READ | PROT_WRITE, MAP_SHARED, shm_fd, 0);
//test valeur de retour et unlink

identifiant =leTag.lireId();
ptr = shm_base;
  
```

```
*(ptr+1) = identifiant[0];
*(ptr+2) = identifiant[1];
*(ptr+3) = identifiant[2];
*(ptr+4) = identifiant[3];
sem_post(laSynchronisation);

int erreur = munmap(shm_base, SIZE);
//test valeur de retour

erreur = close(shm_fd);
//test valeur de retour

return 0;
}
```

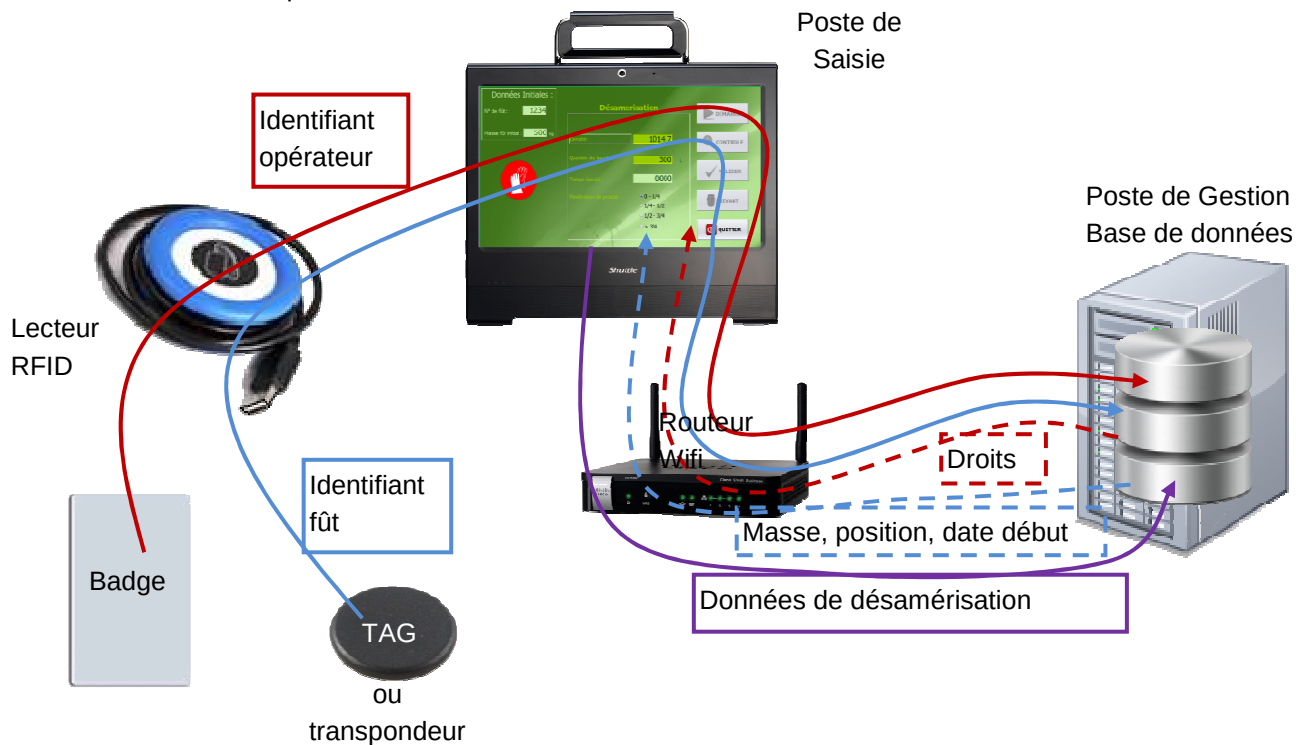
Question 47

Les améliorations pouvant être apportées consistent à :

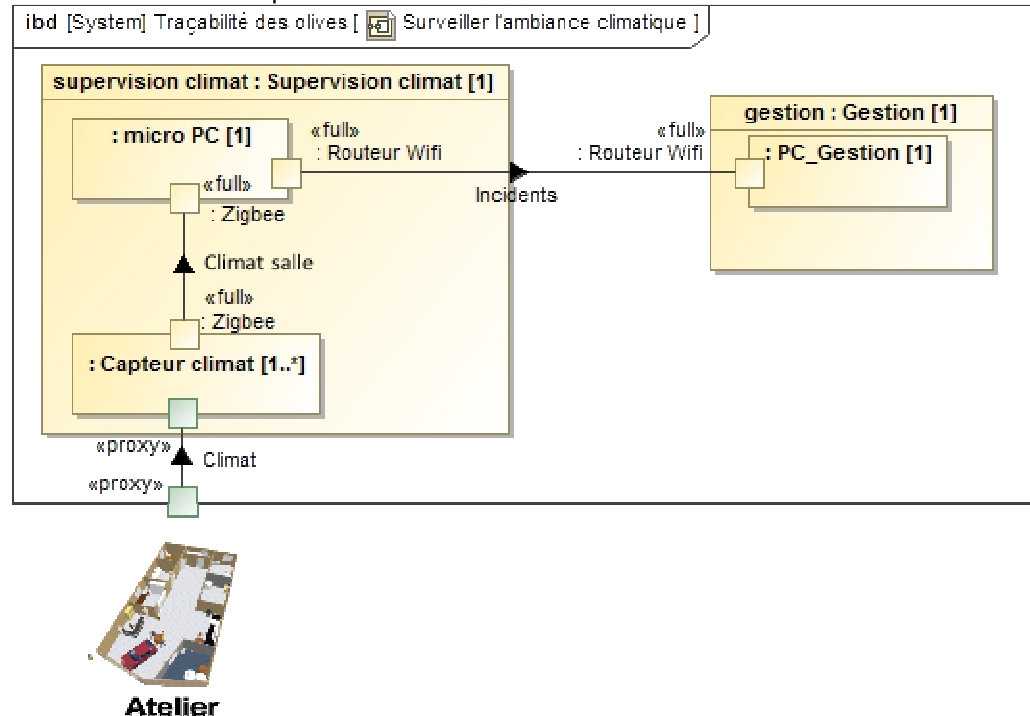
- homogénéiser le type de TAG/carte d'identification afin d'avoir un lecteur optimisé ou bien prévoir deux lecteurs pour les deux standards,
- modifier l'antenne en lui ajoutant un écran en ferrite correctement positionné afin d'améliorer la portée,
- modifier l'application afin qu'elle fonctionne sur interruption et non plus par scrutation.

Document réponse

Document relatif à la question 2 :



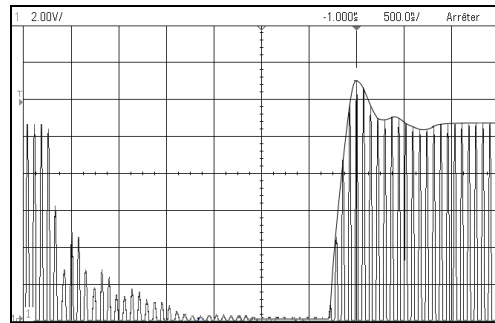
Document relatif à la question 3 :



Il est à noter que les « flow ports »  sont obsolètes depuis la version 1.3 de SysML et remplacés, entre autres, par les « full ports ». Ces derniers sont typés par un bloc. Toutefois, certains ingénieurs systèmes privilégient encore la notation « flow ports » pour plus de clarté. Les deux représentations sont acceptées mais pas en même temps (Stéréotype « full » avec le symbole )

Par ailleurs, il ne faut pas confondre le bloc micro PC (superviseur des capteurs) et le tout en un tactile (poste de saisie).

Document relatif à la question 10 :



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

Cette épreuve, d'une durée de six heures et de coefficient 1, est spécifique à l'option choisie. À partir d'un dossier technique comportant les éléments nécessaires à l'étude, l'épreuve a pour objectif de vérifier que le candidat est capable de synthétiser ses connaissances pour modéliser un système technique dans le domaine de la spécialité du concours dans l'option choisie en vue de prédire ou de vérifier son comportement et ses performances.

1. Présentation du sujet

Le sujet de cette épreuve s'appuie sur un système de suivi de traçabilité dans une confiserie d'olives de table. Ces olives sont conditionnées en fût et suivent un processus composé de différentes phases de transformation allant du tri/calibrage à la préparation en passant par la désamérisation, le rinçage, la mise en saumure. Chaque phase est initiée ou suivie par un opérateur. Les opérateurs sont identifiés par des badges RFID. Les fûts sont identifiés par des TAG ou étiquettes RFID.

En cours d'exploitation, des problèmes de reconnaissance des éléments RFID ont été constatés par les utilisateurs. Il est proposé aux candidats une investigation visant à déterminer la ou les causes de ces dysfonctionnements. Cette investigation est structurée en différentes parties indépendantes qui permettent de vérifier les capacités des candidats à :

- vérifier les caractéristiques temporelles des signaux par rapport aux normes fournies,
- vérifier les caractéristiques fréquentielles des signaux par rapport à la documentation fournie,
- analyser l'efficacité de la solution matérielle existante,
- modéliser une partie de la solution matérielle existante dans le but d'en améliorer les caractéristiques,
- analyser et critiquer le modèle d'une architecture logicielle.

2. Analyse globale des résultats

Le sujet propose différentes voies d'étude dans plusieurs domaines de l'ingénierie électrique. Cela permet à chacun de démontrer ses compétences dans l'analyse temporelle, fréquentielle, électromagnétique ou informatique, dans la recherche d'informations ou tout simplement dans la recherche d'expressions littérales.

Cette diversité conduit à des résultats parfois faibles mais qui laissent entrevoir des compétences intéressantes pour le métier d'enseignant. En effet, le jury apprécie la qualité d'analyse dont font preuve de nombreux candidats, dans la résolution de tout ou partie des problèmes posés. Toutefois, cette qualité n'est pas proportionnelle au nombre de lignes écrites en réponse aux questions qualitatives. Une perte de temps en développements inutiles pénalise le résultat final de certaines copies prometteuses. Par ailleurs, il est constaté que les questions ne sont pas lues dans leur globalité. Il en résulte de trop nombreux hors-sujet.

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie A

Analyse des flux informationnels

Cette première partie consiste à extraire, de diagrammes SysML et de la documentation, les principaux éléments de communication exploités dans la confiserie. Une étude comparative succincte de ces éléments était demandée. Cette partie est traitée par 90 % des candidats mais seulement 36 % d'entre eux savent répondre efficacement.

Partie B1

Vérification temporelle des caractéristiques du signal

L'objectif est de vérifier que le signal émis par la station de base RFID respecte les standards utilisés au sein de la confiserie. Des relevés dans différentes situations ainsi qu'un extrait du standard associé sont fournis. 89 % des candidats traitent cette partie dont 41 % avec pertinence. Il est rappelé que ce travail fait partie intégrante du métier de technicien. Le futur enseignant doit donc être capable de former ses étudiants à ce type d'intervention mais aussi à extraire les informations importantes des documentations.

Vérification fréquentielle des caractéristiques du signal

Cette partie amène le candidat à s'intéresser à l'aspect fréquentiel de la communication entre les badges ou TAG RFID et la station de base. En premier lieu, le questionnaire, guidé, permet de trouver l'expression puis l'allure de la densité spectrale de puissance du code Manchester puis du signal modulé. Ensuite, des relevés de la densité spectrale de puissance réelle donnent lieu à une analyse des dysfonctionnements éventuels. Cette étude est menée jusqu'à son terme avec plus ou moins de réussite par 18 % des candidats bien que 52 % des candidats abordent cette partie. Il semblerait que nombre d'entre eux ne connaissent pas l'impact d'une modulation d'amplitude sur la densité spectrale d'un signal. Le jury conseille aux futurs candidats de s'entraîner à exploiter correctement les informations fournies dans les sujets. Elles permettent de vérifier les calculs effectués et de repartir sur de bonnes bases pour la suite du sujet.

Partie B3.1

Analyse de l'efficacité de la solution matérielle existante

Après une recherche rapide du modèle applicable à la liaison entre la station de base et le badge ou le TAG RFID, il est demandé au candidat de vérifier la qualité de conception de l'antenne de la station de base. Ensuite, quelques relevés et une photo de l'appareil l'amène à envisager des causes aux aléas d'exploitation constatés. Cette partie est abordée par 56 % des candidats et 23 % la traitent dans sa totalité.

Partie B3.2

Modélisation d'une partie du système en vue de son amélioration

Compte tenu des défauts précédemment constatés, il est proposé de construire le modèle de l'étagage de sortie de la station de base afin de remplacer l'antenne existante par une antenne externe munie d'un écran en ferrite. L'ensemble des schémas et des valeurs des composants sont fournis, soit dans le corps du sujet, soit en annexe. Les démonstrations des expressions d'étages du premier ordre et du deuxième ordre ainsi que de leurs impacts les uns sur les autres constituent cette partie. Des applications numériques sont demandées à partir des expressions données. Bien que 62 % des candidats abordent ces questions, très peu les traitent correctement. En dépit de la fréquence avec

laquelle ce type de calculs apparaît dans les sujets de ce concours, le jury constate la rareté avec laquelle ces calculs sont menés à bien. Par ailleurs, il est rappelé aux candidats l'importance pour un enseignant d'être capable de trouver les informations utiles dans les documentations fournies mais aussi de connaître les ordres de grandeur.

Partie C

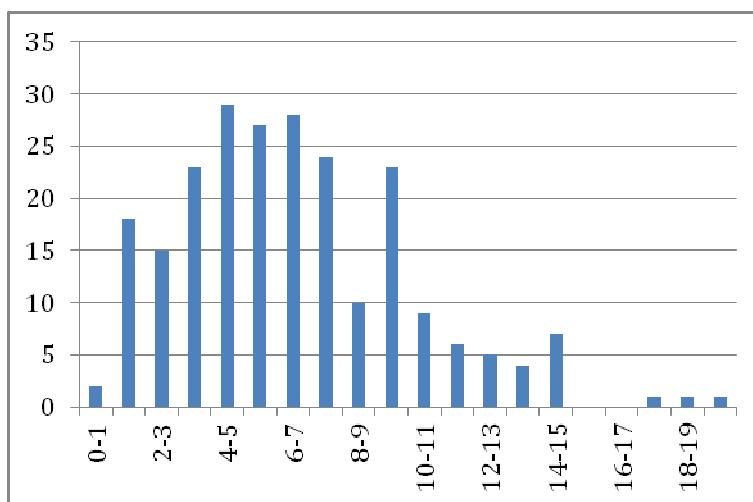
Analyse critique d'une architecture matérielle

Dans cette ultime partie, il est demandé une analyse critique constructive de la solution logicielle adoptée pour piloter la station de base RFID. La capture d'une transaction USB entre le PC et la station de base permet ensuite de proposer une évolution en vue d'améliorer la rapidité de réaction du système. Cette partie est abordée par 36 % des candidats. Le jury constate de nombreuses confusions entre algorithme et diagramme d'activité ainsi que des imprécisions sur la notion d'architecture logicielle. Les questions ne sont pas toujours correctement lues, de sorte que de nombreux hors-sujet sont commis.

4. Conclusion

Le jury conseille aux candidats une sérieuse préparation couvrant l'ensemble des attendus (arrêté du 25/11/2011). Plus particulièrement, un agrégé doit être capable d'appréhender un système industriel en partant de la documentation technique de ses composants, des indications qui peuvent être fournies et éventuellement de résultats expérimentaux mis à sa disposition. Pour cette raison, le jury conseille aux candidats de s'entraîner à lire et à analyser l'ensemble des informations données dans les sujets et leurs annexes.

5. Résultats



233 copies ont été évaluées. La moyenne des notes obtenues est de 6,56/20. L'écart-type est 3,58. La meilleure note est 20/20. La plus faible est 0,75/20.

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

Partie A

Question A.1.1.

La vitesse moyenne d'écoulement est déterminée à partir du débit volumique et de la section interne

de la conduite : $v = \frac{Q_V}{S} = \frac{200}{3600 \times \pi \times \frac{0,25^2}{4}} = 1,132 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

On peut ensuite calculer le nombre de Reynolds : $R_e = \frac{v \times D}{\nu} = \frac{v \times D}{1,007 \times 10^{-6}} = 2,81 \times 10^5$

La rugosité relative vaut : $\frac{k}{D} = \frac{0,1}{250} = 4 \times 10^{-4}$

On lit sur le diagramme de Moody $\lambda \approx 0,018$

Question A.1.2.

En remplaçant la vitesse v par $\frac{Q_V}{S}$, on obtient les pertes de charge linéiques :

$$H_{jp} = \frac{\lambda l v^2}{2gD} = \frac{8 \lambda l Q_V^2}{g \pi^2 D^5 3600^2} = 5,29 \times 10^{-4} Q_V^2$$

La charge statique du réseau correspond au dénivelé soit : $230 - 156 = 74 \text{ m}$

On obtient la charge totale en ajoutant la charge statique aux pertes de charge linéiques :

$$H_{MT} = 74 + 5,29 \times 10^{-4} Q_V^2$$

Question A.1.3.

Pour $Q_V = 215 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ on obtient $H_{MT} = 98,4 \text{ m}$, ce qui est compatible avec la zone de fonctionnement en bleu de la pompe.

Question A.1.4.

Connaissant le débit $Q_V = 250 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ et la hauteur manométrique $H_{MT} = 93,6 \text{ m}$, on calcule la puissance hydraulique nominale : $P_h = \rho g H_{MT} Q_V = 63650 \text{ W}$

Le rendement nominal de la pompe étant $\eta_p = 81,8 \%$, la puissance mécanique nominale sur l'arbre s'en déduit :

$$P_2 = \frac{P_h}{\eta_p} = 77812 \text{ W} = P_{u \text{ Moteur}} \text{ (on peut aussi lire directement } P_2 \text{ sur le graphe de } P \text{).}$$

Sur le réseau de courbes de la pompe, P_2 atteint 90 kW à son maximum : il faut lui associer un moteur de puissance utile nominale au moins égale à 90 kW, ce qui correspond au choix du fabricant.

Question A.1.5.

On agit sur la vitesse de rotation de la pompe et donc sur celle de son moteur d'entraînement par l'intermédiaire d'un variateur « Vacon » visible sur le schéma électrique du Dossier ressources. Le paramètre de réglage est alors la fréquence des tensions d'alimentation du moteur.

Pour obtenir un débit de $120 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ pour une hauteur manométrique $H_{MT} = 81,6 \text{ m}$, il faut une vitesse d'entraînement $n = 0,87 \times 2980 = 2593 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ (Document réponse A), soit une fréquence :

$$f = \frac{2593}{3000} \times 50 = 43,2 \text{ Hz (avec compensation de glissement)}.$$

Question A.2.1.

Il faut une puissance utile supérieure ou égale à 90 kW à $3000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ en High Output et à $1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ en IE4. On obtient à l'aide des documents du Dossier ressources les références suivantes :

– High output : M3BL 250 SMA4 - 3GBL 252 001 _SB (97 kW, 309 Nm) ;

– IE4 : M3BL 280 SMB4 - 3GBL 282 223 _DC (90 kW, 573 Nm).

Il faut calculer les valeurs « couple / vitesse » pour chaque point de fonctionnement.

Pour le point F1 :

$$P_h = \rho g H_{MT} Q_v = 57546 \text{ W} ; P_m = \frac{P_h}{\eta_{pompe}} = P_2 = 70178 \text{ W}$$

$$\text{– High output : } n(\%) = \frac{0,99 \times 2980}{3000} = 98,3 \% ; C_u = \frac{P_2}{\Omega} = 227 \text{ N} \cdot \text{m} ; \frac{C_u}{C_n} = 73,5 \%$$

$$\text{– IE4 : } n(\%) = \frac{0,99 \times 1480}{1500} = 97,7 \% ; C_u = 457 \text{ N} \cdot \text{m} ; \frac{C_u}{C_n} = 79,8 \%$$

Pour le point F2 :

$$P_h = 26635 \text{ W} ; P_m = \frac{P_h}{\eta_{pompe}} = P_2 = 36486 \text{ W}$$

$$\text{– High output : } n(\%) = \frac{0,87 \times 2980}{3000} = 86,4 \% ; C_u = 134 \text{ N} \cdot \text{m} ; \frac{C_u}{C_n} = 43,5 \%$$

$$\text{– IE4 : } n(\%) = \frac{0,87 \times 1480}{1500} = 85,8 \% ; C_u = 270 \text{ N} \cdot \text{m} ; \frac{C_u}{C_n} = 47,2 \%$$

Question A.2.2.

Le tableau ci-dessous renseigne les différents rendements (%) :

	Pompe	MMG 280MA + variateur VACON	High output SynRM motor-drive	IE4 SynRM motor-drive
F ₁	82,0	90,9	93,0	93,7
F ₂	73,0	86,2	91,1	92,9

Le tableau suivant indique le rendement global (incluant celui de la pompe) et la puissance électrique absorbée en amont du variateur (P1) :

	F ₁ (%)	F ₂ (%)	P1_F ₁ (W)	P1_F ₂ (W)
IE2	74,5	62,9	77204	42328
High output	76,3	66,5	75461	40051
IE4	76,8	67,8	74897	39275

Question A.2.3.

Le calcul du coût en euros est donné par la formule : $0,05 \times 8000 \times P1 [\text{kW}]$

Question A.2.4.

Il n'y a pas de contrainte particulière sur l'encombrement des moteurs (cf. photographie de la figure A1) : les gains sur la hauteur d'axe (250 mm par rapport à 280 mm) et la puissance (97 kW

contre 90 kW) n'apporteraient rien. Il faut privilégier ici la gamme IE4 de meilleur rendement, de même puissance et de dimensions identiques au moteur asynchrone équivalent.

Partie B

Question B.1.1.

Un moteur synchrone de vitesse de synchronisme $n_s = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ à 50 Hz possède 4 pôles soit 2 paires de pôles : $p = 2$

Question B.1.2.

Avec 36 encoches, 3 phases et $2p = 4$ pôles, on obtient $m = 36 / (3 \times 2p) = 3$ encoches par pôle et par phase.

On en déduit, en nombre d'encoches :

- le pas polaire : $m \times 3 \times 2p / (2p) = 3m$;
- le décalage angulaire : $m \times 3 \times 2p / (3p) = 2m$.

Question B.1.3.

Voir le Document réponse B.

Question B.1.4.

Voir le Document réponse B.

Question B.1.5.

Le décalage entre les deux couches est de 2 encoches soit $2 \times 7,5 = 15^\circ$ ce qui donne :

$$\beta = 1 - \frac{2 \times 15}{180} = \frac{5}{6}$$

Question B.1.6.

La nouvelle valeur de m est égale à : $48 / (3 \times 2 \times 2) = 4$.

rang	1 (fondamental)	5	7
k_b	0,9577	0,2053	-0,1576
k_r	0,9659	0,2588	0,2588
$k_b \cdot k_r$	0,9250	0,0531	-0,0408

En comparant k_b et $k_b \cdot k_r$, on constate que les rangs 5 et 7 sont très atténués sans trop affecter le fondamental. La répartition spatiale de la force magnétomotrice sera plus proche d'une sinusoïde.

Question B.1.7.

Les principales conséquences de ces harmoniques sont :

- une ondulation du couple,
- des contraintes mécaniques supplémentaires sur le rotor,
- du bruit en haute fréquence ainsi que des pertes par effet Joule additionnelles.

L'intérêt pour les fabricants est de pouvoir utiliser la même chaîne de fabrication que pour des moteurs asynchrones, ce qui réduit les coûts de production.

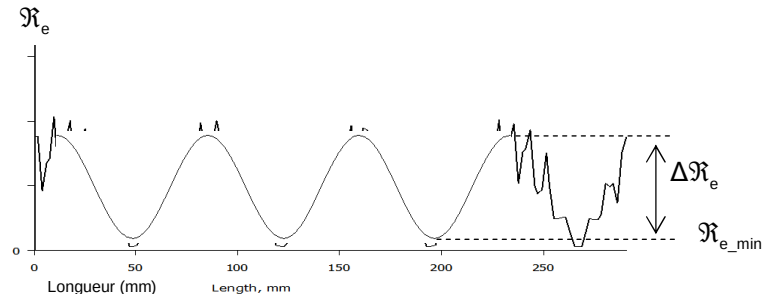
Question B.2.1.

L'image correspond à celle d'un rotor de moteur asynchrone à cage dont une partie des encoches ont été supprimées (fraisées).

Le démarrage direct est toujours possible grâce à la cage résiduelle.

Question B.2.2.

Il y a 4 directions de réluctance maximale (minimale) sur le rotor. La réluctance passe donc 4 fois par une valeur maximale (minimale). Le tout est modulé par la variation de réluctance due à l'alternance « dent / encoche » du stator avec une période de $360 / 36 = 10^\circ$.



En se limitant au fondamental, les harmoniques d'espace, de denture et de perméance étant négligés, on obtient l'expression de la réluctance en fonction de la position angulaire repérée à partir d'un axe de réluctance maximale :

$$\Re_e = \Re_{e_min} + \frac{\Delta \Re_e}{2} (1 + \cos(2p \times \theta)) = \Re_{e_min} + \frac{\Delta \Re_e}{2} (1 + \cos(4\theta))$$

Question B.2.3.

La différence de réluctance est réalisée en intercalant des zones amagnétiques (ici de l'air) dans les directions d'axe q.

Ce rotor possède 3 barrières de flux.

Question B.3.1.

Le gain est réalisé sur les pertes Joule du rotor.

Les nouvelles pertes seraient de 60 % de 5 %, soit 3 %, ce qui correspondrait à un gain de 2 points sur le rendement alors égal à 97 %.

Question B.3.2.

La hauteur d'axe de la gamme High output diffère de celle d'une MAS de même puissance à partir de 2,2 kW ($h = 90$ mm contre 100 mm).

Pour les puissances extrêmes de la gamme IE4, on obtient les écarts suivants :

	Rendement IE4 SynRM	Rendement MAS (IE2)	Gain
11 kW	93,3 %	90,4 %	2,9 %
315 kW	96,7 %	95,9 %	0,8 %

Question B.3.3.

L'allure du courant de ligne en amont est caractéristique (« oreilles de lapin ») d'un redresseur PD3 sur charge capacitive (bus continu).

L'allure de la tension de sortie est caractéristique d'un onduleur MLI. A partir du relevé de l'oscillogramme de la figure 11 (a) on obtient $V_{DC} \approx 2,9 \times 200 = 580$ V

Question B.3.4.

A partir du relevé de l'oscillogramme de la figure 11 (a), on détermine la valeur efficace du courant dans le moteur :

$$I = \frac{2,8 \times 200}{100 \times \sqrt{2}} = 3,96 \text{ A}$$

A partir du tableau de mesures de la figure 11 (c), on détermine le facteur de puissance et le taux de distorsion harmonique :

$$FP_a = \frac{P_a}{S_a} = \frac{1831}{3211} = 0,57$$

$$THDI_a = \sqrt{1 - \left(\frac{FP_a}{DPF} \right)^2} = 0,82$$

L'augmentation de température est de $84,9 - 20 = 64,9$ °C. La classe F « autorise » une température maximale des enroulements de 155 °C.

La marge d'augmentation de température est de $155 - 84,9 \approx 70$ °C ou de $155 - (84,9 + 10) \approx 60$ °C selon la prise en compte ou non du « Hotspot margin » pour l'estimation fournie par le variateur.

A partir du tableau de mesures de la figure 11 (c), on détermine le rendement de l'ensemble « moteur – variateur » :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{T_r \cdot \Omega}{P_a} = \frac{9,53 \times 1500 \times 2\pi}{60 \times 1831} = 0,82$$

Cette valeur de rendement correspond à la limite basse de la classe IE2 mais en incluant ici le rendement du variateur.

PARTIE C

Question C.1.1.

Les tensions induites aux bornes des enroulements sont égales aux variations correspondantes du flux (Loi de Lenz) : $v = R \cdot i + \frac{d\phi}{dt}$

Question C.1.2.

En faisant apparaître les composantes de Park de chaque vecteur, on obtient :

$$\mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{i}_{dq0} + \frac{d(\mathbf{P}^{-1} \cdot \phi_{dq0})}{dt}$$

On multiplie ensuite par $\mathbf{P}$. Soit :

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{i}_{dq0} + \mathbf{P} \cdot \frac{d(\mathbf{P}^{-1} \cdot \phi_{dq0})}{dt}$$

La matrice $\mathbf{R}$ étant diagonale, on obtient :

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_{dq0} + \mathbf{P} \left(\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt} \cdot \phi_{dq0} + \mathbf{P}^{-1} \cdot \frac{d\phi_{dq0}}{dt} \right) = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_{dq0} + \mathbf{P} \cdot \frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt} \cdot \phi_{dq0} + \frac{d\phi_{dq0}}{dt}$$

Le calcul de $\mathbf{P} \cdot \frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt}$ conduit à :

$$\mathbf{P} \cdot \frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt} = \frac{2}{3} \frac{d\theta}{dt} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\frac{3}{2} & 0 \\ \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{d\theta}{dt} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Finalement, la transformation de Park d'angle θ_e donne :

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_{dq0} + \frac{d\theta_e}{dt} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \phi_{dq0} + \frac{d\phi_{dq0}}{dt}$$

La composante d'indice 0 est la composante homopolaire. Elle est nulle car les grandeurs sont, par hypothèse, équilibrées.

Question C.1.3.

L'angle de décalage électrique est lié à la vitesse mécanique de rotation : $\theta_e = p \cdot \Omega \cdot t$

Le développement de l'équation matricielle sur chaque axe donne :

$$\begin{aligned} v_d &= r i_d - p\Omega \cdot \varphi_q + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} \\ v_q &= r i_q + p\Omega \cdot \varphi_d + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} \end{aligned}$$

On obtient les puissances instantanées en multipliant par les courants :

$$\begin{aligned} v_d \cdot i_d &= r i_d^2 + L_d \cdot i_d \cdot \frac{di_d}{dt} - p\Omega \cdot \varphi_q \cdot i_d \\ v_q \cdot i_q &= r i_q^2 + L_q \cdot i_q \cdot \frac{di_q}{dt} + p\Omega \cdot \varphi_d \cdot i_q \end{aligned}$$

Chaque terme des membres de droite correspond à une forme spécifique d'énergie :

- les puissances dissipées sous forme de chaleur : $r i_d^2$, $r i_q^2$
- les dérivées des énergies stockées sous forme magnétique : $L_d \cdot i_d \cdot \frac{di_d}{dt}$, $L_q \cdot i_q \cdot \frac{di_q}{dt}$
- les puissances électromagnétiques convertibles en puissance mécanique : $-p\Omega \cdot \varphi_q \cdot i_d$, $p\Omega \cdot \varphi_d \cdot i_q$

En ajoutant les deux derniers termes, on obtient la puissance électromagnétique totale :

$$p_e = p\Omega (i_q \varphi_d - i_d \varphi_q) = p\Omega (i_q L_d i_d - i_d L_q i_q)$$

On en déduit l'expression simplifiée du couple électromagnétique de la MSRV :

$$C_e = p(L_d - L_q) i_d i_q$$

Question C.1.4.

La transformation de Park d'angle $\theta_e = \omega \cdot t$ appliquée aux courants donne :

$$i_{dq0} = \mathbf{P}(\theta_e) \cdot \mathbf{i} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I\sqrt{2} \cos(\theta_e + \varphi_i) \\ I\sqrt{2} \cos\left(\theta_e + \varphi_i - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I\sqrt{2} \cos\left(\theta_e + \varphi_i + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$\text{Soit, après développement et simplification : } i_{dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{2} \begin{bmatrix} \frac{3I \cos(\varphi_i)}{2} \\ \frac{3I \sin(\varphi_i)}{2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ce qui donne sur chaque axe : $i_d = \sqrt{3} I \cos(\varphi_i)$ et $i_q = \sqrt{3} I \sin(\varphi_i)$

Ces expressions montrent que l'angle de courant δ est égal à φ_i .

En remplaçant i_d et i_q , on obtient la relation recherchée :

$$C_e = p(L_d - L_q) i_d i_q = p(L_d - L_q) 3I^2 \frac{\sin(2\delta)}{2} = \frac{3}{2} p(L_d - L_q) I^2 \sin(2\delta)$$

Le couple moteur est ainsi maximal à I donné pour $\delta = 45^\circ$

Question C.1.5.

En négligeant r : $P \approx P_e = C_e \Omega$

En tenant compte qu'en régime sinusoïdal permanent $\frac{di_d}{dt} = 0$ et $\frac{di_q}{dt} = 0$, le développement de S conduit à :

$$S = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \cdot \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{(-p\Omega L_q i_q)^2 + (p\Omega L_d i_d)^2} \cdot \sqrt{3}$$

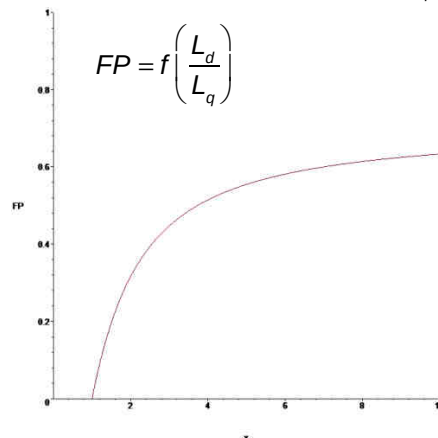
Soit :

$$S = p\Omega \sqrt{3} I \sqrt{L_q^2 \sin^2(\delta) + L_d^2 \cos^2(\delta)} \cdot \sqrt{3} I = 3p\Omega I^2 L_q \cos(\delta) \sqrt{\tan^2(\delta) + \left(\frac{L_d}{L_q}\right)^2}$$

Après réarrangement, on obtient l'expression du facteur de puissance :

$$FP = \frac{C_e \cdot \Omega}{S} = \frac{\frac{3}{2} p (L_d - L_q) I^2 \sin(2\delta) \Omega}{3p\Omega I^2 L_q \cos(\delta) \sqrt{\tan^2(\delta) + \left(\frac{L_d}{L_q}\right)^2}} = \frac{\left(\frac{L_d}{L_q} - 1\right) \sin(\delta)}{\sqrt{\tan^2(\delta) + \left(\frac{L_d}{L_q}\right)^2}}$$

La figure ci-dessous montre son évolution, en fonction du rapport $\frac{L_d}{L_q}$, pour $\delta = 45^\circ$:



Question C.1.6.

Il faut maximiser l'écart $(L_d - L_q)$ pour le couple et le rapport de saillance $\left(\frac{L_d}{L_q}\right)$ pour le facteur de puissance.

Question C.2.1.

Puisque $\vec{J}$ est axial $\vec{A}$ l'est également : $A_x = A_y = 0$ et $A_z = \text{cste}$ du fait de la modélisation en deux dimensions.

On peut aboutir à la même conclusion en notant que le plan de coupe est un plan d'antisymétrie pour les courants : $\vec{A}$ est perpendiculaire au plan de coupe.

Question C.2.2.

En partant de la définition du flux et en utilisant la formule de Stokes :

$$\varphi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint \text{rot} \vec{A} \cdot d\vec{S} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}$$

Question C.2.3.

Le flux sur une spire est exprimé par : $\varphi = A_z^+ \times L - A_z^- \times L$

Pour N spires, il faut calculer la moyenne de A_z sur la surface d'une encoche car les conducteurs ne sont pas superposés :

$$\varphi_N = N L \frac{1}{S} \left(\iint_S A_z^+ \cdot dS - \iint_S A_z^- \cdot dS \right)$$

On retrouve le même résultat à partir de l'expression fournie dans le manuel du logiciel :

$$\varphi_N = L_{self} i = \frac{1}{i} \int A J dV = \frac{1}{i} \iint A J L dS = L N \frac{1}{S} \iint A dS$$

Il faut sélectionner les deux surfaces (encoches d'entrée et de sortie) puis en faire la soustraction, pour obtenir le flux de la bobine.

Question C.2.4.

L'effet de la saturation est significatif pour les deux inductances (diminution) et plus prononcé pour L_d que pour L_q , moins facilement saturable à cause de l'air des barrières de flux.

Pour mettre en évidence l'effet de « cross magnetization », il faut comparer les valeurs déduites de ces courbes (obtenues avec respectivement $i_q = 0$ A et $i_d = 0$ A pour L_d et L_q) avec des points de fonctionnement où i_q et i_d sont simultanément différents de zéro :

	i_d (A)	i_q (A)	L_d (mH)	L_q (mH)
Courbes	4,76	0	340	
	0	4,76		110
Tableau	4,76	4,76	314	83

L'effet de « cross magnetization » accentue la diminution des valeurs des inductances.

Cet effet existe car les flux d'axes d et q partagent en partie le même circuit magnétique.

Question C.3.1.

Sur la courbe de la figure 10 du Document ressources on lit $\delta = 55^\circ > 45^\circ$ (modèle simplifié).

L'écart provient essentiellement des pertes négligées dans le modèle simplifié.

Question C.3.2.

L'ondulation du couple est générée par l'alternance dent / encoche au stator : à angle de charge constant, les positions relatives des barrières de flux par rapport aux encoches varient selon la position du rotor. La réluctance fluctue donc à chaque passage d'une encoche. Les harmoniques de perméance associés sont à l'origine de cette ondulation du couple. Sur la figure C4, on observe 9 périodes sur $\frac{1}{4}$ de tour (0,01 s à 1500 tr.min⁻¹), ce qui correspond bien aux 9 encoches.

Pour obtenir un couple constant, les courants ne seront pas constants. La commande devra être adaptée pour compenser cette ondulation.

PARTIE D

Question D.1.1.

On dénombre $2^3 = 8$ configurations.

Les expressions des tensions simples sont issues des relations suivantes :

$$v_a = \frac{u_{ab} - u_{ca}}{3} ; v_b = \frac{u_{bc} - u_{ab}}{3} ; v_c = \frac{u_{ca} - u_{bc}}{3}$$

Question D.1.2.

Voir le Document réponse C.

Question D.1.3.

Voir le Document réponse C.

Question D.1.4.

Moyenner sur la durée totale T_s impose la limite supérieure : $T_1 + T_2 = T_s$.

Les deux extrêmes sont :

– $T_1 = T_s$ et $T_2 = 0$ pour avoir $\vec{V}_{ref} = \vec{V}_i$

– $T_2 = T_s$ et $T_1 = 0$ pour avoir $\vec{V}_{ref} = \vec{V}_{i+1}$

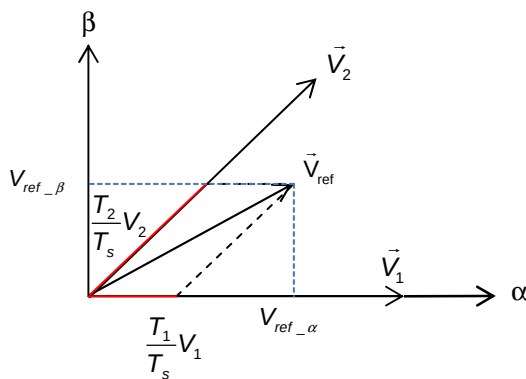
Pour tous les vecteurs $\vec{V}_{ref}$ « à l'intérieur » de cette limite on aura $T_1 + T_2 \leq T_s$ soit $T_1 + T_2 + T_0 = T_s$ où T_0 correspond à la durée d'application d'un vecteur nul : [000] ou [111]

Question D.1.5.

La situation particulière $T_1 + T_2 = T_s$ correspond au segment de droite joignant les extrémités des deux vecteurs $\vec{V}_i$ et $\vec{V}_{i+1}$.

La limite de fonctionnement linéaire correspond au cercle inscrit dans l'hexagone car une grandeur sinusoïdale est représentée dans le repère $(\alpha\beta)$ par un phaseur de module constant tournant à vitesse constante.

Question D.1.6.



Par projection respectivement sur les axes α et β :

$$V_{ref_alpha} = \frac{T_1}{T_s} V_1 + \frac{T_2}{T_s} V_2 \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

$$V_{ref_beta} = \frac{T_2}{T_s} V_2 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

On extrait : $T_2 = \sqrt{2} \frac{V_{ref-\beta}}{V_{DC}} T_s$ et $T_1 = \left(\sqrt{3} V_{ref-\alpha} - V_{ref-\beta} \right) \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}} T_s$

On en déduit :

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) = T_s \left(1 - \left(\left(\sqrt{3} V_{ref-\alpha} - V_{ref-\beta} \right) \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}} + \sqrt{2} \frac{V_{ref-\beta}}{V_{DC}} \right) \right) = T_s \left(1 - \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}} \left(\sqrt{3} V_{ref-\alpha} + V_{ref-\beta} \right) \right)$$

Question D.1.7.

La pente du signal triangulaire vaut $p = \frac{2}{T_s}$

En associant les durées de conduction du tableau D1 avec les abscisses correspondant aux intersections du signal triangulaire avec les niveaux des 3 registres, on a :

$$\frac{T_0}{4} = \frac{CMP1}{p} \rightarrow CMP1 = \frac{1}{2} \frac{T_0}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}} \left(\sqrt{3} V_{ref-\alpha} + V_{ref-\beta} \right) \right)$$

$$\frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} = \frac{CMP2}{p} \rightarrow CMP2 = CMP1 + \frac{T_1}{T_s}$$

On en déduit les valeurs à transférer dans les trois registres :

$$CMP2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}} \left(\sqrt{3} V_{ref-\alpha} + V_{ref-\beta} \right) \right) + \left(\sqrt{3} V_{ref-\alpha} - V_{ref-\beta} \right) \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}}$$

$$CMP2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_{ref-\alpha} - \frac{3}{2} V_{ref-\beta} \right)$$

$$CMP3 = CMP2 + \frac{T_2}{T_s} = \frac{1}{2} + \frac{1}{V_{DC} \sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_{ref-\alpha} + \frac{1}{2} V_{ref-\beta} \right)$$

Les signaux PWM1, PWM2 et PWM3 doivent commander respectivement les cellules S1, S2 et S3.

Question D.2.1.

On établit la représentation d'état du moteur à partir des 3 équations suivantes :

$$v_d = r i_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt}$$

$$v_q = r i_q + \omega L_d i_d + L_q \frac{di_q}{dt}$$

$$J_{tot} \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_p - C_r$$

Les hypothèses formulées permettent d'admettre la simplification suivante : $J \frac{d\Omega}{dt} \approx C_e$

On en déduit le modèle d'état

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\Omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{L_d} & p\Omega \frac{L_q}{L_d} & 0 \\ -p\Omega \frac{L_d}{L_q} & \frac{-r}{L_q} & 0 \\ \frac{p(L_d - L_q)i_q}{J} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}$$

dans lequel

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega \end{bmatrix}.$$

Question D.2.2.

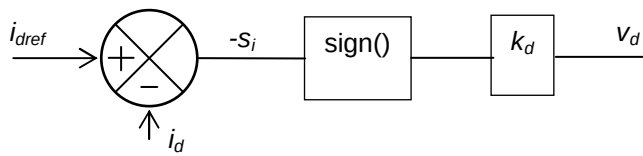
L'équation $s(x) = 0$ conduit sur chaque axe à :

$$e_d = 0 \text{ soit } i_d = i_{dref}$$

$$e_q = 0 \text{ soit } i_q = i_{qref}$$

Les deux surfaces sont des plans dans l'espace d'état défini par les variables i_d, i_q, Ω

Question D.2.3.



Cette commande est à structure variable à cause de la fonction $\text{sign}()$ qui engendre des équations différentielles à second membre discontinu.

Question D.2.4.

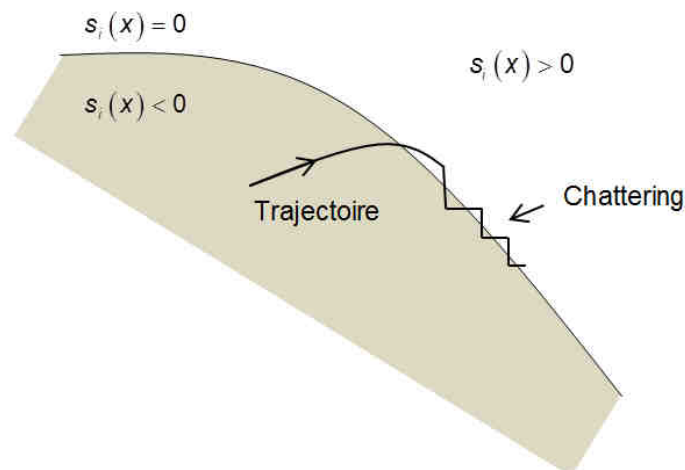
Il faut différencier $\dot{s}(x)$ pour faire apparaître $\dot{x}$:

$$\dot{s}(x) = \frac{ds(x)}{dt} = \frac{\partial s(x)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{\partial s(x)}{\partial x} \cdot \dot{x} = \frac{\partial s(x)}{\partial x} \cdot (A(x) \cdot x + B \cdot u_{eq}) = 0$$

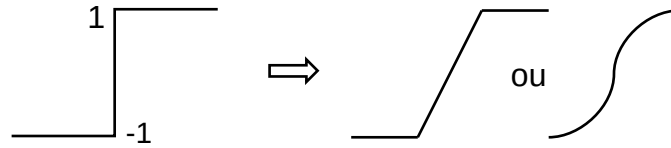
On extrait $u_{eq} = -\left(\frac{\partial s(x)}{\partial x} \cdot B\right)^{-1} \cdot \frac{\partial s(x)}{\partial x} \cdot A(x) \cdot x$

Après le calcul de $\frac{\partial s(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, on aboutit bien à $v_{deq} = r i_d - \omega L_q i_q$

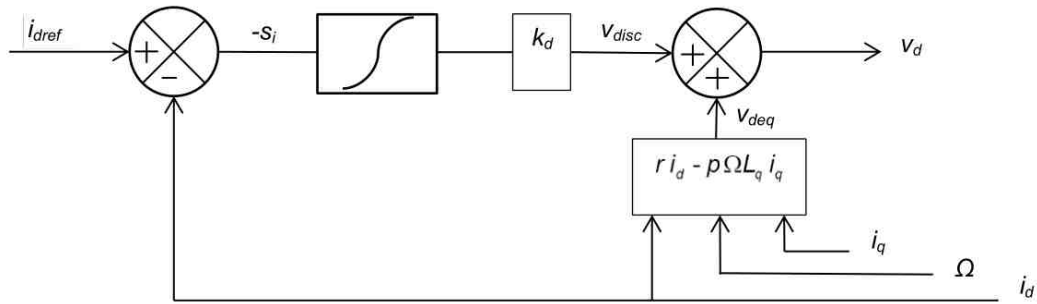
Question D.2.5.



Remplacement de la fonction sign() :



Ajout de la commande équivalente :



Question D.2.6.

- l'application d'un échelon de couple résistant constitue une perturbation ;
- la mesure de i_d a été perturbée par un bruit blanc gaussien.

Question D.3.1.

En appliquant les formules de discrétisation :

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 1 - \frac{r}{L_d} T_s & p\Omega \frac{L_q}{L_d} T_s & 0 \\ -p\Omega \frac{L_d}{L_q} T_s & 1 - \frac{r}{L_q} T_s & 0 \\ \frac{p(L_d - L_q)i_q}{J} T_s & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} T_s & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} T_s \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Question D.3.2.

L'étape de prédiction est codée à la ligne 24 : $\hat{x}_{k+1/k} = \mathbf{A}_k \hat{x}_k + \mathbf{B}_k u_k$

L'étape de mise à jour est codée à la ligne 29 : $\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K(y_k - \mathbf{C}_k \hat{x}_{k+1/k})$

Question D.3.3.

Il faut reprendre le modèle d'état en ajoutant le couple résistant : $x = [i_d \quad i_q \quad \Omega \quad C_r]^T$

La position et la vitesse sont liées : $\theta = \int_0^t \Omega(t).dt + \theta_0$, la principale difficulté étant d'estimer la position initiale θ_0 du rotor à l'arrêt.

DOCUMENT RÉPONSE A

Question A.1.3.

NK 80-250/270 50 Hz

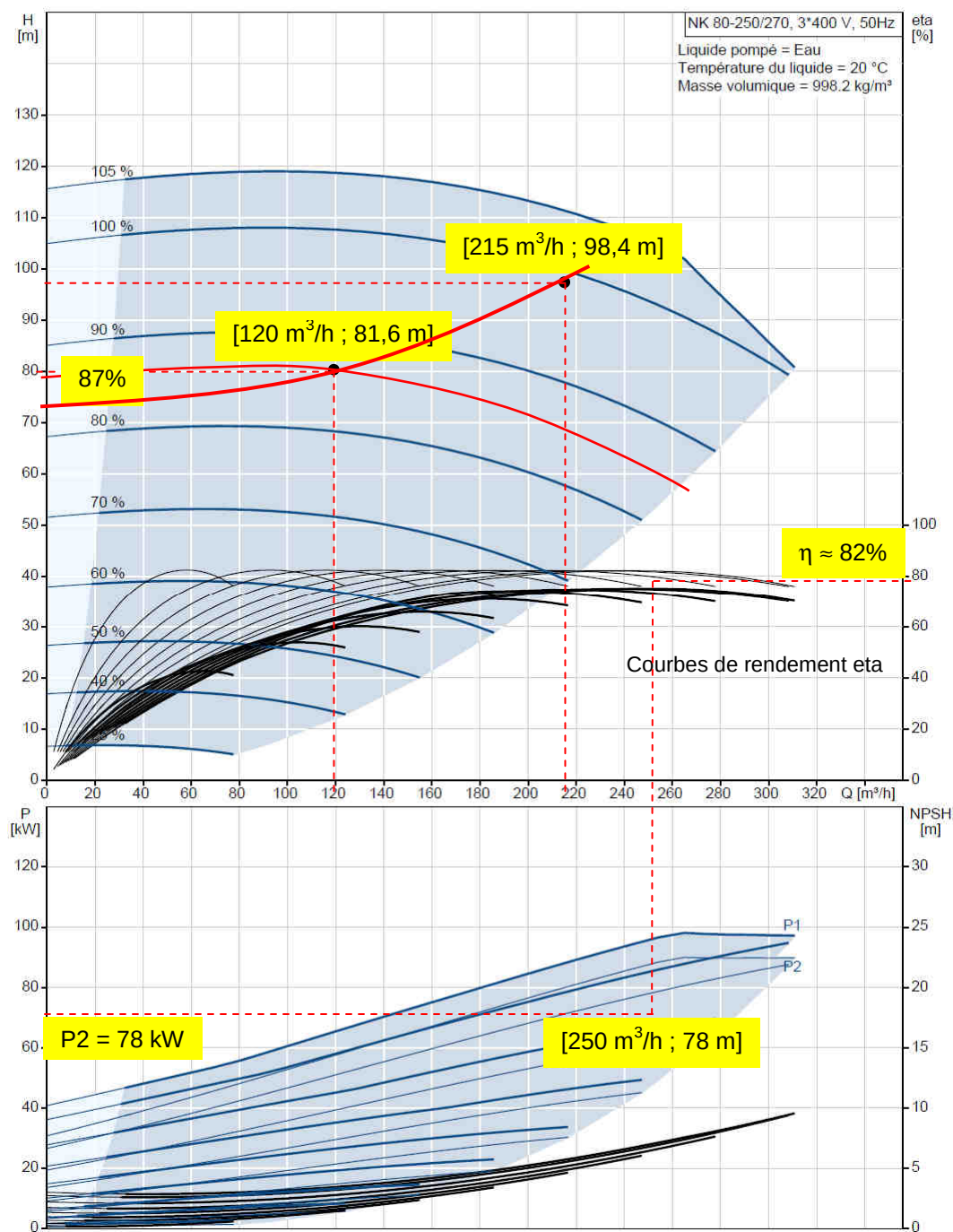
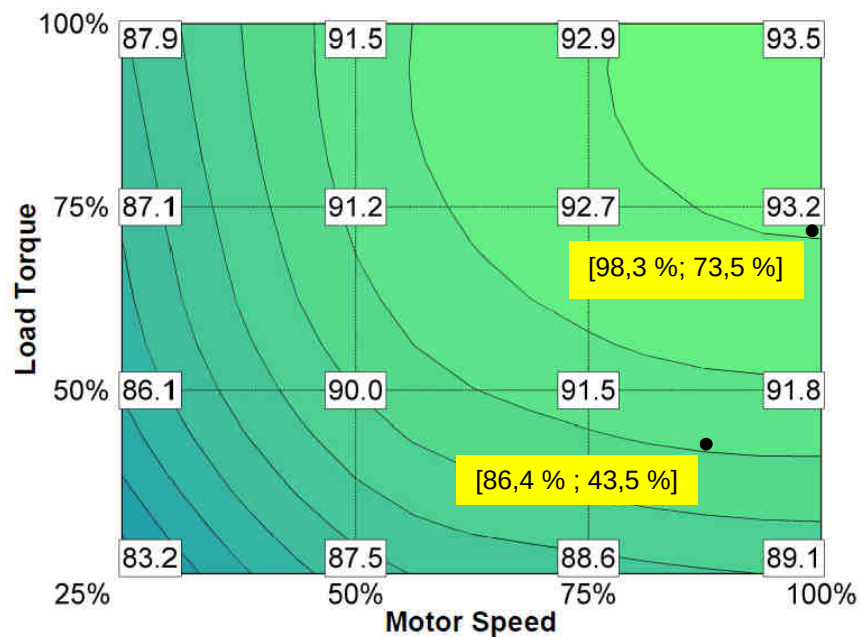


Figure 1 – Hauteur manométrique (H) et rendement (eta) de la pompe (traits fins noirs) pour différentes vitesses d'entraînement ($2980 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1} \leftrightarrow 100 \%$).

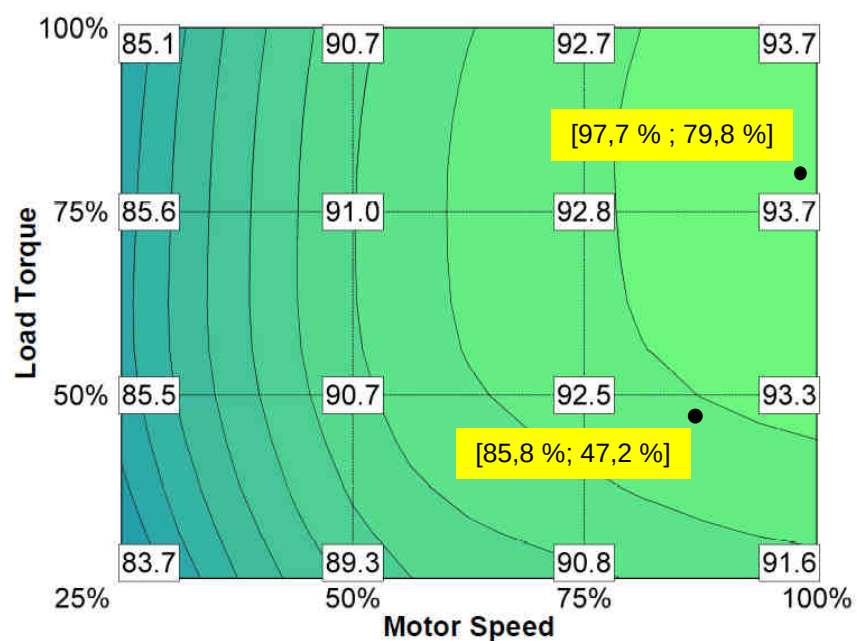
P2 : puissance mécanique d'entraînement de la pompe ; P1 : puissance électrique en amont du variateur pilotant le moteur (MMG 280MA). Les courbes des deux graphes H [m] et P [kW] sont corrélées.

Question A.2.1

Package efficiency [%] for applications with other load characteristics:



(a) – High output SynRM motor-drive package



(b) – IE4 SynRM motor-drive package

Figure 2 – Diagrammes des rendements (données ABB)

Question A.2.2.

Tableau 1 – Rendements (%)

	Pompe	MMG 280MA + variateur VACON	High output SynRM motor-drive package	IE4 SynRM motor-drive package
F ₁	82,0	90,9	93,0	93,7
F ₂	73,0	86,2	91,1	92,9

Question A.2.3.

Tableau 2 – Coût énergétique en €

	Durée totale de fonctionnement : 8000 heures Tarif : 0,05 €·kW ⁻¹ ·h ⁻¹			Économie / IE2 (MMG 280MA + VACON 90)
Répartition du temps de fonctionnement	100 % F ₁	100 % F ₂	30 % F ₁ 70 % F ₂	30 % F ₁ 70 % F ₂
Asynchrone IE2 MMG 280MA + VACON 90	30882 €	16931 €	21116 €	
High output SynRM motor-drive package	30184 €	16020 €	20270 €	847 €
IE4 SynRM motor-drive package	29958 €	15710 €	19985 €	1132 €

DOCUMENT RÉPONSE B
Question B.1.3.

Convention de représentation des conducteurs dans les encoches :



Enroulement : A, B ou C

Bobine : 1, 2, ...

Exemple : faisceau d'aller de la 2^e bobine de l'enroulement B :

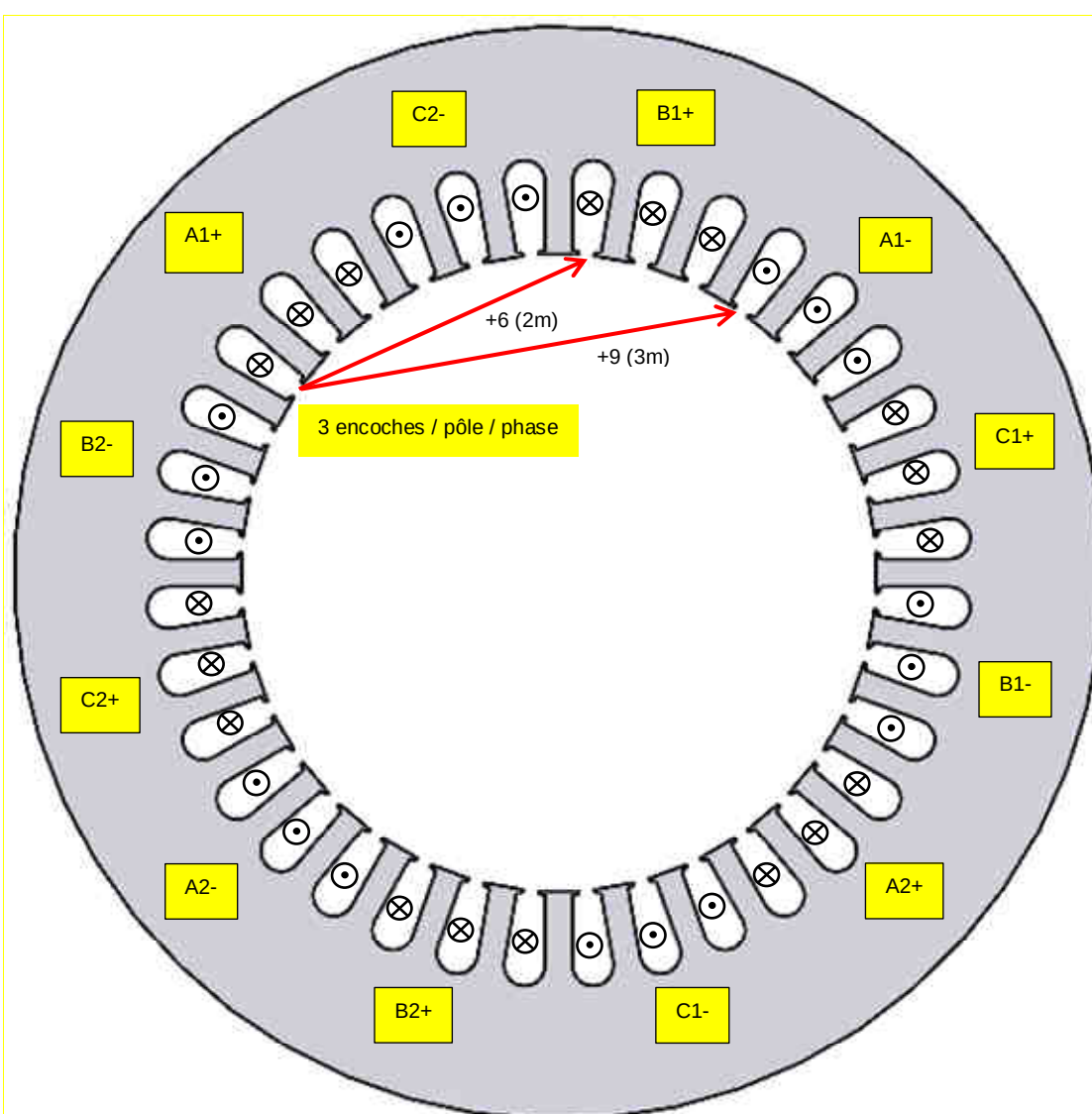
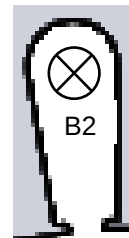
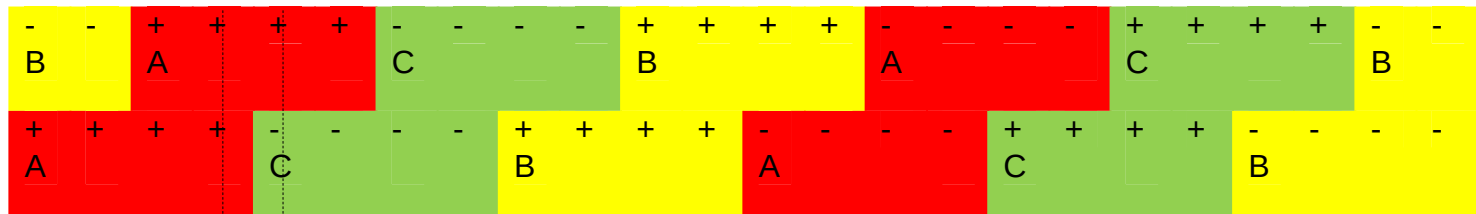


Diagramme n°1 – Répartition des conducteurs dans les encoches du stator

Question B.1.4.

–
représentation de $\varepsilon(\theta)$;

Le nombre de conducteurs par faisceau sera supposé égal à un pour la



+ : Aller
- : Retour
 $i_A = +1A$
 $i_B = i_C = -0,5A$

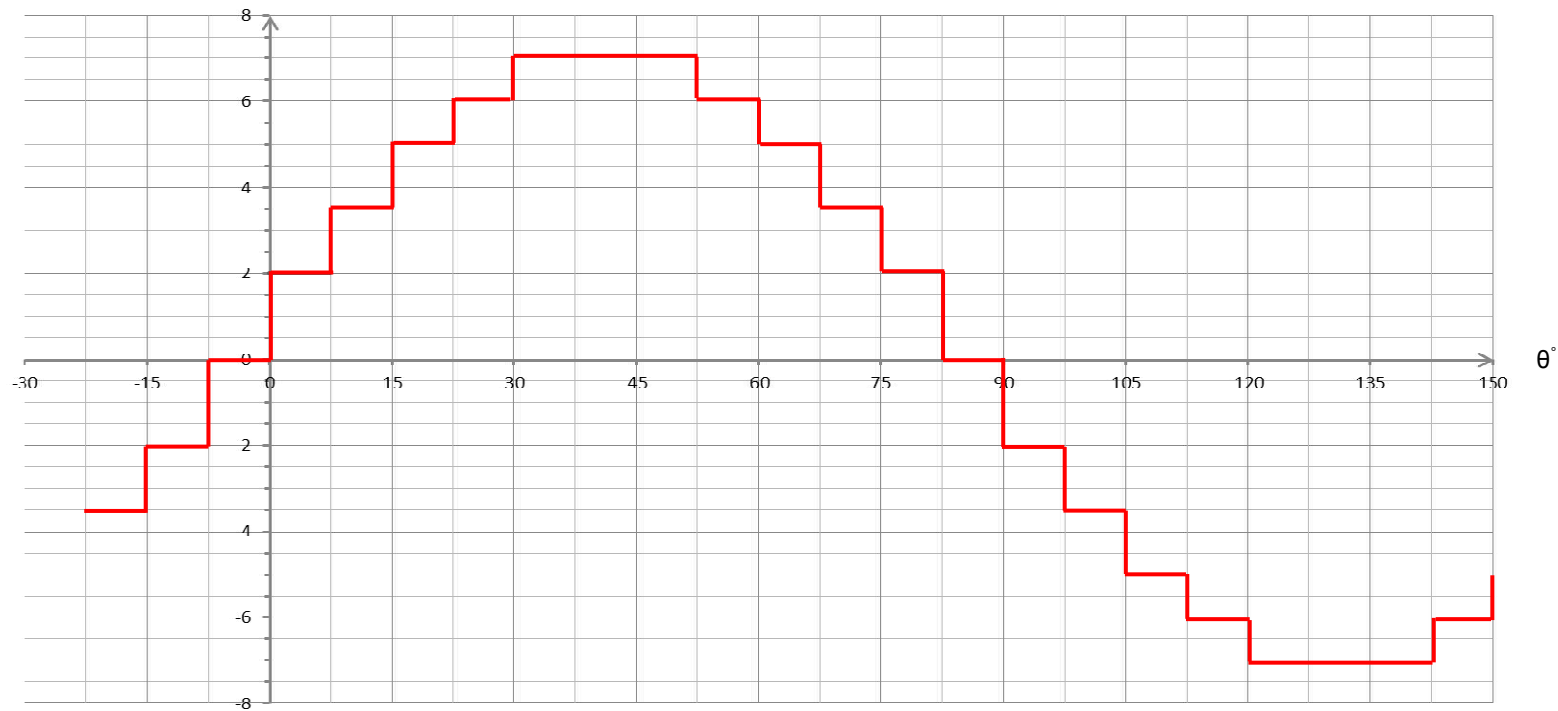


Diagramme n°2 – Bobinage à pas raccourci sur deux couches

Question B.2.3.

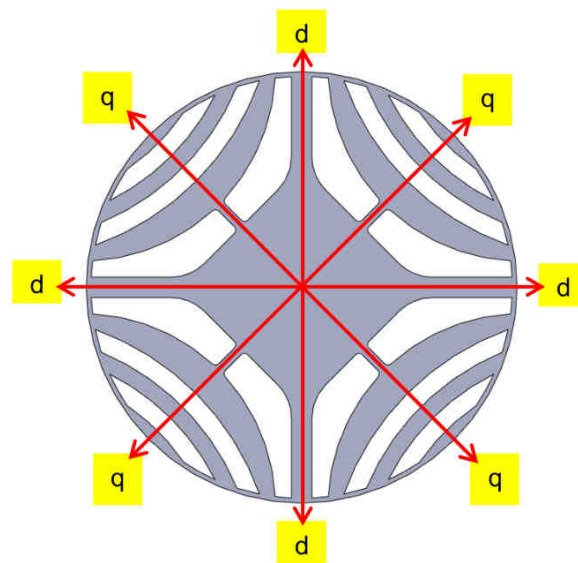


Figure 1 – Coupe transversale du rotor ABB

DOCUMENT RÉPONSE C

Question C.2.2.

Le contour doit être tracé pour une spire diamétrale d'une bobine d'un enroulement tétrapolaire. Le stator possède 36 encoches.

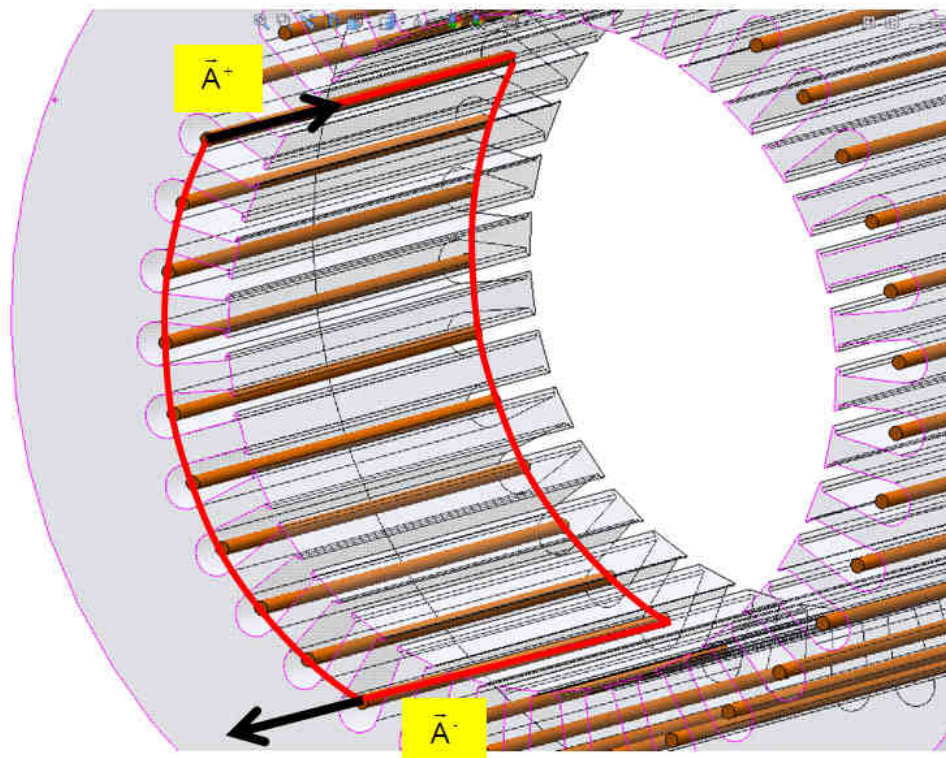


Figure 1 – Calcul du flux à partir du potentiel vecteur

DOCUMENT RÉPONSE D

Questions D.1.1. et D.1.2.

Tableau 1 – Expressions des différentes tensions

S1	S2	S3	u_{ab}	u_{bc}	u_{ca}	v_a	v_b	v_c	v_α	v_β
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	V_{DC}	0	$-V_{DC}$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	$\frac{-V_{DC}}{3}$	$\frac{-V_{DC}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}$	0
1	1	0	0	V_{DC}	$-V_{DC}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{-2V_{DC}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{DC}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}$

Questions D.1.3. et D.1.5.

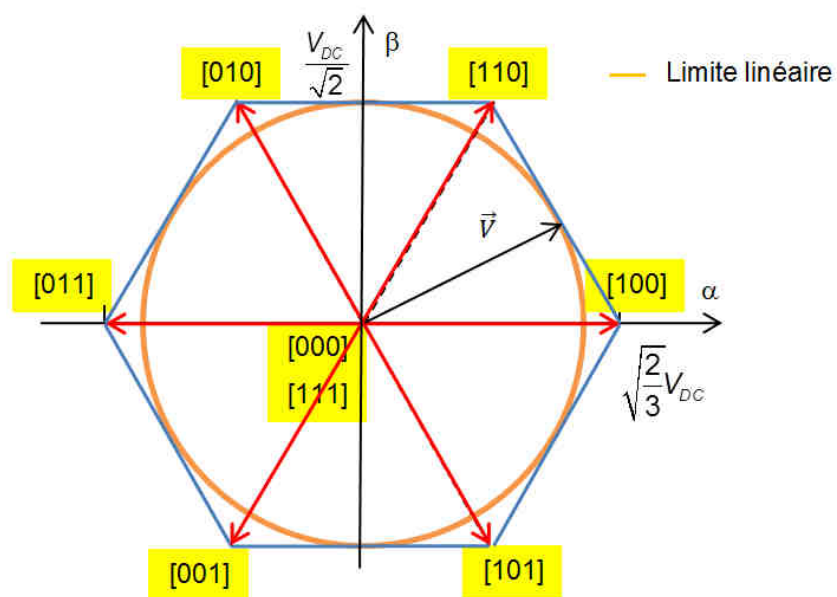


Figure 1 – Diagramme des phaseurs spatiaux dans le repère (α, β)

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

Cette épreuve, d'une durée de six heures et de coefficient 1, est spécifique à l'option choisie. À partir d'un dossier technique comportant les éléments nécessaires à l'étude, l'épreuve a pour objectif de vérifier les compétences d'un candidat à synthétiser ses connaissances pour proposer ou justifier des solutions de conception et d'industrialisation d'un système technique dans le domaine de la spécialité du concours dans l'option choisie.

1. Présentation du sujet

Le sujet de cette épreuve s'appuie sur la problématique de l'optimisation du coût énergétique d'une station de pompage. Le contexte est celui de la station de pompage et de traitement d'eau de Griesheim – sur – Souffel dont les moteurs d'entraînement des différentes pompes constituent la principale source de consommation d'énergie électrique. L'objectif du sujet est, d'une part, de chiffrer les économies réalisables en remplaçant la machine anciennement installée par une machine synchrone à réluctance variable (MSRV) et, d'autre part, d'étudier le fonctionnement de cette nouvelle technologie de moteur afin d'identifier les éléments de conception et les paramètres de commande qui permettent de justifier ou d'optimiser son rendement.

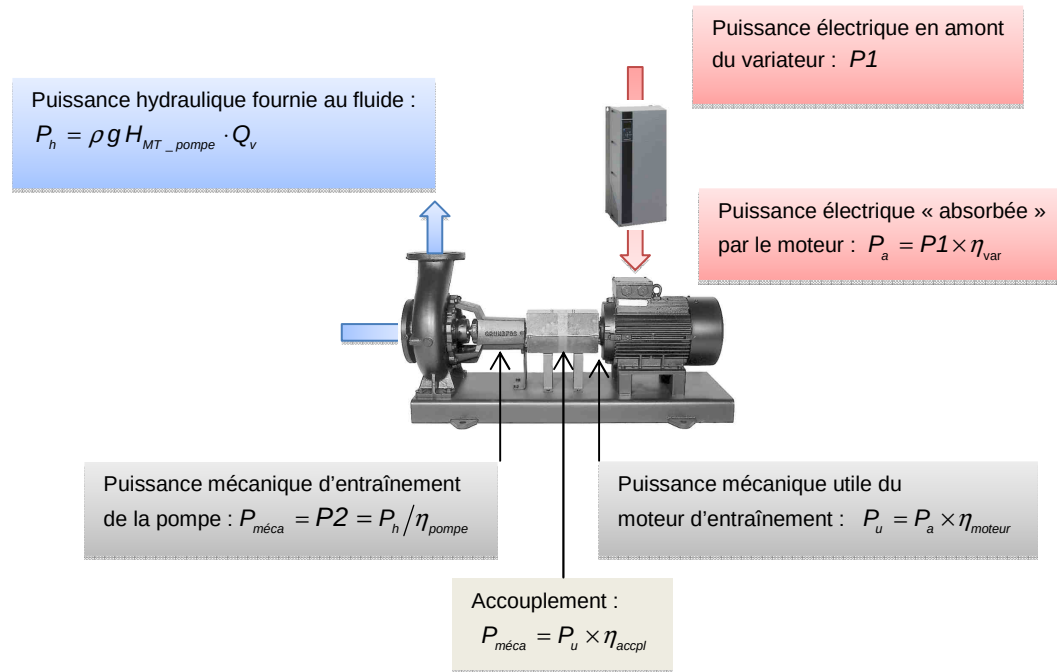
2. Analyse globale des résultats

Les différentes parties du sujet sont traitées de manières très inégales par les candidats. La partie A, largement pluridisciplinaire, bénéficie du meilleur traitement et des meilleurs résultats. Les parties B et C sont plus sélectives : seuls les candidats possédant de bonnes compétences en ingénierie électrique et une maîtrise de la représentation d'état en tirent profit. Les parties nécessitant le plus de capacités d'interprétation (C3, D2 et D3) sont souvent délaissées ou « maltraitées ».

3. Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux candidats

Partie A

La partie A1 consiste à dimensionner le moteur du départ étudié en appliquant de façon simplifiée le théorème de Bernoulli à partir des exigences de débit, du dénivelé et des pertes de charges de la canalisation menant au château d'eau. Le niveau de questionnement correspond à celui de la partie dynamique des fluides du programme de BTS Électrotechnique. Cette partie transversale est bien traitée par une majorité de candidats. Les principales difficultés rencontrées sont le calcul de la puissance hydraulique à partir de la hauteur manométrique totale de la pompe et une confusion entre les différentes puissances mises en jeu. Le jury rappelle aux candidats qu'une « équation aux unités » permet souvent de retrouver ou de vérifier l'homogénéité d'une relation.



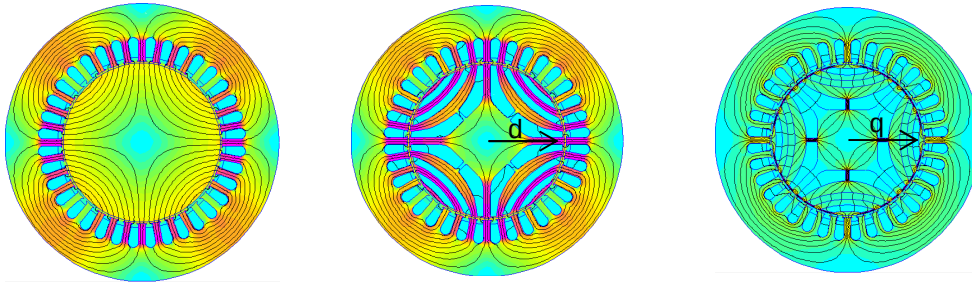
La partie A2 propose de calculer le coût énergétique associé à différents points de fonctionnement de la pompe en comparant les deux déclinaisons de la MSRV du fabricant ABB (High output et IE4) avec le moteur asynchrone d'origine associé à la pompe. Peu de candidats ont mené jusqu'au bout les calculs des différents coûts. La compréhension et l'exploitation de documentations techniques ainsi que la capacité à mener des calculs justes sont autant de compétences attendues par le jury. Les candidats doivent s'exercer à lire et à exploiter des notices techniques d'appareils ou de systèmes. Une maîtrise minimale de l'anglais écrit est indispensable.

Partie B

Les parties B1 et B2 sont consacrées respectivement au bobinage du stator et à l'identification des axes d et q du rotor de la MSRV. Le bobinage doit être optimisé pour limiter l'influence des harmoniques et le rotor doit posséder intrinsèquement une forte asymétrie magnétique pour générer un couple de réluctance significatif. Peu de candidats savent traiter correctement ces deux parties. Les candidats à l'option Ingénierie Électrique ne peuvent cependant pas écarter de leur formation le fonctionnement des moteurs et doivent avoir un minimum de culture « électrotechnique » à propos de leur constitution. Un moteur ne doit pas être réduit à une boîte noire contenant un système d'équations différentielles ou à un schéma électrique équivalent. Il est important de comprendre comment est réalisée la conversion, réversible, d'énergie électrique en énergie mécanique. La machine synchrone à réluctance variable est peut-être en ce sens la plus simple des machines tournantes dans son fonctionnement et sa modélisation puisqu'elle exploite uniquement le couple de réluctance dont l'origine est simplement la force d'interaction entre un aimant et une pièce ferromagnétique. A cet égard :

- la répartition des conducteurs d'un enroulement dans les encoches du stator a pour objet de créer une force magnétomotrice sinusoïdale. L'alternance du sens (entrant ou sortant) des conducteurs et le nombre de bobines élémentaires déterminent le nombre de paires de pôles du champ magnétique créé. L'alimentation triphasée des trois enroulements crée un champ magnétique tournant multipolaire ;
- le rotor, de par sa géométrie et ses matériaux, présente une forte dissymétrie magnétique. Les directions de faible réluctance qui permettent de canaliser les lignes de champs (axes d) ont

naturellement tendance à s'aligner et à suivre les directions où la force magnétomotrice est maximale. La forte réluctance des directions d'axes q est réalisée grâce à l'air des « barrières de flux ». L'illustration suivante permet de comprendre la géométrie et l'influence de ces barrières :



La partie B3 permet de vérifier les performances annoncées par le fabricant en exploitant des données issues d'essais réalisés en laboratoire. Beaucoup de candidats sont très approximatifs, par exemple sur la définition du facteur de puissance ou même sur la localisation des mesures : le courant moteur n'est pas égal au courant de ligne en amont du variateur ! La définition du taux de distorsion en harmoniques n'est par ailleurs pas connue.

Partie C

Un moteur est un générateur de couple, la vitesse en est une conséquence. Comme pour toutes les machines tournantes à courant alternatif, l'équation du couple, établie dans le repère du stator, est trop complexe pour pouvoir être exploitée dans un objectif de commande en temps réel à implanter dans un variateur. Le changement de repère associé à la transformation de Park permet de simplifier les équations en rendant constants les coefficients d'auto et de mutuelle inductance entre les enroulements. L'objectif de la partie C1 est d'établir l'expression simplifiée du couple dans le repère « dq » du rotor. Beaucoup de candidats n'arrivent pas à gérer mathématiquement une transformation au niveau matriciel. D'une manière générale, en appelant $\mathbf{P}$ la matrice de transformation de Park, le point de départ de la réécriture des équations matricielles consiste à remplacer chaque vecteur $\mathbf{x}_{abc} = [x_a \ x_b \ x_c]^T$ par $\mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{x}_{dq0}$ puis à multiplier l'équation obtenue par $\mathbf{P}$ pour isoler $\mathbf{x}_{dq0}$.

L'optimisation géométrique du rotor de la machine synchrone à réluctance variable n'aurait pas pu être réalisée sans l'utilisation d'outils de simulation numériques. Les candidats sont vivement incités à utiliser des logiciels d'analyse par éléments finis, quel que soit le champ d'application, pour se familiariser avec la définition des domaines et des conditions limites. La partie C2 est dédiée à l'étude d'une méthode mise en œuvre par ces logiciels pour calculer le champ électromagnétique et toutes ses grandeurs dérivées, en particulier les coefficients d'inductances. La connaissance du potentiel vecteur $\vec{A}$ du champ magnétique $\vec{B}$ est nécessaire à la résolution de cette partie. Le calcul du flux à travers la surface d'une bobine est réduit au calcul de la circulation de $\vec{A}$ le long du contour de cette surface : $\varphi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint \text{rot} \vec{A} \cdot d\vec{S} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}$ (formule de Stokes) et devient un simple produit scalaire dans une modélisation 2D.

Peu de candidats ont réussi à interpréter l'ondulation du couple de la machine illustrée en partie C3. La saillance du rotor est à la base de son fonctionnement mais la saillance non négligeable du stator, due à la profondeur de ses encoches, est sa principale source de perturbation. L'épreuve d'admissibilité ne se résume pas à une épreuve de mise en équation ou de calculs. Les candidats doivent être capables d'interpréter des résultats et de les confronter à leur compréhension du

problème. Les pistes exploitables ici pour déterminer l'origine de l'ondulation sont la période de l'ondulation estimable à partir de la figure C4 ainsi que le texte d'introduction qui précise les hypothèses qui ont conduit en C2 à une expression simplifiée exempte d'ondulation : « *L'influence des harmoniques d'espace, en particulier ceux de denture et de perméance, a aussi été négligée* ».

Partie D

La partie D1 aborde la commande vectorielle de l'onduleur du variateur nécessairement associé à la MSRV. Les premières questions très classiques sont bien traitées mais l'étude de l'électronique de puissance des convertisseurs nécessite d'être approfondie autant du point de vue du dimensionnement des composants que du point de vue de la commande. Seule une minorité de candidats sont capables d'établir les expressions permettant le calcul des durées de conduction des transistors. Ce sont pourtant ces calculs qui sont implantés dans les DSP dédiés.

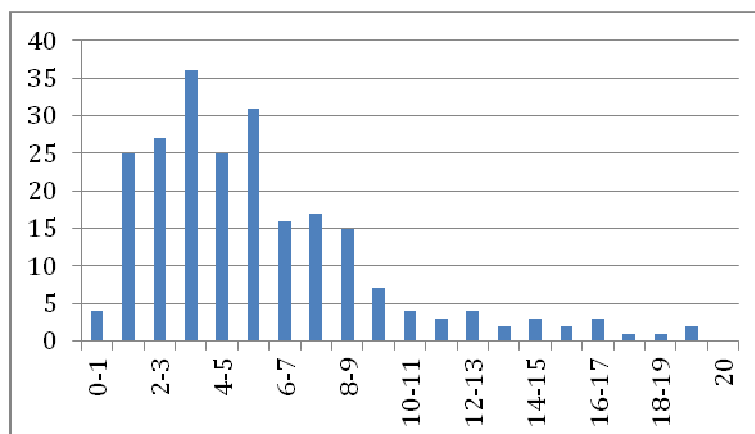
La partie D2 débute avec la représentation d'état de la MSRV dans le repère « dq » du rotor. Les résultats obtenus sont binaires : les candidats qui ne maîtrisent pas ce formalisme ont généralement abandonné cette partie et la suivante, ce qui est regrettable. La représentation d'état est le point de départ de la synthèse de la plupart des modèles ou systèmes de commandes récents. La commande en régime glissant appartient à la catégorie des commandes à structure variable de par la discontinuité (dans l'espace d'état) d'une de ses composantes. Beaucoup de candidats ont renoncé à traiter cette partie alors que toutes les questions sont abordables sans aucun prérequis. L'idée directrice est d'attirer et de maintenir le vecteur d'état du système commandé sur une surface qui répond, avec une dynamique qui lui est propre, aux objectifs de la commande. La composante discontinue peut être vue, de façon très simplifiée, comme une commande de type « tout ou rien » qui maintient le vecteur d'état sur la surface. Elle est à l'origine du phénomène néfaste de « chattering » (oscillation haute fréquence) qui peut être résolu avec des choix de surfaces plus complexes que celles envisagées dans le sujet.

Le filtre de Kalman, étendu aux systèmes non linéaires (EKF), proposé dans la dernière partie du sujet est un estimateur d'état. Hormis la discrétisation de la représentation d'état qui pose toujours problème aux candidats qui ne possèdent pas les bases du calcul matriciel, la fin du questionnaire repose sur l'identification des étapes de prédiction et de mise à jour dans l'algorithme proposé. Les candidats ayant des bases de programmation en langage structuré ont facilement identifié les lignes de codes concernées. Pour les autres, le jury leur recommande de faire un effort pour s'aguerrir à cet exercice en prenant par exemple comme support un automate ou un microcontrôleur : les applications ne manquent pas.

4. Conclusion

La réussite à l'épreuve d'admissibilité est conditionnée par une préparation sérieuse au concours. Les candidats doivent posséder les outils de modélisation et de résolutions suffisants (résolutions de systèmes d'équations différentielles, calcul matriciel, calcul intégral) pour ne pas être limités dans la progression du sujet. Surtout, ils doivent être capables de rattacher un sens physique aux modèles mathématiques ou électriques qu'ils exploitent. Il est en outre indispensable d'avoir une culture technologique actualisée, aussi bien au niveau du matériel que des outils logiciels exploités dans l'enseignement et dans l'industrie, en particulier pour la modélisation et la simulation des systèmes ou des procédés.

5. Résultats



228 copies ont été évaluées. La moyenne des notes obtenues est de 5,68/20. L'écart-type est 3,81. La meilleure note est 20/20. La plus faible est 0,5/20.

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

Etude des gains énergétiques d'un Chauffe-Eau Thermodynamique Individuel et plus spécifiquement de la pompe à chaleur qui est un des constituants du système.

Première phase – Manipulation expérimentale au laboratoire

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

Des solutions de production d'ECS de plus en plus performantes sont donc appelées à se développer sur le marché, et le Chauffe-Eau Thermodynamique Individuel (CETI) en fait partie.

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

Le but de l'étude est de :

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

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

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

Problématique

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

Partie 1 : Comprendre le fonctionnement global (≈ 0h30)

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

En manipulant le système à l'aide du dossier technique et ressource :

- **prendre possession** de l'ensemble en :
 - effectuant une mise en fonctionnement par l'intermédiaire du serveur WEB sur une durée de moins de cinq minutes ;
 - notant les valeurs de chaque sonde de température ;
 - en lisant le dossier technique de la page 1 à 11.
- **présenter brièvement**, à l'examineur de salle :
 - sous forme de schémas à main levée à votre convenance, **une analyse structurelle** du système ;
 - une **analyse qualitative** de la nature et de l'état du fluide dans les différents éléments de la structure ;
 - **l'adresse de base du réseau** auquel appartient la PAC, ainsi que le nombre de machines connectables sur ce même réseau.
 - **les adresses « réservées »** sur un tel réseau (le masque de sous réseau est 255.255.255.0) ;
 - la **fonction** des différents capteurs présents sur le système.

Partie 2 : Questionnement aidant à répondre aux problèmes techniques proposées (≈2h00)

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

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

- 2.1.1 **Procéder**, à une série de 6 mesures sur 30 minutes permettant de déterminer le COefficient de Performance COP expérimental de la pompe à chaleur, et son évolution en fonction du temps. **Relever**, lors des mesures, la température d'eau du bac.
- 2.1.2 **Comparer** sur le diagramme de Mollier (P, h) le cycle Rankine fourni représentant le fonctionnement en régime permanent de la PAC avec vos mesures.
- 2.1.3 **Mettre en évidence et justifier** les écarts entre les COP mesurés et ceux déterminés à partir des modèles de comportement thermodynamique choisis : modèle de Rankine.
Conclure quant à la pertinence de ces modèles pour décrire le comportement réel de la PAC.

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

Les informations nécessaires sont présentes dans les documents « SchémaelecPAC+S7-1200.pdf » et « S71200_easybook.fr.pdf » page 266.

- 2.2.1 **Identifier** le type de capteur permettant la mesure de la température en entrée de l'échangeur, le type de montage (2/3 ou 4 fils).
L'équation modélisant le comportement du capteur ($\alpha = 0,003850$ en $^{\circ}\text{C}^{-1}$) dans la plage de mesure donnée par le constructeur est $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$. **Tracer** la courbe correspondante.
- 2.2.2 A l'aide des fichiers de simulation MatLab « 2_fils » et « 4_fils », **réaliser** une simulation permettant de mettre en évidence le(s) avantage(s) du montage 4 fils par rapport au

montage 2 fils dans le cas fictif où la PT 100 serait implantée à 50 m de l'électronique reliée par un câble AWG24 résistivité linéique de $85 \text{ ohms}\cdot\text{km}^{-1}$ pour une mesure de température à 0°C et un courant $I_{\text{mesure}} = 0,01 \text{ A}$. **Justifier** vos résultats par la théorie.

Valider le choix technologique fait pour la PAC fournie.

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

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

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

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

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

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

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

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

2.4 Modélisation d'un chauffe-eau thermodynamique.

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

Identifier les écarts entre la maquette et ce produit industriel.

Justifier de l'intérêt d'utiliser un tel chauffe-eau par rapport à un chauffe-eau électrique traditionnel.

Partie 3 : Problématique pédagogique expérimentale (≈ 1h30)

Objectif : **Présenter** au jury en salle (troisième phase citée en introduction page 3/7), les éléments nécessaires pour l'exploitation en travaux pratiques, au niveau demandé par le sujet et en relation avec la problématique technique indiquée ci-après.

3.1 Niveau et situation de l'exploitation pédagogique

Au terme de tout ou partie des analyses et des manipulations précédentes, le candidat devra définir une séquence de travaux pratiques (en lien avec le travail précédent) :

Niveau : Terminale STI2D en enseignement technologique transversal ;

Positionnement dans l'année : premier trimestre ;

Connaissance du matériel : les élèves ont déjà manipulé le système ;

Objectif de formation :

Décoder l'organisation fonctionnelle, structurelle et logicielle d'un système

Utiliser un modèle de comportement pour prédire un fonctionnement ou valider une performance

Compétences attendues (programme sous forme numérique) :

CO4.1. Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un système ainsi que ses entrées/sorties ;

CO4.4. Identifier et caractériser des solutions techniques relatives aux matériaux, à la structure, à l'énergie et aux informations (acquisition, traitement, transmission) d'un système

CO5.1. Expliquer des éléments d'une modélisation proposée relative au comportement de tout ou partie d'un système

CO5.2. Identifier des variables internes et externes utiles à une modélisation, simuler et valider le comportement du modèle

CO5.3. Évaluer un écart entre le comportement du réel et le comportement du modèle en fonction des paramètres proposés

Connaissances visées

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

Problématique technique du TP :

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

Démarche pédagogique

Ressources pour le cycle terminal, Enseignements technologiques transversaux et enseignements spécifiques (série STI2D) page 112 à 162.

Lors de son exposé, le candidat devra :

- situer l'activité expérimentale dans la séquence pédagogique ;
- expliciter les connaissances et les compétences visées par la séance et les moyens de leur évaluation ;
- définir la démarche des activités réalisées par les élèves dans la séance ;
- proposer et justifier un (des) protocole(s) expérimental (aux) ;
- valider le(s) protocole(s) expérimental (aux).

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

Objectifs 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 de systèmes informatiques associés à des logiciels de traitement, de simulation, de représentation ;
- analyser et vérifier ou comparer les performances de tout ou partie de ce système pluritechnique, notamment à partir de modèles de comportement et de mesures ;
- 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 ;
- 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. La séquence prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par le candidat au cours des activités pratiques.

L'exploitation pédagogique proposée, directement liée aux activités pratiques réalisées, est relative à l'enseignement technologique transversal du cycle terminal de la série sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D), à l'enseignement de sciences de l'ingénieur de la série S et à celui des sciences industrielles de l'ingénieur des classes préparatoires aux grandes écoles. Au cours de son exposé, le candidat est invité à préciser l'organisation et la structuration des groupes d'élèves ou d'étudiants dont il a la charge.

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 – Activités pratiques (durée 4 h).

Cette première phase se déroule dans un laboratoire dans lequel sont mis à disposition de chaque candidat un système pluritechnique, un environnement numérique de travail relié à l'Internet (sites publics uniquement), des moyens de mesurage et, si besoin, des logiciels spécifiques d'acquisition ou de simulation.

Cette phase elle-même se décompose en trois parties dont les durées et les attendus sont définis précisément.

Première partie (durée ≈ 0h30)

La première partie, brève, vise à aider le candidat à saisir le fonctionnement global du système pluritechnique support de l'activité pratique. Une étude fonctionnelle et structurelle ainsi que quelques activités lui permettent de se l'approprier rapidement. À la fin de ce premier temps, l'examineur s'assure que le candidat a bien atteint cet objectif.

Deuxième partie (durée ≈ 2h00)

La deuxième partie est consacrée à la résolution d'une problématique. Le questionnement du sujet et les échanges avec l'examineur permettent de mobiliser les compétences et les connaissances technologiques et scientifiques associées, communes aux trois options, caractéristiques du niveau de l'agrégation. Cette partie concourt à préparer la suivante en ouvrant des pistes techniques variées en vue de futures exploitations pédagogiques.

Troisième partie (durée ≈ 1h30)

Ce dernier temps est destiné à la construction d'une trame de séquence pédagogique et à l'élaboration d'une séance incluse dans celle-ci. À ce stade, le candidat dispose des travaux déjà réalisés qu'il peut compléter par des manipulations ou des mesures destinées à valider ses choix pédagogiques et à étayer la conception détaillée des activités proposées.

La phase 2 – préparation de l'exposé (durée 1 h).

Le candidat prépare la présentation qu'il effectuera devant le jury. Durant cette phase de préparation de l'exposé, le candidat dispose toujours d'un poste informatique relié à l'Internet (sites publics uniquement), des logiciels courants de bureautique, des caractéristiques du système pluritechnique et de ses résultats obtenus lors de la phase 1.

La phase 3 – exposé devant le jury (durée 1 h).

L'exposé oral, d'une durée maximale de 40 minutes, comporte :

- la présentation succincte du système pendant 5 minutes, au plus ;
- la restitution des activités et des principaux résultats obtenus au cours de la deuxième partie de la première phase pendant 5 minutes, ou moins ;
- l'exploitation pédagogique d'une durée maximale de 30 minutes.

L'entretien qui suit, avec le jury, dure 20 minutes.

Le candidat est amené au cours de sa présentation orale à :

- mettre en évidence les informations, les données et les résultats issus des investigations conduites au cours des activités pratiques ;
- qualifier la pertinence du système pluritechnique au regard de la séquence pédagogique demandée ;
- décrire et situer la séquence de formation dans une progression pédagogique du niveau de formation imposé ;
- préciser les compétences et les connaissances associées visées par cette séquence ;
- présenter la structure de la séquence pédagogique et justifier la succession des activités proposées pour répondre aux objectifs de formation ;
- préciser la problématique technique de la séance à laquelle devront finalement répondre les activités proposées ;
- identifier les prérequis nécessaires à cette séance ;

- préciser, avec réalisme, l'organisation de cette séance autant du point de vue matériel (choix des ressources matérielles), qu'humain (nombre et tailles des groupes d'élèves, travail en projet, travail en îlot) ; détailler les activités proposées aux élèves lors de la séance ;
- présenter les résultats expérimentaux ou de simulation attendus et les conclusions qui permettent de répondre à la problématique énoncée initialement ;
- définir les stratégies d'évaluation des acquis des élèves.

Au cours de l'entretien, le jury peut demander au candidat de préciser certains points de sa présentation et d'en approfondir quelques éléments.

Lors de la présentation devant le jury, le candidat dispose d'un vidéoprojecteur et d'un poste informatique relié à l'Internet, doté des logiciels courants de bureautique. Le candidat accède à toutes les productions numériques réalisées pendant les phases 1 et 2 de l'épreuve.

Les systèmes pluritechniques retenus, lors de la session 2016, ont été les suivants :

- un banc d'étude sismique ;
- un banc de transmission thermique ;
- un robot collaboratif ;
- une monture de télescope ;
- un compacteur de déchets ;
- un banc de pompe à chaleur ;
- une maquette de pont levant ;
- un système de ventilation mécanique double flux.

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

- identification des comportements de constituants ou d'un système ;
- mesure de comportement de constituants ou d'un système ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne de mesure ;
- détermination des paramètres significatifs d'une chaîne d'énergie ;
- détermination des paramètres significatifs d'une modélisation ;
- optimisation d'un modèle ;
- choix des modèles de comportement ou de connaissance ;
- validation de modèles ;
- simulation et prédiction de performances ;
- évaluation des écarts entre les performances souhaitées, mesurées ou simulées.

2. Analyse globale des résultats

Le jury constate que le niveau de qualité des prestations des candidats est fortement contrasté. Les candidats, tout à la fois bien préparés et pertinents, savent mobiliser à bon escient et conjointement compétences et connaissances pour répondre à la problématique soumise en positionnant correctement leur future exploitation pédagogique. Les prérequis, les objectifs, les démarches et contenus pédagogiques ainsi que les moyens de l'évaluation sont bien assimilés et correctement mis en œuvre lors de l'exposé oral. Il en résulte que ces candidats produisent une présentation orale de qualité.

Un certain nombre de candidats, disposant d'une réelle culture pluritechnique et d'un bon sens technique affirmé, sont bien préparés à la conduite des expérimentations et à l'exploitation des résultats. Toutefois, ils n'abordent que partiellement l'exploitation pédagogique des manipulations, ce qui grève significativement la qualité de leur exposé et hypothèque leur réussite au concours.

Un nombre restreint de candidats ne réalise que quelques rares manipulations. Cela est généralement dû à une connaissance parcellaire des champs scientifiques et technologiques à mobiliser. De plus, la qualité de raisonnement et la rigueur ne sont pas au niveau attendu d'un candidat à l'agrégation. L'exploitation pédagogique associée est alors décevante.

3. Conseils aux futurs candidats

Compréhension du système pluritechnique support des activités pratiques

Pour cette partie, les activités ont pour objectif de faciliter la compréhension du fonctionnement global du système, de s'approprier le support du travail pratique et la problématique proposée. Les candidats disposent d'un dossier technique, d'un dossier ressource ainsi que diverses ressources numériques. Le système proposé au candidat peut être le système réel ou un système didactisé.

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

- il convient de maîtriser le raisonnement scientifique et la caractérisation des échanges d'énergie, de matière et d'information à un niveau de généralité qui permette de s'adapter à une diversité de systèmes ;
- l'extraction des informations pertinentes des ressources mises à disposition constitue un préalable indispensable à l'appropriation du système et de la problématique proposée par le sujet ;
- les analyses externes et internes des systèmes gagnent en pertinence lorsqu'elles sont appuyées sur des outils formalisés de l'analyse fonctionnelle et structurelle ;
- une bonne culture personnelle pluritechnique, fondée sur l'observation et l'analyse de systèmes variés et modernes, est un atout certain.

Résolution de la problématique et exploitation des résultats

Pour cette partie de l'épreuve, le candidat est amené à :

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

Le jury assiste le candidat en cas de difficultés matérielles ou logicielles. La connaissance de l'ergonomie des systèmes et la maîtrise des logiciels ne sont pas exigées.

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

- lire et analyser l'ensemble du sujet proposé ;
- s'approprier la problématique ;
- maîtriser la durée consacrée à chaque activité ;
- mener les expérimentations avec un souci de rapidité et d'efficacité pour en assurer l'exploitation pédagogique ultérieure en respectant les règles de prévention des risques et la sécurité ;
- maîtriser les outils d'analyse courants (structurels et fonctionnels) ;
- exploiter l'ensemble des résultats des expérimentations et des mesures et les interpréter dans leur totalité et de façon rigoureuse ;
- corréler les résultats des simulations et des expérimentations en les associant à des phénomènes physiques et à des mesures effectuées par les logiciels d'acquisition ;

- effectuer une analyse critique des résultats expérimentaux et simulés ;
- mettre en œuvre une démarche de résolution du problème technique posé ;
- proposer aux examinateurs une présentation et/ou justification des protocoles ;
- justifier les écarts constatés entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation ;
- utiliser un vocabulaire concis et adapté.

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 industrielles de l'ingénieur.

Conception d'une activité pédagogique à caractère expérimental

Une problématique pédagogique expérimentale étant proposée, le candidat doit préparer la trame détaillée de sa séquence pédagogique dans laquelle il décrit plus particulièrement une séance pédagogique à caractère expérimental. Il précise les manipulations nécessaires et les protocoles de mesure permettant de répondre à la problématique.

Le jury attire l'attention des candidats sur l'importance première à accorder à cet aspect de l'épreuve qui aboutit, après une phase de 1h30 de conception de la séquence pédagogique et d'expérimentations associées, suivie d'une heure de préparation de l'exposé, à une présentation de 40 minutes et à un échange de 20 minutes avec le jury. Dépasser la durée recommandée en partie 2 de la phase 1, pour compléter quelques activités supplémentaires, est rarement pertinent et obère souvent la qualité de la séance à caractère expérimental présentée dans le cadre de la séquence.

En effet, si les outils et méthodes de l'ingénierie pédagogique doivent être connus et maîtrisés, il n'en reste pas moins que le contenu de la séance pédagogique à caractère expérimental doit être circonstancié et contextualisé, argumenté et motivé au vu du système qui vient d'être étudié. Le jury ne peut se satisfaire d'un exposé de pédagogie formel. Il souhaite qu'il soit fait preuve d'imagination et de créativité dans le contenu pédagogique présenté afin de susciter l'intérêt et la motivation des élèves.

De plus, le jury invite les candidats, lors de la conception de la séquence pédagogique, à :

- définir la place de la séquence proposée dans une progression pédagogique pour le niveau proposé ;
- décrire le fil directeur et la succession pertinente des séances ;
- préciser de façon argumentée la place de l'exploitation pédagogique développée ensuite dans la séquence, en précisant bien l'intérêt des séances précédentes et suivantes ;
- choisir et énoncer la problématique technologique qui peut être énoncée sous forme interrogative à laquelle la séance développée s'attache à répondre ;
- dégager et formaliser les objectifs pédagogiques (compétences à faire acquérir et connaissances associées à transmettre en corrélation avec les programmes officiels) ;
- analyser le choix de la modalité pédagogique en vue de répondre à l'objectif de la séance ;
- structurer une démarche cohérente conduisant à la transmission de compétences nouvelles au niveau imposé ;
- proposer des protocoles expérimentaux et analyser les résultats obtenus ;
- exploiter pleinement la durée de préparation de l'exposé.

Le jury conseille aux futurs candidats de prendre connaissance préalablement et attentivement des programmes et des objectifs de formation de la série S (option sciences de l'ingénieur), de l'enseignement technologique transversal de la série STI2D, et des CPGE, ainsi que les commentaires associés. L'appréhension de ces programmes, ainsi que la lecture des documents

« Ressources pour faire la classe » et des guides d'équipement, leur permettra de proposer une exploitation pédagogique en adéquation avec le niveau imposé. Une réflexion pédagogique sur les objectifs de formation est indispensable pour cette partie. Les candidats ne doivent pas hésiter à intégrer dans leur séquence de formation des outils comme la démarche d'investigation, la démarche de l'ingénieur ou encore le projet.

Présentation orale devant un jury

Le jury attend lors de cette phase de restitution des investigations menées et de présentation de la séquence pédagogique que le candidat soit capable de :

- présenter la pertinence du système par rapport à la séquence pédagogique demandée (à partir des activités menées dans la partie I) ;
- présenter le ou les protocoles expérimentaux mis en œuvre, analyser succinctement les résultats obtenus en cohérence avec la séquence demandée (à partir des activités de la partie II) ;
- situer la séquence de formation en l'inscrivant dans la formation au niveau requis ;
- expliciter les connaissances et les compétences visées par la séance ;
- situer l'activité expérimentale dans la séquence pédagogique ;
- définir l'enchaînement des activités réalisées par les élèves dans la séance ainsi que les résultats attendus ;
- présenter les moyens de l'évaluation des connaissances et compétences acquises par les élèves ou étudiants.

Le jury attend également du candidat qu'il mette en œuvre des qualités professionnelles telles que :

- la clarté, la rigueur et le dynamisme de l'expression ;
- la pertinence et la réactivité aux questions posées ;
- l'aptitude à dégager l'essentiel et à donner du sens aux activités proposées.

Le jury a été extrêmement attentif au positionnement des candidats sur le respect des valeurs et des principes de la République. Ces points ont été systématiquement abordés et ont fait l'objet de questions au travers de mises en situations pédagogiques ou de conduite de classe. Ils sont plus précisément décrits dans le paragraphe spécialement consacré à la contribution des sciences industrielles de l'ingénieur à la construction des valeurs et principes de la République. Une connaissance du fonctionnement des EPLE est indispensable ainsi que du rôle et des missions de chacun de ses acteurs.

Le jury conseille aux candidats, qui n'en auraient pas eu la possibilité au cours de leur formation, de prendre contact avec un établissement scolaire dispensant les filières de formation visées par le concours (STI2D – SSI – CPGE) et de s'y déplacer afin de prendre connaissance des réalités matérielles, humaines et organisationnelles du terrain.

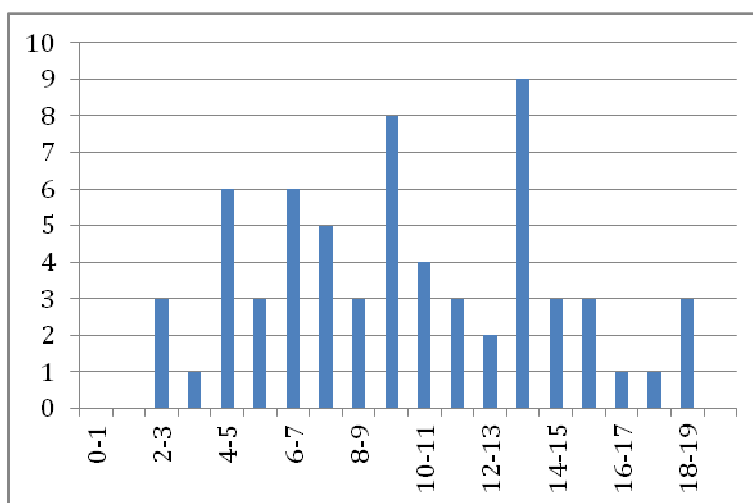
Comportement des candidats

L'exploitation pédagogique d'une activité pratique relative à l'approche globale et transversale d'un système pluritechnique ne s'improvise pas. Elle doit se préparer tout au long des formations conduisant à l'agrégation. Les candidats doivent éviter les présentations stéréotypées ne permettant pas de mettre en valeur la qualité de leur réflexion personnelle et leur esprit créatif. Ils doivent aussi éviter l'écueil d'un exposé bavard mais vide de sens et résister à la tentation de prolonger artificiellement l'exposé lorsque son contenu même fait défaut.

4. Conclusion

Cette quatrième session confirme que l'usage d'un laboratoire unique, composé de systèmes pluritechniques, commun aux trois options de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur, impose au candidat de s'approprier tous les champs disciplinaires transversaux liés au triptyque « matière, énergie et information ». Au-delà même de la juxtaposition des savoirs pluridisciplinaires indispensables pour réussir cette épreuve, cette session met aussi en évidence toute l'importance, pour un candidat, d'être réellement apte à appréhender les systèmes dans leurs globalités. L'ingénierie pédagogique à mettre en œuvre leur impose une bonne connaissance des différents programmes de formation et des objectifs de formation associés.

5. Résultats



64 candidats se sont présentés à cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 9,90/20. L'écart-type est 4,34. La meilleure note est 18,75/20. La plus faible est 02/20. La moyenne des candidats admis est de 12,32/20.

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

Convertisseur électromécanique pour éolienne

Le sujet s'intéresse à la conversion d'énergie dans le cadre d'une éolienne travaillant à vitesse variable. Outre la prise en main du système et la compréhension de sa commande réalisée sous LabView, il est demandé au candidat d'évaluer les performances de l'ensemble et de maîtriser les paramètres de réglage. Le candidat doit concevoir et organiser une séquence de formation en section de techniciens supérieurs en électrotechnique (STS Électrotechnique) ou en 2^{ème} année de Diplôme Universitaire de Technologie en Génie Électrique (DUT GEII) en développant des activités sur le système « Éolienne » fourni. À partir du référentiel de la formation, le candidat fait référence à un « emploi type » du technicien supérieur en électrotechnique. Il précise les fonctions et les tâches associées au développement de la séquence.

Les pistes suivantes sont proposées pour une exploitation du système « Éolienne » en STS Électrotechnique ou DUT GEII. En s'aidant du document ressource ou en utilisant le VI *Labview* «Éolienne», rédiger une série d'essais permettant de montrer la nécessité de mettre en œuvre, dans le cas d'une éolienne à pas fixe, un système de conversion électromécanique autorisant à travailler à vitesse variable. Afin d'illustrer cela les paramètres suivants sont fixés : diamètre de l'éolienne de 2 m, béta (pas de l'éolienne) de 8° et densité de l'air de 1,22 kg/m³.

Le système proposé met en œuvre une machine à courant continu simulant l'éolienne et une machine asynchrone à double alimentation (MADA) réalisant la conversion électromécanique. Cet ensemble peut fonctionner, soit en générateur autonome (l'éolienne alimente directement une charge), soit en générateur connecté au réseau (l'éolienne débite alors dans un réseau de puissance supposée infinie).

Dans le cas d'un fonctionnement autonome, une série d'essais (mesures et simulations), permettant de comprendre le fonctionnement de la MADA, doit être réalisée. En particulier, il est intéressant de :

- expliquer le fonctionnement de l'ensemble ;
- montrer l'influence des paramètres de réglage « amplitude et phase » du courant rotorique ;
- modéliser simplement le comportement de la MADA et de le rapprocher de celui d'une machine synchrone.

Dans le cas d'un fonctionnement connecté au réseau, une série d'essais (mesures et simulations), permettant de comprendre le fonctionnement de la MADA connectée au réseau, doit être réalisée. En particulier, il est intéressant de :

- expliquer les conditions de connexion au réseau ;
- montrer le rôle des paramètres de réglage sur le débit de puissance active et réactive ;
- montrer le sens des flux de puissances et d'expliquer les limitations du système proposé et les moyens d'y remédier ;
- proposer des solutions pour piloter les paramètres de réglage « amplitude et phase » du courant rotorique en fonction d'une consigne en puissance active et réactive.

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

Objectifs de l'épreuve

L'épreuve "activité pratique et d'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, d'acquisition, de traitement, de simulation, de représentation ;
- analyser et vérifier les performances d'un système technique, d'un procédé ou d'un processus, dans la spécialité du concours ;
- conduire des expérimentations, mener une analyse de solutions techniques pour résoudre une ou plusieurs problématiques ;
- 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. Cette séquence prend appui sur les investigations et les analyses effectuées au préalable par le candidat au cours d'activités pratiques relatives à un système technique.

Supports utilisés pour la session 2016

Les supports proposés permettent, à partir d'une analyse systémique globale, l'analyse d'un problème technique relatif à l'option Ingénierie électrique de l'agrégation externe de sciences industrielles de l'ingénieur.

Cœur de réseau VDI

Le sujet porte sur l'utilisation d'un système de diffusion numérique de type Voix-Données-Image (VDI). Le système proposé aux candidats, homothétique de celui disponible chez les grands acteurs actuels du multimédia et les fournisseurs d'accès internet, permet de découvrir les couches protocolaires nécessaires au bon acheminement des données chez le client. Par une approche progressive et guidée, le candidat est amené à s'approprier le système, puis à analyser son comportement dans quelques cas simples d'utilisation.

Système d'éclairage communicant par bus de terrain

Le sujet porte sur l'étude d'un système composé de ballast à tubes fluorescents gradables, commandés par un bus de terrain dédié aux applications d'éclairage. Le système fourni aux candidats permet de mettre en évidence les spécificités du bus de terrain utilisé.

Système d'étude des perturbations harmoniques sur un réseau

Le sujet s'intéresse à l'analyse de l'impact des harmoniques sur un réseau de distribution. Après la caractérisation des perturbations, le candidat est amené à mettre en œuvre différentes solutions de filtrages. Par un ensemble de mesures, le candidat doit qualifier chacune des solutions.

Système de traçabilité

Le sujet porte sur l'étude d'un système permettant de suivre des produits dans une chaîne de transformation. Après une phase de découverte des différents éléments logiciels et matériels, le candidat est amené à investiguer différentes voies d'optimisation de la rapidité de traitement de l'information. La démarche s'appuie sur un ensemble de relevés expérimentaux.

Moteur synchrone à réluctance variable

Le candidat doit réaliser la mise en service d'un départ « variateur – moteur » en partant d'une configuration « usine ». La mesure des inductances du moteur permet de confronter les valeurs obtenues à celles issues d'une simulation à réaliser en utilisant un logiciel d'analyse par éléments finis.

Système photovoltaïque

Le sujet porte sur l'étude d'un système photovoltaïque destiné à être installé sur un site isolé. Après une découverte du comportement des panneaux photovoltaïques et de leur association, le candidat doit s'intéresser à l'optimisation de la production de ce type de système.

Départ moteur communiquant

Le matériel mis à la disposition du candidat permet de réaliser la commande et la supervision d'un « démarreur – contrôleur » moteur par l'intermédiaire d'un bus de terrain de type CAN. La configuration de l'automate maître CANopen ainsi que le paramétrage du démarreur pour une commande directe de marche / arrêt d'un moteur asynchrone sont proposés au candidat.

Réseau de capteurs

Le sujet porte sur l'étude d'un réseau de capteurs communicants. Il est demandé au candidat de s'approprier le système par le biais de son installation et de sa configuration. Le candidat découvre ensuite différents types de réseaux et leurs caractéristiques.

Filtrage numérique

Le sujet porte sur la réalisation d'un filtre numérique pour le filtrage de signaux analogiques, depuis le gabarit (spécifications de filtrage) jusqu'à l'implantation et le test. La plateforme de développement EPISIP (CRESITT Industrie) utilisée est constituée d'une carte (intégrant DSP et FPGA) permettant l'acquisition, le traitement, la restitution de signaux et du logiciel associé permettant le calcul du filtre numérique et le contrôle de la carte.

La protection des biens et des personnes

Dans ce sujet, le candidat est amené à parcourir les différentes solutions de protections des biens et des personnes dans les installations basse tension. La démarche le conduit à qualifier une solution de protection vis-à-vis des contraintes réglementaires.

Composants radiofréquences (RF) passifs et actifs

Le sujet porte sur l'étude et la caractérisation de dispositifs passifs et actifs RF en vue de leur modélisation petit et fort signal. Pour réaliser ce travail, le candidat doit mettre en œuvre un banc de test utilisant des matériels d'instrumentation industrielle de la société Agilent Technologies tels qu'un analyseur de réseaux (ENA 5062A) et un analyseur de spectre (ESA E4402B).

Déroulement de l'épreuve

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

- phase 1 : activités pratiques d'une durée de 4 h ;
- phase 2 : préparation de l'exposé d'une durée de 1 h ;
- phase 3 : présentation devant le jury. Elle inclut un exposé de quarante minutes au maximum et un entretien qui le suit d'une durée de vingt minutes.

La proposition pédagogique attendue, directement liée aux activités pratiques réalisées, est relative aux enseignements technologiques de spécialité du cycle terminal sciences et technologies de l'industrie et du développement durable (STI2D) du lycée et des référentiels et programmes de BTS et DUT relatifs aux champs couverts par l'option Ingénierie électrique de l'agrégation.

En début d'épreuve le candidat tire au sort un sujet parmi les postes d'expérimentation proposés par le jury.

Activités pratiques

Durant les quatre heures passées dans le laboratoire, le candidat est accompagné par un membre du jury, chargé de le guider dans la mise en œuvre du système et dans ses choix matériels et/ou logiciels. Il est important dans cette partie que le candidat commence à réfléchir à la séquence pédagogique qu'il souhaite présenter en vue de réaliser les éventuelles expérimentations complémentaires qui lui seront nécessaires.

Préparation de l'exposé

Après les quatre heures d'activités pratiques, le candidat dispose d'une heure pour préparer son exposé. Durant cette phase, il dispose d'un ordinateur équipé de logiciels bureautiques ainsi que de toutes les données produites durant la première partie de l'épreuve, mais il n'a plus accès au système ni aux logiciels de simulation.

Présentation orale

Le candidat explicite sa démarche méthodologique, met en évidence les informations, données et résultats issus des investigations conduites au cours des activités pratiques qui lui ont permis de construire sa proposition pédagogique. Il décrit ensuite la séquence d'enseignement qu'il a construite ainsi que les activités qui la composent. L'accent doit être mis sur l'objectif visé, les stratégies mises en œuvre pour l'atteindre ainsi que l'évaluation qui en sera faite.

Entretien avec le jury

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

L'évaluation

Les candidats sont évalués à partir d'une grille de compétences identique pour tous les sujets. Cet outil, construit en trois parties (activités pratiques, soutenance et entretien), permet d'évaluer équitablement tous les candidats, selon les mêmes compétences et indicateurs. La première partie fournit une note sur 10 points. L'association de la deuxième et de la troisième partie fournit aussi une note sur 10 points.

2. Les attentes du jury

Partie pratique

Le jury attend d'un candidat à l'agrégation qu'il sache clairement identifier les objectifs de l'activité pratique proposée. Même si le candidat n'est pas expert dans le domaine sur lequel porte le sujet tiré au sort, les activités sont construites de façon progressive et abordable à un niveau BTS ou DUT. L'utilisation de progiciels de simulation multiphysique et de création d'instruments virtuels doit être connue d'un candidat à l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur.

En outre, l'option ingénierie électrique de l'agrégation impose la maîtrise des concepts de développement logiciel à partir d'un environnement professionnel. La connaissance d'un ou plusieurs langages structurés (compilés ou interprétés) est vivement recommandée. Outre les fondements de l'ingénierie électrique, les diagrammes les plus utilisés de la modélisation SysML doivent être connus par tous les candidats.

Cette première partie de l'épreuve permet au jury d'évaluer les compétences du candidat dans la mise en œuvre d'un système technique, mais aussi dans sa maîtrise des concepts fondamentaux du domaine de l'ingénierie électrique qu'il permet d'aborder.

Exposé et entretien

Le candidat dispose de 40 minutes pour présenter le support sur lequel il a travaillé ainsi que les résultats de ses investigations, les analyses et les conclusions qu'il a pu formuler en cohérence avec la séquence pédagogique qu'il a construite. La ou les séquence(s) pédagogique(s) présentée(s) ne doi(ven)t pas être une simple reformulation des activités pratiques proposées par le sujet de la première partie. Cette année encore beaucoup trop de candidats n'exploitent pas correctement la totalité du temps dont ils disposent.

La présentation d'une séquence pédagogique impose une définition précise des objectifs, au regard du programme ou du référentiel de la formation imposée par le sujet de l'épreuve. La définition des prérequis ne doit pas s'arrêter à une liste plus ou moins exhaustive d'unités d'enseignement ou de savoirs. Les modalités d'évaluation mises en œuvre en cours et en fin de séance doivent être définies avec suffisamment de précision.

Il est impératif qu'un lien argumenté existe entre les activités pratiques mises en œuvre dans la première partie de l'épreuve et la séquence pédagogique proposée. Il n'est pas envisageable que la séquence pédagogique proposée soit une recopie, plus ou moins fidèle, de la première partie de l'épreuve.

3. Conseils aux futurs candidats

Pour aborder cette épreuve dans des conditions optimales, il est conseillé aux futurs candidats à l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur – Option ingénierie électrique de :

- maîtriser les outils de modélisation SysML ;
- maîtriser les outils de simulation des circuits électriques et électroniques ;
- maîtriser les architectures des réseaux industriels.

Par ailleurs le jury recommande aux candidats de lire et connaître dans leurs grandes lignes les objectifs du programme :

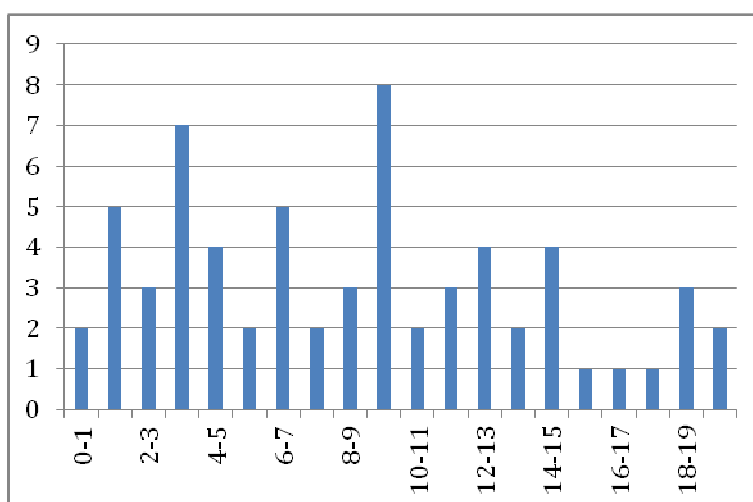
- d'enseignement technologique transversal du baccalauréat STI2D et les programmes des spécialités Systèmes d'Information et Numérique et Énergie et Environnement ;
- de sciences de l'ingénieur du baccalauréat scientifique ;
- des BTS Systèmes Numériques option Informatique et réseaux, option Électronique et communication ainsi que le BTS Électrotechnique ;
- du DUT GEII.

Il est important de préciser que chaque séquence pédagogique présentée doit être contextualisée et construite à partir d'objectifs bien précis, avec des prérequis correctement identifiés dans le programme ou le référentiel de la formation ciblée par le sujet.

Par ailleurs il est rappelé que les supports utilisés pour cette épreuve balaient l'ensemble du spectre de l'ingénierie électrique et, qu'à ce titre, il est indispensable que les candidats ne négligent aucun domaine. On peut noter par exemple que de nombreux candidats semblent ignorer les notions les plus élémentaires sur le fonctionnement des réseaux.

Enfin, il est rappelé qu'un exposé de 40 minutes ne s'improvise pas et qu'il est nécessaire de se préparer à construire un plan structuré d'intervention bien en amont des épreuves orales.

4. Résultats



64 candidats se sont présentés à cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 8,63/20. L'écart-type est 5,31. La meilleure note est 20/20. La plus faible est 0,75/20. La moyenne des candidats admis est de 12,09/20.

Rapport du jury de l'épreuve sur dossier comportant deux parties

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 évalue également 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

Quelques candidats ont présenté des dossiers préparés dans l'urgence, visiblement construits au dernier moment, ce qui conduit à de mauvais résultats. À contrario, beaucoup de candidats ont préparé soigneusement leur dossier et ont répondu avec de grandes qualités aux exigences de cette épreuve. Cela se traduit par le niveau élevé de la moyenne des candidats admis.

3. Conseils aux futurs candidats

Le jury félicite les candidats qui ont su choisir des systèmes industriels novateurs présentant une ou plusieurs fonctions attractives pour leurs futurs élèves ou étudiants. La frontière du système, de l'ouvrage ou de l'installation doit être clairement identifiée, son fonctionnement et sa modélisation doivent être abordés à un niveau correspondant à celui du concours de l'agrégation soit un niveau master. Un partenariat réel avec l'entreprise est attendu. Les problématiques, issues des contraintes identifiées dans le cahier des charges, et les recherches de solutions peuvent alors servir de support à l'élaboration du dossier.

Le candidat doit démontrer à travers cette épreuve qu'il est capable de transposer dans son enseignement tout ou partie d'un système technique ayant une réalité et appartenant à un milieu économique. La pluridisciplinarité doit être valorisée. L'exploitation de données issues de documents techniques ainsi que des mesures correspondant à des points de fonctionnement réels sont un gage d'authenticité.

Concernant le dossier.

Le jury incite les candidats à suivre les recommandations suivantes :

Concernant la forme du dossier, une présentation correcte est un gage de sérieux et montre que le candidat a réfléchi à la teneur du message qu'il souhaite communiquer aux membres du jury. Les

règles de citation des sources doivent être respectées. Le dossier doit comporter un sommaire et être paginé. Les tableaux et graphiques présentés doivent être correctement référencés.

Le contenu du dossier doit respecter les points suivants :

- il ne s'agit en aucun cas d'un rapport de stage, ni d'un rapport de projet de BTS ni d'un rapport de fin d'études de master ;
- le dossier doit être rédigé dans une langue française soignée en tenant compte des règles orthographiques ;
- les outils numériques doivent être utilisés avec discernement ;
- l'exploitation pédagogique doit être développée en précisant les référentiels choisis, les compétences et connaissances associées et l'organisation matérielle des activités d'enseignement ;
- les séquences proposées doivent s'inscrire dans une progression générale formalisée ;
- le dossier présenté doit résulter d'un travail personnel du candidat. Le jury qui a étudié l'ensemble des dossiers au préalable utilise des moyens informatiques de détection de plagiat.

Les dossiers doivent être parvenus au secrétariat du jury cinq jours ouvrés avant le début des épreuves d'admission. Le candidat doit envoyer ou déposer, en deux exemplaires, le dossier «papier» et la version numérique sur une clef USB.

Le jury apprécie particulièrement :

- des supports motivants pour les élèves, authentiques et actuels, choisis à l'issue d'une réelle collaboration avec des acteurs du monde économique ;
- des dossiers clairement structurés comportant des schémas, graphes et autres images ;
- la présence de modèles scientifiques et technologiques représentant les solutions constructives étudiées. A ce titre, il est fondamental que ces modèles soient parfaitement maîtrisés et que les démarches scientifiques et technologiques soient utilisées avec rigueur, adaptées, formalisées et étayées par des essais, expérimentations, mesures... et dont les conclusions apportent une plus-value à la problématique traitée ;
- des exploitations pédagogiques en application cohérente avec les considérations scientifiques et technologiques développées ;
- des exploitations pédagogiques précises (niveau d'enseignement, contexte matériel choisi, position de la séquence dans le plan de progression, contenu et déroulement de la séquence, évaluations associées développées, documents pour le professeur, documents pour les élèves...).
- des propositions d'exploitation pédagogique dans une perspective d'activités pluritechnologiques, voire interdisciplinaires.

Concernant l'exposé et les échanges avec le jury.

Durant les 30 minutes de l'exposé le candidat doit mettre en valeur ses qualités de communicant pour expliquer ses choix, ses démarches et ses analyses.

L'échange avec le jury permet d'approfondir certains points présentés dans le dossier ou durant l'exposé. Cet échange porte tant sur les développements scientifiques et technologiques engagés que sur les propositions d'exploitation pédagogique qui en découlent.

Le jury élargit son questionnement pour vérifier que le candidat a entrepris une réelle réflexion sur :

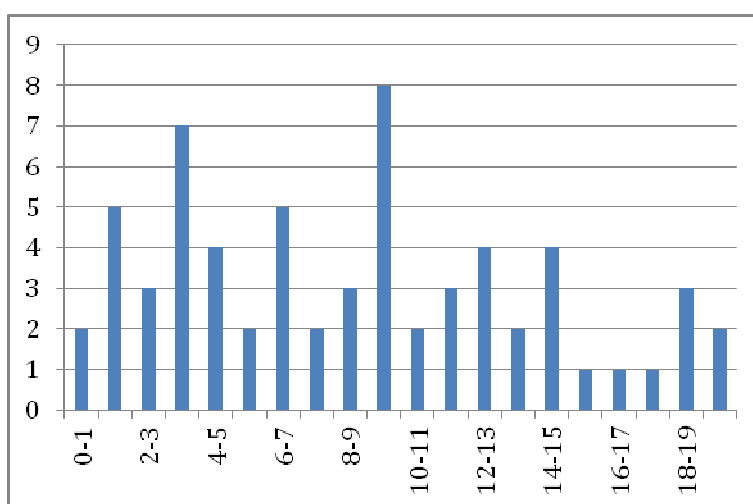
- les finalités de l'enseignement technologique et ses interactions avec d'autres disciplines ;
- les démarches d'apprentissage utilisées pour l'enseignement des sciences industrielles de l'ingénieur ;

- l'ensemble des compétences qu'un enseignant doit développer ainsi que sur les missions qui lui sont confiées ;
- les situations au cours desquelles, en tant qu'agent du service public d'éducation, il est en position de faire partager les valeurs et les principes de la République.

Le jury apprécie particulièrement :

- les exposés clairement structurés dont le dynamisme s'appuie sur une expression claire et maîtrisée, un vocabulaire technique adapté, une fluidité des propos ;
- les supports visuels judicieusement utilisés. À cet effet, un diaporama se doit d'être numéroté afin de pouvoir faire référence rapidement à une diapositive ;
- les réponses aux questions du jury posément argumentées. Il est préférable de prendre un temps de réflexion pour construire une réponse adaptée plutôt que de formuler une réponse trop rapide qui peut conduire le candidat à des approximations, voire des erreurs.

4. Résultats



64 candidats se sont présentés à cette épreuve. La moyenne des notes obtenues est de 10,32/20. L'écart-type est 6,50. La meilleure note est 20/20. La plus faible est 0,5/20. La moyenne des candidats admis est de 14,51/20.

Rapport sur la transmission des valeurs et principes de la République

Lors des épreuves d'admission, le jury évalue la capacité du candidat à agir en agent du service public d'éducation, en vérifiant qu'il intègre dans l'organisation de son enseignement :

- la conception des apprentissages des élèves en fonction de leurs besoins personnels ;
- la prise en compte de la diversité des conditions d'exercice du métier et la connaissance réfléchie des contextes associés ;
- le fonctionnement des différentes entités éducatives existant au sein de la société et d'un EPLE (institution scolaire, établissement, classe, équipe éducative,...) ;
- les valeurs portées par l'éducation nationale, dont celles de la République.

Le candidat doit prendre en compte ces exigences dans la conception des séquences pédagogiques présentées au jury. Il s'agit de faire acquérir, à l'élève, des compétences alliant des connaissances scientifiques et technologiques et des savoir-faire associés, mais également d'installer des comportements responsables et respectueux des valeurs républicaines.

Cet objectif exigeant induit une posture réflexive du candidat lors de la préparation et de la présentation d'une séquence pédagogique. En particulier, les stratégies pédagogiques proposées devront permettre d'atteindre l'objectif de formation visé dans le cadre de « l'école inclusive ». Il est indispensable de donner du sens aux enseignements en ne les déconnectant pas d'un contexte sociétal identifiable. Cela doit contribuer à convaincre les élèves du bien fondé des valeurs républicaines et à se les approprier.

L'éducation aux valeurs républicaines doit conduire à adopter des démarches pédagogiques spécifiques, variées et adaptées. Il s'agit en particulier de doter chaque futur citoyen d'une culture faisant de lui un acteur éclairé et responsable de l'usage des technologies et des enjeux éthiques associés. À dessein, il est nécessaire de lui faire acquérir des comportements fondateurs de sa réussite personnelle et le conduire à penser et construire son rapport au monde. Les modalités pédagogiques, déployées en sciences industrielles de l'ingénieur, sont nombreuses et sont autant d'opportunités offertes à l'enseignant pour apprendre aux élèves :

- à travailler en équipe et coopérer à la réussite d'un projet ;
- à assumer une responsabilité individuelle et collective ;
- à travailler en groupe à l'émergence et à la sélection d'idées issues d'un débat et donc favoriser le respect de l'altérité ;
- à développer des compétences relationnelles en lui permettant de savoir communiquer une idée personnelle ou porter la parole d'un groupe ;
- à comprendre les références et besoins divers qui ont conduit à la création d'objets ou de systèmes à partir de l'analyse des « modes », des normes, des lois, etc. ;
- 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 multi physiques 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 les filles et les garçons ;
- ...

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 individuel d'information et de découverte du monde économique et professionnel (PIIODMEP) (parcours Avenir) ;
- la banque de ressources « Pour une pédagogie de la laïcité à l'école » ;
- 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 – Eduscol – établissements et vie scolaire.