 <p>ministère éducation nationale</p>	<p>Secrétariat Général</p> <p>Direction générale des ressources humaines</p> <p>Sous direction du recrutement</p>	<p>MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE</p>
--	---	---

## **Concours du second degré – Rapport de jury**

**Session 2010**

Concours de l'agrégation externe

Section génie électrique

**Rapport de jury présenté par François COSTA,**  
Professeur des universités

**Président de jury**

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>Composition du Jury</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Données statistiques de la session 2010</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Données statistiques des sessions 2000 à 2010</b> .....	<b>5</b>
3.1	Commentaires du président.....	5
<b>4</b>	<b>Épreuves d'admissibilité (écrit)</b> .....	<b>7</b>
4.1	Rapport sur la composition d'automatique et d'informatique industrielle .....	7
4.1.1	Corrigé du problème .....	8
4.2	Rapport sur la composition d'électronique .....	28
4.2.1	Corrigé du problème .....	29
4.3	Rapport sur la composition d'électrotechnique .....	44
4.3.1	Corrigé du problème .....	45
<b>5</b>	<b>Epreuves d'admission (oral)</b> .....	<b>60</b>
5.1	Déroulement des épreuves d'admission.....	60
5.2	Rapport de l'épreuve de montage.....	62
5.2.1	Généralités.....	62
5.2.2	Organisation de la présentation du montage en présence du jury .....	63
5.2.3	Épreuve de montage de 2010.....	64
5.3	Rapport de l'épreuve de dossiers .....	69
5.3.1	Nature de l'épreuve .....	69
5.3.2	Objectifs de l'épreuve.....	69
5.3.3	Déroulement de la session 2010.....	69
5.3.4	Entretien avec le jury.....	70
5.3.5	Évolution de l'épreuve pour la session 2011 .....	70
5.3.6	Définition de l'épreuve.....	70
5.3.7	Concernant la lecture du dossier.....	70
5.3.8	Concernant l'exposé de synthèse .....	70
5.3.9	Concernant l'entretien avec le jury .....	71
5.4	Epreuve pédagogique consistant en la rédaction de documents à caractère pédagogique à partir d'une question posée par le jury.....	74

# 1 Composition du Jury

Président : M. COSTA François, professeur des universités à l'IUFM de l'université Paris Est Créteil,

Vice-président : M. BERGMANN Claude, inspecteur général de l'éducation nationale,

Secrétaire général : M. VIOLLIN Samuel, I.A./I.P.R. académie de Créteil.

## Membres du jury :

M. ARZELIER Denis, directeur de recherche CNRS au LAAS, Toulouse,

M<sup>me</sup> BEL Anne-Valérie, professeure agrégée à l'IUT de Ville d'Avray,

M. FERRIEUX Jean-Paul, professeur des universités à l'I.U.T. - Université de Grenoble 1,

M. GATEAU Guillaume, professeur des universités à l'E.N.S.E.E.I.H.T. de Toulouse,

M. GARNIER Éric, I.A./I.P.R. académie de Nantes,

M. LAROCHE Édouard, professeur des universités à l'université de Strasbourg,

M<sup>me</sup> LEYMARIE Hélène, professeur agrégée à l'université Paul Sabatier de Toulouse,

M. OUSTRIC Bernard professeur, agrégé à l'IUT de Perpignan,

M. POUJOULY Stéphane, professeur agrégé à l'I.U.T. de Cachan,

M. THAUVIN Jean-Pierre, professeur agrégé au lycée Louis-Armand à Paris,

.

## 2 Données statistiques de la session 2010

<b>Nombre de postes</b>	<b>13</b>
Nombre de candidats inscrits	299
Nombre de candidats ayant composé à la première épreuve	107
Nombre de candidats présents à toutes les épreuves d'admissibilité	102
<b>Nombre de candidats admissibles</b>	<b>32</b>
Moyenne du premier admissible	17,92
Moyenne du dernier admissible	04,95
Moyenne des admissibles	07,88
Moyenne des candidats ayant passé l'ensemble des épreuves d'admission	08,18
Nombre de candidats ayant choisi le domaine des courants faibles en montage	9
Nombre de candidats ayant choisi le domaine des courants forts en montage	17
<b>Nombre de candidats admis</b>	<b>7</b>
Moyenne du premier admis	17,82
Moyenne du dernier admis	9,37
Moyenne des admis	12,85

Rappel des domaines, relatifs au génie électrique, proposés au tirage au sort lors des épreuves d'admission pour l'épreuve de montage :

- domaine de l'électronique et des courants faibles
- domaine de l'électrotechnique et des courants forts

### 3 Données statistiques des sessions 2000 à 2010

Sessions	2000	2001	2002	2003	2004	2005 <sup>1</sup>	2006	2007	2008	2009	2010
----------	------	------	------	------	------	-------------------	------	------	------	------	------

<b>Nombre de postes</b>	47	47	47	35	18	20	14	14	13	13	<b>13</b>
Électronique	20	20	20	15	8	Sans option					
Électrotechnique	27	27	27	20	10						
<b>Inscrits</b>											
Électronique	381	306	260	282	331	Sans option					
Électrotechnique	318	289	289	277	307						
Total	699	595	549	559	638	584	568	399	301	273	<b>299</b>

<b>Présents<sup>2</sup></b>											
Électronique	170	156	131	110	128	Sans option					
Électrotechnique	154	173	150	126	122						
Total	324	330	281	236	250	208	198	158	107	102	<b>105</b>
Électronique	42	41	43	31	20	Sans option					
Électrotechnique	51	50	46	40	25						
Total	93	91	89	71	45	50	35	35	36	30	<b>32</b>

<b>Nombre d'admis</b>											
Électronique	18	20	20	15	8	Sans option					
Électrotechnique	24	27	22	20	10						
Total	42	47	42	35	18	20	14	14	13	9	<b>7</b>

<b>% / Nombre de postes</b>	89	100	89	100	100	100	100	100	100	69,23	<b>53,85</b>
Nb de postes non pourvus	5	0	5	0	0	0	0	0	0	4	<b>5</b>
% Admis/présents	12,96	14,24	14,95	14,83	7,20	9,61	7,07	8,86	12,15	8,82	<b>6,67</b>
% Admis/inscrits	6,01	7,90	7,65	6,26	2,82	3,42	2,46	3,50	4,32	3,30	<b>2,34</b>

#### 3.1 Commentaires du président

L'évolution des statistiques de l'agrégation de Génie Electrique montre que le vivier des candidats bien préparés se réduit d'année en année ; il atteint en 2010 un niveau inquiétant. Un petit socle de candidats d'excellent niveau (élèves normaliens) subsiste mais on peut regretter que depuis 2003 (fermeture des CAPET et des centres de préparation), les moyens de formation continue des rectorats n'ont pas été mobilisés pour assurer le maintien d'un niveau acceptable de préparation des certifiés qui devraient constituer une fraction significative des candidats.

Insistons sur le fait que la préparation à l'agrégation est aussi un moyen pour les enseignants des filières STI de conserver un haut niveau de compétences scientifiques et technologiques qui sera assurément nécessaire aux ambitions de la filière STI rénovée (préparation à l'enseignement supérieur technologique long).

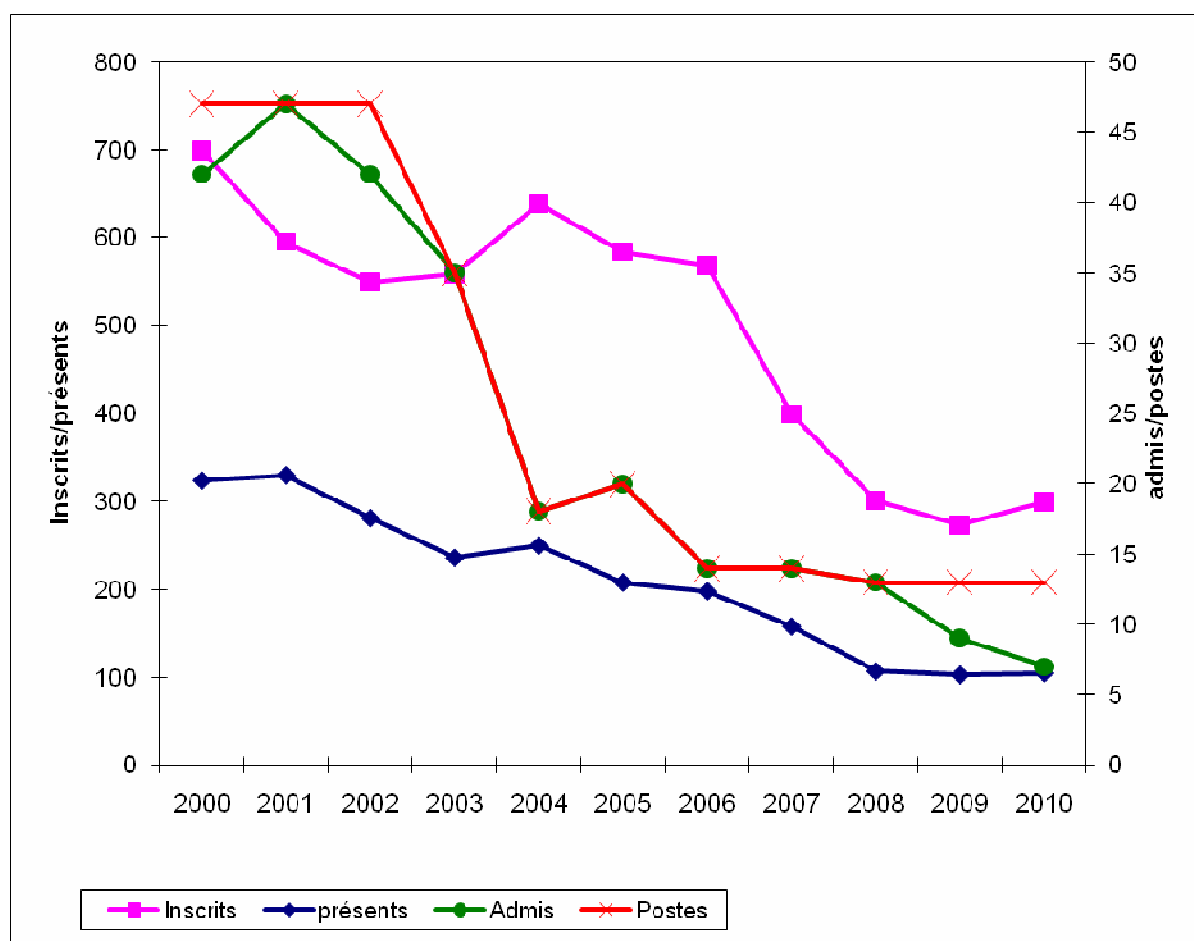
Cette situation de moyens de formation inadéquats est inquiétante dans un domaine où les évolutions technologiques sont rapides et où la demande sociétale est forte (véhicule électrique, énergies renouvelables, avion plus électrique, etc.). Aussi, le besoin de former des agrégés, sans concession sur leur niveau de compétences devrait rester fort, tant pour les établissements d'enseignement secondaires que pour les filières technologiques de l'enseignement supérieur (STS, CPGE).

<sup>1</sup> Depuis 2005 il s'agit du nombre de candidats ayant composé dans toutes les épreuves écrites.

<sup>2</sup> Seuls les candidats ayant composé dans toutes les épreuves écrites sont considérés comme étant présents.

## Évolution de l'agrégation externe de génie électrique sur 11 ans

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Nb d'inscrits	699	595	549	559	638	584	568	399	301	273	<b>299</b>
Nb de présents <sup>2</sup>	324	330	281	236	250	208	198	158	107	102	<b>105</b>
Nb d'admis	42	47	42	35	18	20	14	14	13	9	<b>7</b>
Nb de postes	47	47	47	35	18	20	14	14	13	13	<b>13</b>
% Admis/présents	12,96	14,24	14,95	14,83	7,20	9,61	7,07	8,86	12,15	8,82	<b>6,67</b>
% Admis/inscrits	6,01	7,90	7,65	6,26	2,82	3,42	2,46	3,50	4,32	3,30	<b>2,34</b>



## 4 Épreuves d'admissibilité (écrit)

### 4.1 Rapport sur la composition d'automatique et d'informatique industrielle

Durée : 6 heures - coefficient 1

Cette année l'épreuve d'Automatique et d'Informatique Industrielle était dévolue à la modélisation, l'analyse et la commande d'un convertisseur multicellulaire série associé à une machine à courant continu. Cette problématique d'un point de vue pratique se positionne clairement dans le cadre des fortes puissances et d'un point de vue théorique dans le cadre des systèmes dynamiques à commutation, sous classe des systèmes dynamiques hybrides. Le type de convertisseur étudié pose un double problème de commande ; En effet il faut à la fois réguler ses variables internes (les tensions aux bornes des condensateurs flottants) et piloter sa charge. De plus les commandes sur un tel système sont de type tout ou rien, c'est-à-dire ouverture ou fermeture d'une cellule. Ainsi, l'épreuve comportait quatre parties indépendantes portant tour à tour sur des aspects de modélisation, de commandes classiques de la charge, de commandes à modes glissants et de commandes avancées tenant compte de la structure particulière du convertisseur.

Hormis quelques cas particuliers, les candidats comme l'an dernier ont éprouvé des difficultés dans la compréhension et l'analyse du fonctionnement spécifique des convertisseurs statiques d'énergie électrique. De même, si les concepts de base de l'approche de type fonction de transfert sont en général maîtrisés il n'en va pas de même avec l'approche par espace d'état où les lacunes en l'algèbre linéaire (calcul matriciel, ...) sont patentées. Enfin, les questions sur des sujets de réflexions pures n'ont été que très peu abordées.

La partie 1 a été traitée par un grand nombre de candidats, sans pour autant amener des réponses toujours satisfaisantes, notamment sur la partie Modulation de Largeur d'Impulsions. De même, la partie observabilité questions Q.1.14 à Q.1.16 n'a été que très peu abordée.

La partie 2 dédiée aux commandes classiques a été étudiée par une grande majorité des candidats mais certaines imprécisions dans les diagrammes de Bode et une mauvaise compréhension du rôle des correcteurs ont parfois conduit à des résultats surprenants.

Pour la partie 3 il est à déplorer, comme l'an dernier, que les définitions et les critères d'évaluation des propriétés de commandabilité et d'observabilité ne soient pas encore correctement maîtrisés. De même, pour certains la notion de dérivées semble lointaine et peu claire.

La partie 4 ne nécessitait aucun pré-requis si ce n'est de maîtriser la notion de séries convergentes. Cette dernière partie n'a que très peu été abordée.

#### 4.1.1 Corrigé du problème

### Corrigé - B1 : modélisation du système

Dans cette partie, on s'intéresse à un déplacement de la charge dans un plan vertical  $(O, \vec{x}, \vec{z})$ .

#### Le chariot et le levage sont à l'arrêt.

On considère qu'à l'instant initial la charge est immobile et que  $\theta = \theta_0$ , non nul à cause du vent constant. Le vent cesse brutalement. On peut établir l'équation différentielle du mouvement d'oscillations à partir de la conservation de l'énergie mécanique.

Q1.1 : Exprimer l'énergie cinétique puis l'énergie potentielle de la charge en fonction de  $M$ ,  $L$ ,  $g$  et  $\theta$ .

$$\rightarrow E_C = \frac{1}{2} M \cdot \left( L \cdot \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad E_P = M \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos(\theta))$$

Q1.2 : Dédire l'équation différentielle, en la variable  $\theta$ , régissant le mouvement de la charge.

$$E_C + E_P = cte \Rightarrow \frac{d(E_C + E_P)}{dt} = 0 \Rightarrow M \cdot L^2 \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + M \cdot g \cdot L \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \sin(\theta) = 0$$

$$\rightarrow \frac{L}{g} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \sin(\theta) = 0$$

Q1.3 : Linéariser cette équation en considérant que  $\theta$  reste faible. Préciser l'intervalle angulaire (en degrés) pour lequel cette linéarisation entraîne une erreur inférieure à  $\pm 5\%$ .

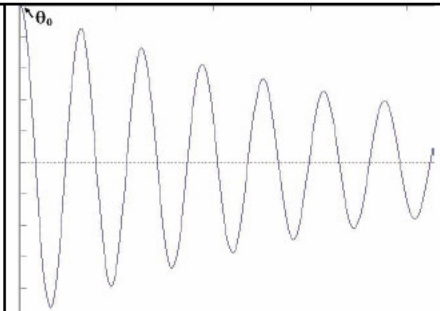
Pour les faibles angles  $\sin(\theta)$  tend vers  $\theta$ . L'équation devient linéaire :  $\frac{L}{g} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \theta = 0$

$$\text{Erreur de linéarisation} < 5\% \Rightarrow \left| \frac{\sin(\theta) - \theta}{\sin(\theta)} \right| < 0,05$$

$$\text{En gardant les 2 premiers termes du développement limité de } \sin(\theta) \text{ on obtient : } \Rightarrow \left| \frac{\theta^3/6}{\theta - \theta^3/6} \right| < 0,05$$

$$\rightarrow -30,6^\circ < \theta < +30,6^\circ$$

Q1.4 : Donner la solution de cette équation linéarisée. Préciser la fréquence d'oscillation. Indiquer par un graphique l'allure du chronogramme  $\theta(t)$  si on considère seulement pour cette question des frottements aérodynamiques proportionnels à  $\Omega$ .

$\theta(t) = \theta_0 \cdot \cos(\omega_0 t)$	
$\rightarrow \text{avec } \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad \text{et} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$	
$\rightarrow \text{Si il existe des frottements proportionnels à } \Omega$ Chronogramme en cosinus amorti.	



## Le chariot est en mouvement, le levage est à l'arrêt.

Q1.5 : Donner la relation entre  $P_c$ ,  $P_x$ ,  $L$  et  $\theta$ .

→  $P_c - P_x = L \cdot \sin(\theta)$  (triangle rectangle en  $P_x$ , formé par les point  $P_c$ ,  $P_x$  et  $M$ )

Q1.6 : Donner l'équation traduisant le principe fondamental de la dynamique appliqué à la charge. En déduire une relation entre  $\sin(\theta)$  et  $a_x$ ,  $a_z$  et  $g$ .

→  $\vec{T} + M \cdot \vec{g} = \vec{a} \Rightarrow \sin(\theta) = \frac{a_x}{\sqrt{(a_x^2 + (g - a_z)^2)}}$

Q1.7 : Des hypothèses simplificatrices nous amènent à négliger certains termes dans la relation précédente et on retient  $\sin(\theta) \approx \frac{a_x}{g}$ . En linéarisant selon l'hypothèse de la question Q1.3 et en utilisant le résultat de la

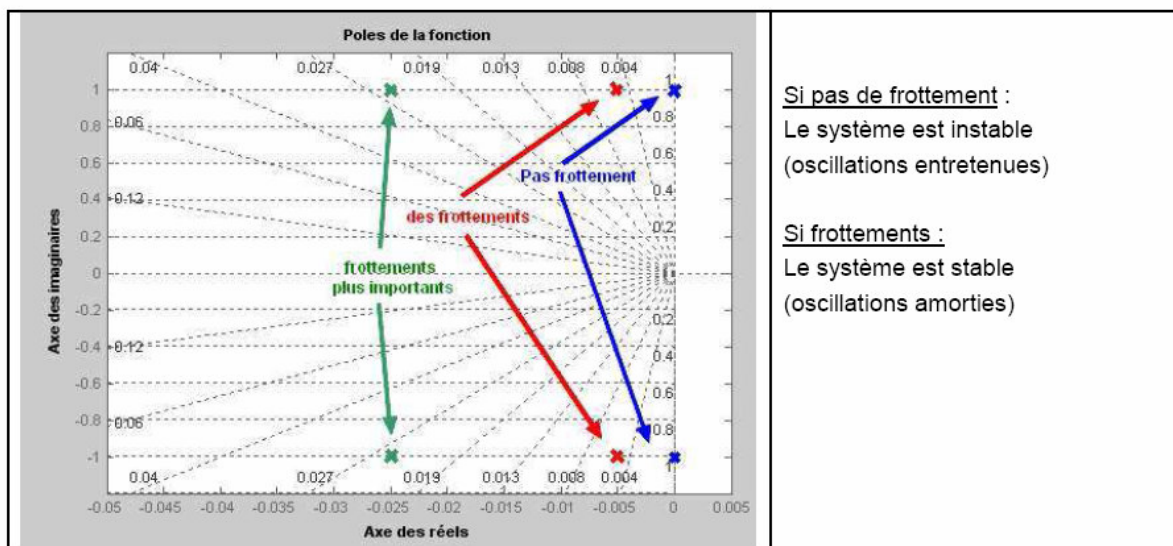
question Q1.5, exprimer la fonction de transfert  $H(p) = \frac{V_x(p)}{V_c(p)}$  ( $p$  variable de Laplace).

On a :  $P_c - P_x = \frac{L}{g} a_x$

En dérivant par rapport au temps on obtient :  $V_c - V_x = \frac{L}{g} \frac{da_x}{dt} = \frac{L}{g} \frac{d^2V_x}{dt^2}$

→  $H(p) = \frac{1}{1 + \frac{L}{g} p^2}$

Q1.8 : Représenter sur un graphique, sous forme de croix, les pôles de  $H(j\omega)$ . Où se déplacent ces pôles si on considère des frottements aérodynamiques proportionnels à  $\Omega$ . Les représenter sous forme de point. Conclure sur la stabilité de  $H(p)$  dans les 2 cas.



## Commande de vitesse en boucle ouverte avec compensation du ballant.

Q1.9 : Donner la fonction de transfert  $S(p) = \frac{V_c(p)}{V_{xu}(p)}$  qui permet une compensation parfaite.

$$S(p) = 1 + \frac{L}{g} p^2 \quad \text{pour compenser les pôles de } H(p)$$

Q1.10 : En tenant compte de la compensation parfaite définie par  $S(p)$  à la question précédente, énonce propriété mathématique que doit vérifier la fonction  $V_{xu}(t)$  pour que l'accélération du chariot  $a_x(t)$  soit défini en tout point. En déduire si un profil temporel trapézoïdal convient.

Le bloc de compensation introduit 2 dérivations pour établir  $V_c(t)$ . D'autre part  $V_c(t)$  doit être dérivable p pour que l'accélération soit définie à tout point. En conséquence, la fonction  $V_{xu}(t)$  doit être dérivable 3 fois. profil trapézoïdal ne convient pas car il n'est dérivable qu'une seule fois.

Q1.11 : En considérant que l'accélération maximale du chariot est atteinte à l'instant d'application l'échelon, déterminer la bande passante maximale du filtre en fonction de  $a_{cMAX}$ . On fera l'appli cat numérique pour la longueur L la plus défavorable.

Exprimons  $a_c(p) = p.V_c(p) = p.(1 + \frac{L}{g} p^2).V_{xu}(p)$

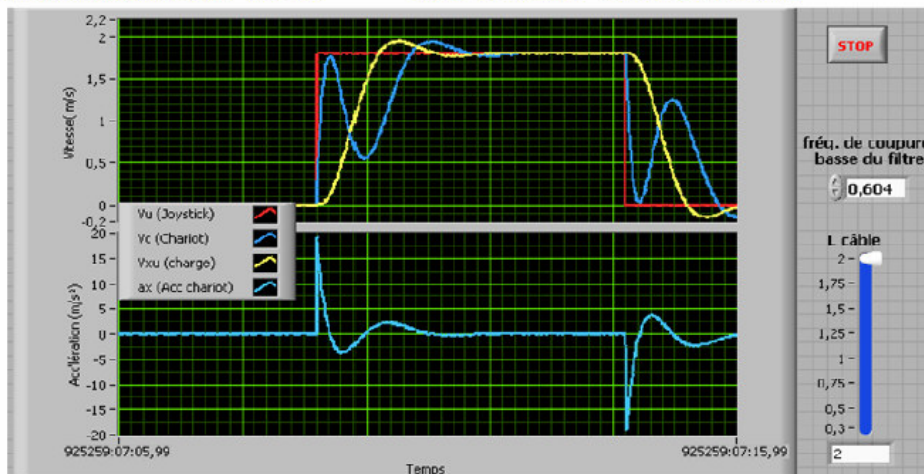
avec  $V_{xu}(p) = \frac{1}{\frac{p^3}{\omega_F^3} + \alpha.p^2 + \beta.p + 1} V_U(p) \quad \text{et} \quad V_U(p) = \frac{1,8}{p}$

L'accélération sera maximale à l'instant d'application de l'échelon, c'est-à-dire à  $t=0$

Appliquons le théorème de la valeur initiale :  $a_{cMAX} = \lim_{t \rightarrow 0} a_c(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} p.a_c(t) \Rightarrow a_{cMAX} = 1,8.\omega_F^3.\frac{L}{g}$

→  $a_{cMAX} = 1,8.\omega_F^3.\frac{L}{g}$

→ Pour avoir  $a_{cMAX} \leq 20 \text{ m/s}^2$  il faut :  $\omega_F \leq 3,79 \text{ rad/s}$  soit  $f_F \leq 0,604 \text{ Hz}$



## Commande de vitesse en B.O. avec accélération planifiée et ballant compensé.

On définit le profil d'accélération que doit suivre la charge :  $a_x = K.t^2.(T-t)^2$  pour  $0 \leq t \leq T$   
 $a_x = 0$  pour  $t > T$

Q1.12 : Tracer l'allure des profils d'accélération  $a_x$  et de vitesse  $V_x$ . Exprimer K en fonction de T et  $\Delta V$ .

$$\rightarrow \int_0^T K.t^2.(T-t)^2.dt = \Delta V \Rightarrow \frac{K.T^5}{30} = \Delta V \Rightarrow K = \frac{30.\Delta V}{T^5}$$

Q1.13 : Pour les profils précédents, exprimer la consigne  $V_c(t)$  à fournir au variateur pour compenser le ballant. On présentera la réponse sous forme développée suivant les puissances descendantes de  $t$ .

$$a_x = K.(t^2.T^2 + t^4 - 2.T.t^3)$$

$$da_x/dt = K.(2.t.T^2 + 4.t^3 - 6.T.t^2)$$

$$d^2a_x/dt^2 = K.(2.T^2 + 12.t^2 - 12.T.t)$$

$$ac = ax + (L/g).d^2a_x/dt^2 = K.(t^2.T^2 + t^4 - 2.T.t^3 + (L/g).(2.T^2 + 12.t^2 - 12.T.t))$$

$$= K.(t^4 - t^3.2.T + t^2.(T^2 + 12.L/g) - t.12.L.T/g + 2.LT^2/g)$$

$$\rightarrow V_c = K.(t^5/5 - t^4.T/2 + t^3.(T^2 + 12.L/g)/3 - t^2.6.L.T/g + t.2.LT^2/g) + V_c(0)$$

## Corrigé - B2 : Asservissement anti-ballant

La commande en boucle fermée fait intervenir 2 types de capteurs : capteurs d'angles et gyromètres. On ne s'intéresse ici qu'aux balancements dans le plan  $(O, \vec{x}, \vec{z})$  donc au capteur mesurant  $\theta$  et au gyromètre

$$\text{mesurant } \Omega = \frac{d\theta}{dt}.$$

### Asservissement utilisant le gyromètre.

#### Identification

##### Gyromètre

Le système étant à l'arrêt, on a provoqué manuellement un mouvement de balancement et enregistré le signal numérique fourni par le gyromètre à liaison bluetooth. Voir Figure 9.

##### Ensemble variateur – moteur - chariot.

Le moteur est commandé en vitesse. La consigne de vitesse (en tr/mn) est transmise au variateur via le réseau de terrain. Compte tenu sa grande dynamique vis-à-vis de la fréquence maximum de balancement, l'ensemble sera considéré comme un gain statique. Voir Figure 10.

##### Ensemble câble - charge

On considèrera que cet ensemble est régi par les équations différentielles suivantes :

$$10.\theta = \frac{dV_x}{dt}$$

$$V_c = V_x + \frac{L}{10} \frac{d^2V_x}{dt^2}$$

Q2.1 : Calculer, en degrés, l'amplitude du mouvement pendulaire qui correspond au relevé de la Figure 9. Calculer la longueur de câble L correspondante.

$$\text{Le mouvement est décrit par les équations : } \Omega = \Omega_M \cdot \cos(\omega t) \quad \text{et} \quad \theta = \frac{\Omega_M}{\omega} \sin(\omega t) + \theta_0$$

$$\text{On mesure une période de 2,21 s donc : } \omega = 2.\pi / 2,21 = 2,843 \text{ rad/s}$$

$$\text{On mesure une amplitude crête à crête pour } \Omega : 880 * 6.4 = 137,5 \text{ } \% \text{ s} = 2,4 \text{ rad/s soit } \Omega_M = 1,2 \text{ rad/s}$$

$$\theta_M = \Omega_M / \omega = 1,2 / 2,843 \quad \rightarrow \quad \theta_M = 0,42 \text{ rad} = 24^\circ$$

$$\omega^2 = 10/L \quad \rightarrow \quad L = 10 / 2,843^2 = 1,24 \text{ m}$$

Q2.2 : Etablir la fonction de transfert du gyromètre  $B(p) = \frac{N(p)}{\Omega(p)}$  dans laquelle N est le signal filtré, considéré en temps continu.

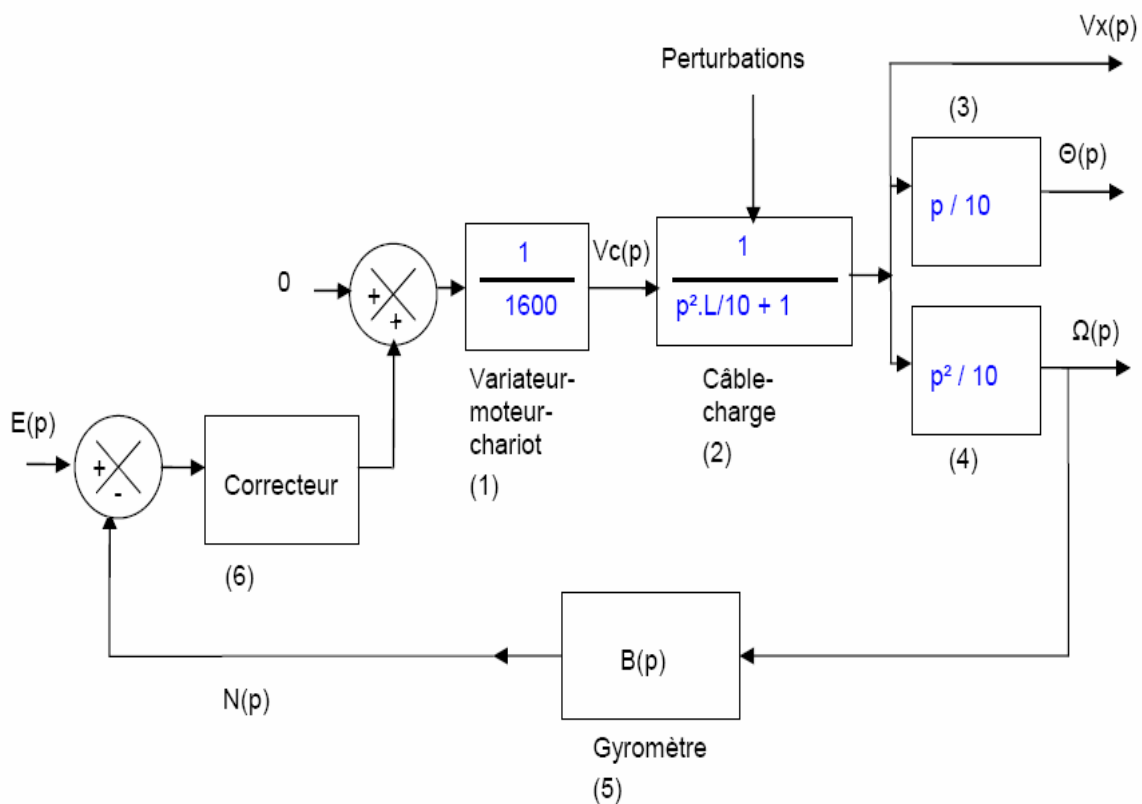
Gain statique :  $(N_{MAX} - N_0) / \Omega_M = (880 - 460) / 1,2 = 350 \text{ s/rad}$

Pulsation de cassure : retard estimé :  $t_R = 0,24 \text{ s} \rightarrow \varphi = 360 \cdot t_R / T = 360 \cdot 0,24 / 2,21 = 39^\circ$

$\omega / \omega_F = \text{tg}(\varphi) = 0,81 \rightarrow \omega_F = 2,843 / 0,81 = 3,5 \text{ rad/s}$

$$\rightarrow B(p) = \frac{350}{1 + \frac{p}{3.5}}$$

Q2.3 : Compléter les blocs 1 à 4 du schéma fonctionnel du document réponse DR1.



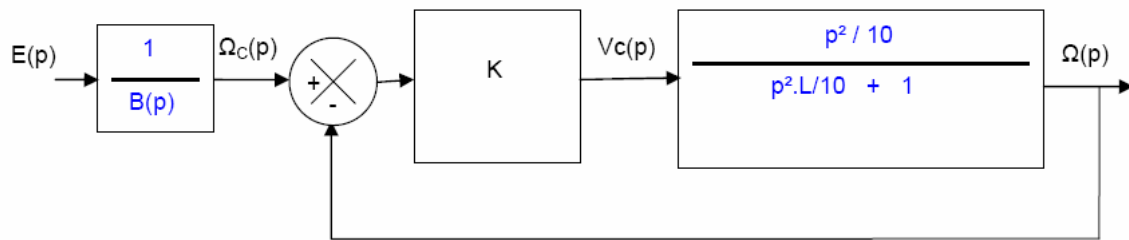
### Correction.

On considère le principe de commande en position décrit sur la Figure 8. Aucune trajectoire n'est en cours d'exécution. Pour simuler une perturbation, on crée manuellement un mouvement de balancement avant de mettre en service la boucle de correction.

### Correction proportionnelle.

On considère l'ensemble { correcteur, variateur, moteur, chariot, gyromètre } (ensemble des blocs 1,5,6 du document réponse de la question Q2.3) comme un gain statique :  $C(p) = K$ .

Q2.4 : compléter le schéma fonctionnel à retour unitaire du document réponse DR1.



Q2.5 : On notera  $\omega_0 = \sqrt{\frac{10}{L}}$ . Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée  $G(p) = \frac{\Omega(p)}{\Omega_c(p)}$ .

$$G(p) = \frac{\frac{K}{10} p^2}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{K}{10}\right) \cdot p^2 + 1}$$

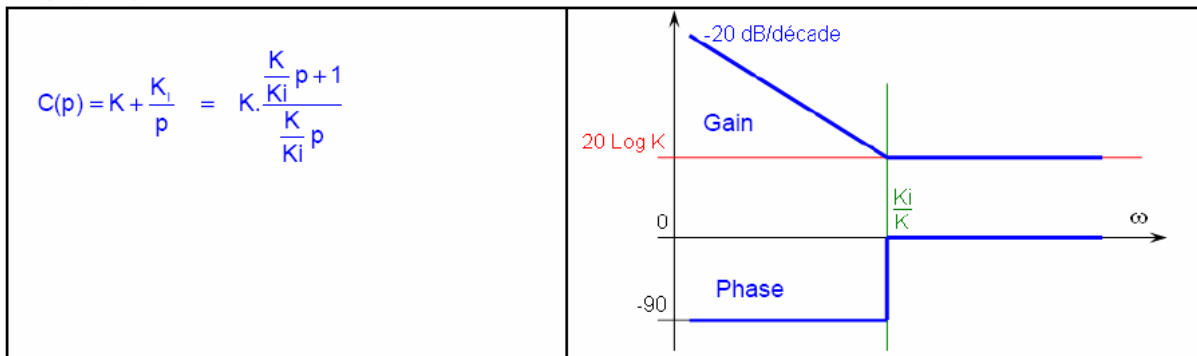
Q2.6 : Exprimer les pôles  $G(p)$  en fonction de  $\omega_0$  et  $K$  puis conclure sur l'effet de  $K$  et la stabilité du système.

→ Deux pôles imaginaires pures conjugués :  $\pm j \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{K}{10}\right)}}$

→  $K$  modifie la fréquence propre du système qui reste un oscillateur non amorti.

### Correction proportionnelle intégrale.

Q2.7 Donner la fonction de transfert  $C(p)$  d'un tel correcteur (forme parallèle) et l'allure de ses diagrammes asymptotiques de Bode.



Q2.8 Donner la forme du dénominateur de  $G(p)$ . Le système converge-t-il vers un équilibre stable ? Justifier la réponse.

Le dénominateur de  $G(p)$  est de la forme  $a.p^2 + b.p + 1$  avec  $a$  et  $b$  strictement positifs. Les pôles de  $G(p)$  sont à partie réelle négative : le système est convergent.

Q2.9 La correction PI peut-elle avoir une utilité ? Justifier la réponse. Le terme intégral de la correction peut-il présenter un inconvénient lorsque  $\Omega_c$  est nulle et que le pendule est dans sa position d'équilibre stable ? Justifier la réponse puis conclure sur l'intérêt de ce type de correction.

La correction PI permet d'amortir le système qui était restait un oscillateur harmonique avec la correction proportionnelle : le dénominateur est maintenant de la forme  $a.p^2 + b.p + 1$  avec  $b = K/10$ ;



Le terme intégral de la correction peut imposer une dérive lente du chariot lorsque la consigne  $\Omega_C$  est nulle et que le système est en son point d'équilibre stable.

Ce second point ne nous autorise pas à corriger avec un PI compte tenu de la fonction d'usage recherchée : positionner la charge.

### Correction par filtre du 2nd ordre.

On choisit finalement un correcteur de fonction de transfert  $C(p) = \frac{K}{\frac{p^2}{\omega_f^2} + \alpha p + 1}$ . On prend  $\omega_f = \omega_0$  pour conserver une bonne dynamique. K et  $\alpha$  restent les propriétés réglables du correcteur.

Q2.10 : Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée  $G(p) = \frac{\Omega(p)}{\Omega_c(p)}$ .

$$G(p) = (K \cdot p^2 / 10) / (p^4 / \omega_0^4 + p^3 \cdot \alpha / \omega_0^2 + p^2 \cdot (2 / \omega_0^2 + K/g) + \alpha \cdot p + 1)$$

Q2.11 : mettre le dénominateur de G(p) sous la forme  $\left(\frac{p^2}{\omega_0^2} + a \cdot p + 1\right) \cdot \left(\frac{p^2}{\omega_0^2} + b \cdot p + 1\right)$  puis identifier a et b en fonction de K et  $\alpha$ .

On développe pour identifier :  $\alpha = b + a$  et  $K/10 = a \cdot b \rightarrow$  Il faut donc résoudre  $a^2 - \alpha \cdot a + K/10 = 0$

$$\rightarrow a = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \frac{4 \cdot K}{10}}}{2} \quad b = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \frac{4 \cdot K}{10}}}{2}$$

Q2.12 : On souhaite optimiser le temps de réponse. Voir Figure 11. Exprimer a et b puis K et  $\alpha$  en fonction de  $\omega_0$ .

Pour optimiser le temps de réponse d'un 2<sup>nd</sup> ordre, il faut régler l'amortissement à 0.7 :

$$\rightarrow a = b = (2 \cdot 0.7) / \omega_0$$

$$\rightarrow \alpha = (4 \cdot 0.7) / \omega_0 \quad \text{et} \quad K = 10 \cdot \alpha^2 / 4 = 19.6 / \omega_0^2$$

Q2.13 : Calculer K et  $\alpha$  pour L = 1.2 m.

$$\omega_0 = 2,88 \text{ rad/s} \quad \alpha = 0,97 \quad K = 2,36$$

## Asservissement utilisant le capteur d'angle.

### Correction proportionnelle.

On considère l'ensemble { correcteur, variateur, moteur, chariot, capteur angulaire } comme un gain statique :  $C(p) = K$ .

Q2.14 : On notera  $\omega_0 = \sqrt{\frac{10}{L}}$ . Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée,  $F_1(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_c(p)}$ .

$$F_1(p) = \frac{\frac{K}{10} p}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{K}{10} p + 1}$$

Q2.15 : Calculer K pour optimiser le temps de réponse lorsque L = 1,2 m.

Amortissement de 0,7 :  $K = 14 / \omega_0 \rightarrow K = 4,86$

**Amélioration de la correction.**

Dans la recherche d'une amélioration du temps de réponse, on envisage d'implanter un correcteur de la forme :  $C(p) = K.(a.p + 1)$

Q2.16 : Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée,  $F_2(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_c(p)}$ . On note  $\omega_1$  la nouvelle pulsation propre du système. Identifier  $\omega_1$  en fonction de  $\omega_0$  et des paramètres du correcteur.

$$F_2(p) = \frac{(a.p+1) \cdot \left(\frac{K}{10} \cdot p\right)}{\frac{p^2}{\omega_1^2} + \frac{K}{10} \cdot p + 1} = \frac{\frac{K.a}{10} \cdot p^2 + \frac{K}{10} \cdot p}{\frac{p^2}{\omega_1^2} + \frac{K}{10} \cdot p + 1} \quad \text{avec} \quad \omega_1^2 = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{K.a}{10}}$$

Q2.17 : Discuter de la stabilité du système ainsi corrigé en fonction de a et K.

La stabilité d'un système du second ordre est donnée par la règle de Routh-Hurwitz : tous les coefficients du polynôme caractéristique doivent être de même signe et non nuls pour que le système soit stable.

Le dénominateur de  $F_2(p)$  est  $\frac{p^2}{\omega_1^2} + \frac{K}{10} \cdot p + 1$ . Le système convergera si  $\omega_1$  et K sont de même signe et

non nuls. Ceci implique d'avoir  $\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{K.a}{10} > 0 \Rightarrow a > -\frac{10}{K.\omega_0^2}$  et  $K > 0$ .

Les pôles de  $F_2(p)$  seront ainsi à partie réelle négative.

Q2.18 : On souhaite obtenir  $\omega_1 = 2.\omega_0$  et un amortissement  $m = 0.7$  pour le système. Exprimer K et a en fonction de  $\omega_0$ . Effectuer l'application numérique pour L = 1.2 m.

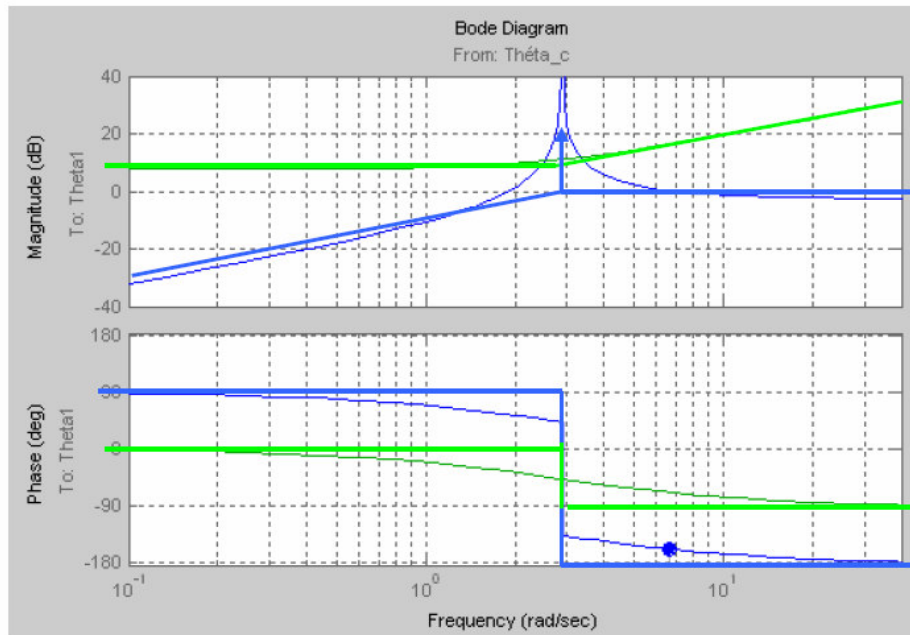
$$\omega_1 = 2.\omega_0 \rightarrow K.a/10 = -\omega_0^2.3/4 \rightarrow a = -30 / (4.K.\omega_0^2) \rightarrow a = -(30/28) / \omega_0$$

$$m = 0.7 \rightarrow K/10 = 2.m / \omega_1 = 1,4 / \omega_1 \rightarrow K = 7 / \omega_0$$

Application numérique :  $a = -0,372$   $K = 2,43$  ( pour L = 1.2m on a  $\omega_0 = 2.88\text{rad/s}$  )

Q2.19 : Sur le document réponse **DR2**, tracer les diagrammes asymptotiques de Bode :

- 1) du correcteur C(p) (en vert)
- 2) du système corrigé en boucle ouverte (en bleu)



Q2.20 : En boucle ouverte  $\left| \frac{\theta(j\omega)}{\theta_c(j\omega)} \right|$  est unitaire pour une pulsation de 66 rad/s. Calculer la marge de phase du système.

Le calcul permet de vérifier une marge de phase de 22° (point bleu sur le diagramme ci-dessus).

Le coeff.  $a < 0$  signifie l'introduction d'un zéro instable dans la boucle fermée : cela diminue le dépassement, améliore le temps de réponse, mais provoque le phénomène de réponse inverse. Il s'agit d'un système à non-minimum de phase. Le réglage doit être précis.

Q2.21 : Les chronogrammes ci-dessous représentent la stabilisation du ballant pour un angle initial  $\theta_0 = 0.5$  rad et pour les deux types de correction étudiées précédemment. Indiquer sur le document réponse **DR2** les avantages et inconvénients de chacune des corrections.

Correcteur	Avantages	Inconvénients
$C(p) = K$	Simple $\theta$ reste dans l'intervalle $\pm 1.2 \theta_0$ Lorsque L varie, le système reste stable	Lent
$C(p) = K.(a.p + 1)$	Temps de réponse environ 2 fois plus faible	Le mouvement de la charge est rapide et l'angle atteint -3 fois sa valeur initiale pendant la correction. L'accélération du chariot va être importante. Le système devient instable si L diminue Amplification du bruit à cause de l'action « dérivé »



### Modèle d'état.

A partir des équations différentielles régissant l'ensemble câble – charge, on peut établir pour ce système une représentation d'état :

$$\left[ \frac{dX}{dt} \right] = [A][X] + [B][U] \quad \text{et} \quad [Y] = [C][X] \quad \text{dans laquelle} \quad [X] = \begin{bmatrix} \theta \\ v_x \end{bmatrix} \quad \text{est le vecteur d'état, } [Y] = [v_x]$$

le vecteur de sortie et  $[U] = [v_c]$  le vecteur d'entrée du système.

Q2.22 : Déterminer la matrice d'évolution  $[A]$ , la matrice de commande  $[B]$  et la matrice de sortie  $[C]$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 10 & 0 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad [C] = [0 \quad 1]$$

Q2.23 : Déterminer la matrice de commandabilité du système. Est-il commandable ? Justifier la réponse.

$$[B \quad AB] = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 10/L \end{bmatrix} \quad \text{Le rang de cette matrice} = \text{ordre du système} = 2 \rightarrow \text{système commandable.}$$

Q2.24 : Déterminer la matrice d'observabilité du système. Est-il observable ? Justifier la réponse.

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 10 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Le rang de cette matrice} = \text{ordre du système} = 2 \rightarrow \text{système observable.}$$

Pour piloter en vitesse le chariot, on envisage une commande par retour d'état. La loi de commande s'écrit :  $[U] = [K][X]$ . On note  $k_{ij}$  les différents termes de la matrice  $[K]$  ( $i$  étant le numéro de la ligne et  $j$  celui de la colonne).

Q2.25 : Déterminer la matrice d'évolution  $[A_{BF}]$  du système en boucle fermée.

$$[A_{BF}] = [A] + [B][K] = \begin{bmatrix} K_{11}/L & \frac{K_{12}}{L} - \frac{1}{L} \\ 10 & 0 \end{bmatrix}$$

Q2.26 : Quelle(s) condition(s) doit vérifier la matrice  $[A_{BF}]$  pour que le système en boucle fermée soit stable ?

Toutes les valeurs propres de  $[A_{BF}]$  doivent être à partie réelle strictement négative.

Q2.27 : Donner les conditions sur les éléments du gain  $K$  pour que le retour d'état soit stabilisant.

Les valeurs propres de  $[A_{BF}]$  sont solutions de l'équation caractéristique :  $\det [A_{BF} - \lambda I] = 0$  où  $[I]$  est la matrice unité. On obtient l'équation :

$$\lambda^2 - \frac{K_{11}}{L} \lambda + \frac{10}{L} (1 - K_{12}) = 0$$

Selon la règle de Routh-Hurwitz, tous les coefficients du polynôme doivent être strictement positifs :

$$\rightarrow \quad K_{11} < 0 \quad \text{et} \quad K_{12} < 1$$

Q 2.28 : Refaire le même calcul en passant par la forme compagne de commande.

Les équations d'état dans la base compagne de commande sont données par :

$$\left[ \frac{dX_c}{dt} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -10/L & 0 \end{bmatrix} [X_c] + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [U] \quad \text{et} \quad [Y] = [-10/L \quad 0] [X_c]$$

Obtenues par simple lecture des coefficients des polynômes de la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$F_{Bo} = \frac{V_x(p)}{V_c(p)} = \frac{10/L}{p^2 + 10/L}$$

Dans cette base, la matrice en boucle fermée est donnée par:

$$[\tilde{A}_{BF}] = [A_c] + [B_c][\tilde{K}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{10}{L} + \tilde{k}_{11} & \tilde{k}_{12} \end{bmatrix}$$

En appliquant la règle de Routh-Hurwitz, on obtient les conditions sur les gains de  $[\tilde{K}]$  :

$$\tilde{k}_{11} < \frac{10}{L} \quad \tilde{k}_{12} < 0$$

En repassant dans la base initiale à l'aide de la transformation :

$$[P] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{10}{L} & 0 \end{bmatrix} \quad [P]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & L \\ L & 0 \end{bmatrix}$$

On obtient les conditions initiales  $K_{11} < 0$  et  $K_{12} < 1$

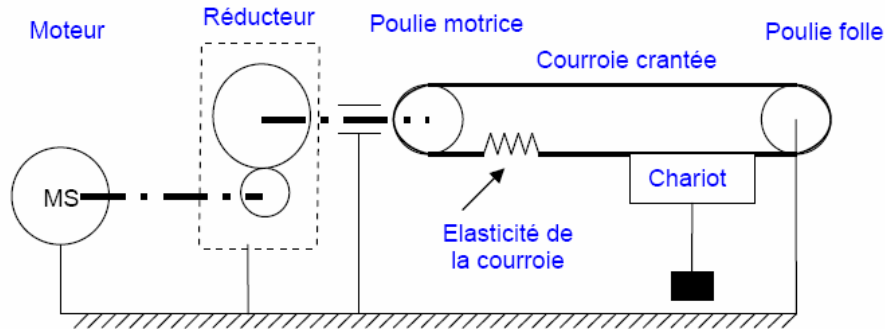
Le changement de base est construit comme :  $[P] = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] \end{bmatrix}$  avec  $[K] = [\tilde{K}][P]^{-1}$

# Corrigé - B3 : Commande en vitesse du chariot

Dans cette partie, on s'intéresse à la chaîne de motorisation du chariot, au réglage du variateur et à l'étude d'un comportement oscillatoire constaté expérimentalement, sur la réponse à un échelon de vitesse.

## Dimensionnement moteur

Q3.1 Etablir un schéma de principe ou schéma cinématique qui présente la transmission du mouvement au chariot.



Q3.2 Exprimer puis calculer le couple moteur  $C_{m0}$  correspondant au régime permanent de vitesse.

$$C_{m0} = \frac{C_r}{k}$$

$$C_{m0} = \frac{0,5}{4} = 0,125 \text{ Nm}$$

Q3.3 Exprimer puis calculer le couple moteur  $C_{mMAX}$  correspondant au régime d'accélération nominale défini sur la Figure 4.

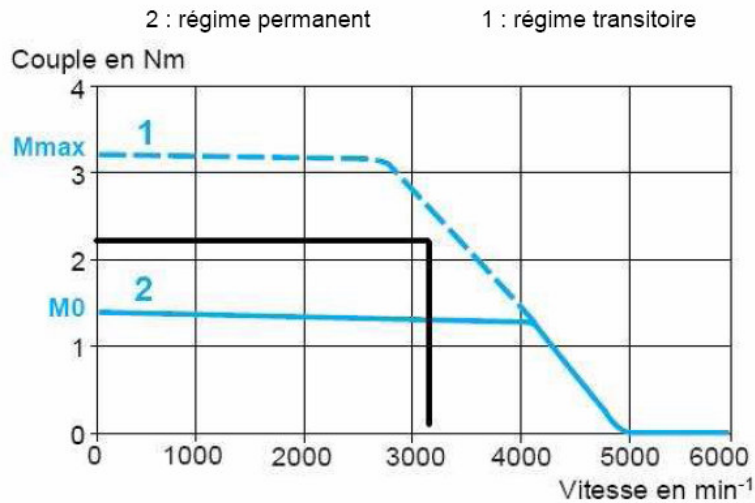
$$C_{mMAX} = \left( C_r + (J_e + J.k^2) \frac{1}{d} \frac{dV_c}{dt} \right) \frac{1}{k}$$

$$C_{mMAX} = \left( 0,5 + (85 + 0.93.4^2) \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{0.0239} \cdot 20 \right) \frac{1}{4} = 2,22 \text{ Nm}$$

Q3.4 Sur la caractéristique moteur du document réponse DR3, tracer le lieu du point de fonctionnement pour un démarrage sous l'accélération nominale jusqu'au régime permanent de vitesse nominale.

$$\text{Fréquence de rotation du moteur} = V_{cNOM} \cdot \frac{k.60}{d}$$

$$= 2 \cdot \frac{4.60}{0,15} = 3200 \text{ tr/min}$$



### Réglage du variateur et réponse du système à un échelon de vitesse.

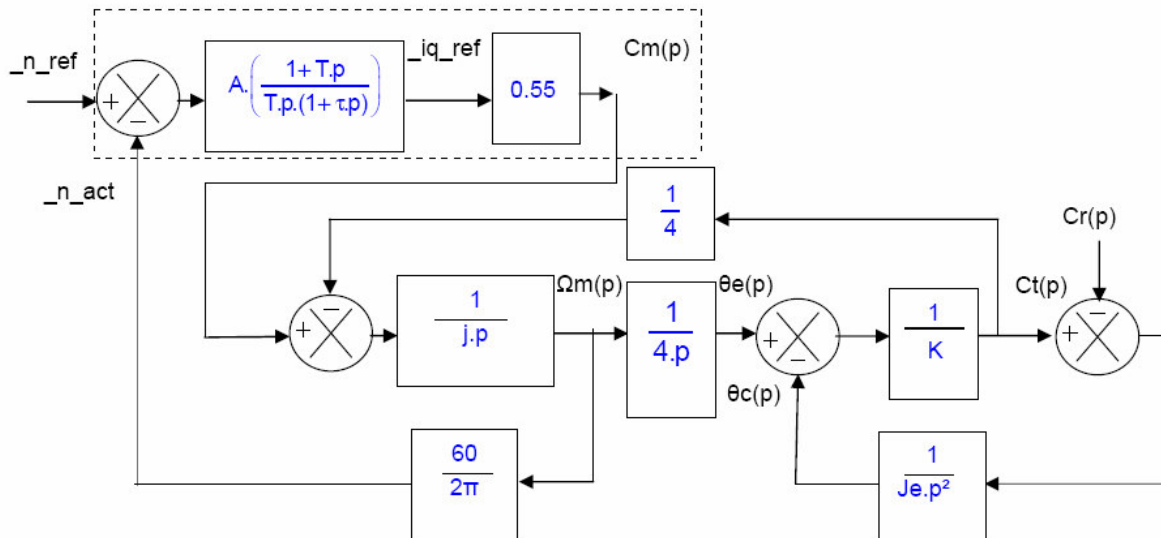
La documentation **DOC1** jointe en annexe fait apparaître le schéma synoptique des boucles de régulation du variateur LEXIUM en mode régulation de vitesse.

#### Schéma fonctionnel.

Q3.5 : Compléter, sur le document réponse **DR3** (cadre pointillé), le schéma fonctionnel qui modélise les fonctions linéaires de régulation, internes au variateur.

[Voir question suivante \(cadre pointillé\).](#)

Q3.6 : Compléter, sur le document réponse **DR3**, le reste du schéma fonctionnel pour prendre en compte l'élasticité de la courroie.



**Elasticité de la courroie crantée.**

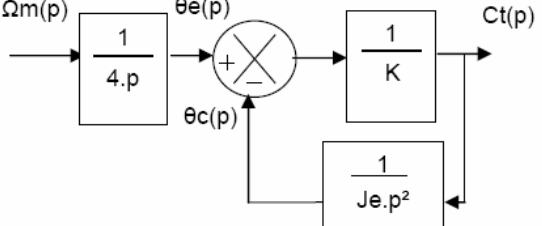
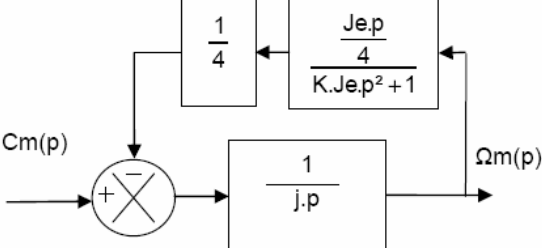
Q3.7 : En considérant  $C_r(p) = 0$ , exprimer la fonction de transfert  $H_1(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_m(p)}$  sous la forme

$$\left( \frac{1}{\left(J + \frac{J_e}{16}\right)p} \right) \cdot \left( \frac{a.p^2 + 1}{(b.p^2 + 1)} \right).$$

On notera que la première parenthèse correspond à la fonction de transfert  $H_1(p)$

dans le cas d'une transmission (courroie) rigide.

Simplification par la méthode des schémas bloc :

<p>1<sup>ère</sup> étape :</p> 	$\frac{C_t(p)}{\Omega_m(p)} = \frac{\frac{1}{4.p} \cdot \frac{1}{K}}{1 + \frac{1}{K.J_e.p^2}} = \frac{\frac{J_e.p}{4}}{K.J_e.p^2 + 1}$
<p>2<sup>ème</sup> étape :</p> 	$\frac{\Omega_m(p)}{C_m(p)} = \frac{\frac{1}{J.p}}{1 + \frac{\frac{J_e.p}{4}}{K.J_e.p^2 + 1}} = \left( \frac{1}{J.p} \right) \cdot \frac{K.J_e.p^2 + 1}{K.J_e.p^2 + 1 + \frac{J_e}{16.J}}$ $H_1(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_m(p)} = \left( \frac{1}{\left(J + \frac{J_e}{16}\right)p} \right) \cdot \left( \frac{K.J_e.p^2 + 1}{\frac{16.K.J_e.J}{16.J + J_e} p^2 + 1} \right)$

Q3.8 : Définir la pulsation de résonance  $\omega_{RES}$  et calculer sa valeur numérique pour  $J_e = 85 \text{ kg.cm}^2$  puis  $J_e = 17 \text{ kg.cm}^2$  ; cette dernière valeur correspondant à la grue à vide.

En charge : 
$$\omega_{RES} = \frac{1}{\sqrt{\frac{16.K.J_e.J}{16J + J_e}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{16.13,3 \cdot 10^{-3} \cdot 85 \cdot 0,93 \cdot 10^{-4}}{16 \cdot 0,93 + 85}}} = 243 \text{ rad / s} \Rightarrow f_{RES} = 38,7 \text{ Hz}$$

A vide : 
$$\omega_{RES} = 307 \text{ rad / s} \Rightarrow f_{RES} = 48,9 \text{ Hz}$$

Q3.9 : En considérant  $C_m(p) = 0$ , exprimer la fonction de transfert  $H_2(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)}$  sous la forme

$$\left( \frac{1}{\left(J + \frac{J_e}{16}\right)p} \right) \cdot (\dots\dots\dots).$$

Par une méthode analogue, on obtient : 
$$H_2(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)} = \left( \frac{1}{\left(J + \frac{J_e}{16}\right)p} \right) \cdot \left( \frac{1}{\frac{16.K.J_e.J}{16J + J_e} p^2 + 1} \right)$$

$$(1) \quad \Omega_m = -\frac{1}{4.J.p} C_t$$

$$(2) \quad \frac{1}{4.p} \cdot \Omega_m - \frac{1}{J_e \cdot p^2} (C_t - C_r) = K \cdot C_t \Rightarrow \frac{1}{4.p} \cdot \Omega_m + \frac{1}{J_e \cdot p^2} C_r = \left( K + \frac{1}{J_e \cdot p^2} \right) \cdot C_t$$

Par substitution dans (2) de  $C_t$  issu de (1), on obtient :

$$\frac{1}{4.p} \cdot \Omega_m + \frac{1}{J_e \cdot p^2} C_r = -4.J.p. \left( K + \frac{1}{J_e \cdot p^2} \right) \cdot \Omega_m \Rightarrow \frac{1}{J_e \cdot p^2} C_r = \left[ -4.J.p. \left( K + \frac{1}{J_e \cdot p^2} \right) - \frac{1}{4.p} \right] \cdot \Omega_m$$

$$H_2(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_r(p)} = -\frac{1}{4} \cdot \left( \frac{1}{\left( J + \frac{J_e}{16} \right) \cdot p} \right) \cdot \left( \frac{1}{\frac{16.K.J_e.J}{16J + J_e} p^2 + 1} \right)$$

Q3.10 : Exprimer  $\Omega_m(p)$  en fonction de  $C_m(p)$  et  $C_r(p)$ .

Théorème de superposition :  $\Omega(p) = H_1(p) \cdot C_m(p) + H_2(p) \cdot C_r(p)$

**Réglage du correcteur de la boucle de vitesse par la méthode de l'optimum symétrique.**

Sauf indication contraire, on considère par la suite :

- $C_r(p) = 0$
- Une liaison (courroie) rigide
- $J_e = 85 \text{ kg.cm}^2$  et  $J = 0,93 \text{ kg.cm}^2$ .

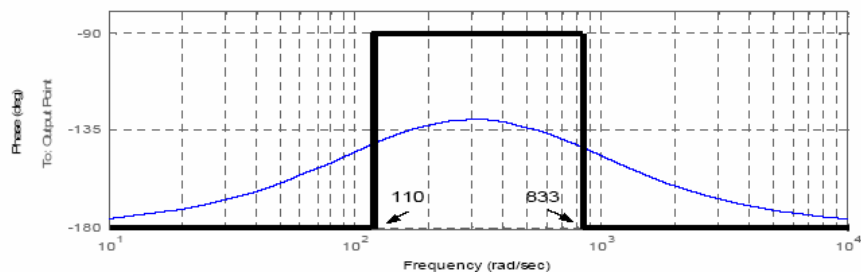
Q3.11 : Exprimer la fonction de transfert en boucle ouverte:  $G(p) = \frac{-n_{act}(p)}{-n_{ref}(p)}$  en fonction de A, T et  $\tau$ .

$$G(p) = \frac{8413.A.(T.p + 1)}{T.p^2.(1 + \tau.p)}$$

Q3.12 : En prenant  $T = \tau$ , que vaut l'argument de  $G(j\omega)$  ? Conclure sur la stabilité de la commande de vitesse en boucle fermée dans ce cas.

$\text{Arg}(G(j\omega)) = -180^\circ \rightarrow$  Commande de vitesse instable en boucle fermée

Q3.13 : On prend finalement  $T = a \cdot \tau$  avec  $a = 7,548$  : Représenter, sur le plan de Bode, le diagramme asymptotique de phase de  $G(j\omega)$  et l'allure de la courbe réelle.



Q3.14 : Calculer la pulsation  $\omega_c$  pour laquelle la phase de  $G(j\omega)$  est maximale dans  $[-180^\circ, +180^\circ]$ . Préciser sa valeur  $\varphi_M$  en degrés.

Le milieu géométrique de l'intervalle  $\left[\frac{1}{T}, \frac{1}{\tau}\right]$  sur l'échelle logarithmique est

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{1}{\tau}} = \sqrt{\frac{1}{a \cdot \tau} \frac{1}{\tau}} = \frac{1}{\tau \sqrt{a}} = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{7,548}} = 303,5 \text{ rad / s}$$

Le calcul de l'argument de  $G(j\omega)$  pour 303,5 rad / s permet d'obtenir  $\varphi_M = 47^\circ$

Q3.15 : Pour cette pulsation, exprimer le module  $|G(j\omega_c)|$ .

$$|G(j\omega_c)| = 8413 \cdot A \cdot \tau \cdot \sqrt{a} = 27,73 \cdot A$$

Q3.16 : Calculer A, gain du correcteur, pour que la marge de phase  $M_\varphi$  du système soit optimale. Préciser la valeur de  $M_\varphi$ .

Si  $|G(j\omega_c)| = 1$ , la marge de phase sera maximale :  $\rightarrow A = 1/27,73 = 0,036$

$$\text{Arg}(G(j\omega_c)) = -180 + \arctan(\sqrt{a}) - \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{a}}\right) = -130^\circ \Rightarrow M_\varphi = 180 - 130 = 50^\circ$$

Q3.17 : Quelle est la bande passante  $\omega_{BP}$  (sur diagramme asymptotique de Bode) de la commande de vitesse en boucle fermée. En déduire le temps de réponse  $t_R$  en admettant que  $t_{R(5\%)} = \frac{5,6}{\omega_c}$ .

$$\omega_{BF} = \omega_c = 303 \text{ rad/s} \rightarrow t_R = 18,5 \text{ ms}$$

Q3.18 : Sur le relevé de la documentation **DOC1**, mesurer la pulsation de résonance  $\omega_{RES}$  et le temps de réponse  $t_R$ . Comparer aux résultats obtenus en Q3.8 et Q3.17. Conclure.

$\omega_{RES} = 850 \text{ rad / s}$  ;  $f_{RES} = 125 \text{ Hz}$  à comparer au 49 Hz de la modélisation : L'élasticité de la courroie est sans doute moins importante (le constructeur annonce le max. et pour une température maxi d'utilisation)

$t_R = 28 \text{ ms}$  à comparer au 18 ms de la modélisation. La simulation du modèle étudié indique un dépassement indiciel. La réalité n'en montre pas. La modélisation néglige les frottements visqueux (proportionnels à la vitesse) et la constante de temps de la boucle de courant.

L'algorithme d'auto calibrage du variateur donne  $A = 0.0132$  et  $T = 20 \text{ ms}$

La modélisation a permis d'obtenir  $A = 0.036$  et  $T = 9 \text{ ms}$

Q3.19 : Le réglage a été étudié en négligeant le couple résistant  $C_r$ . Celui-ci a-t-il une influence sur :

- la marge de phase de la commande de vitesse ?
- la précision de la commande de vitesse en boucle fermée ?

Justifier les réponses. Qu'en serait il dans le cas d'un couple résistant proportionnel à la vitesse.

Pas d'influence sur la marge de phase car  $C_R$  est considéré constant dans l'étude.

Pas d'influence sur la précision car il y a 2 intégrations dans la chaîne directe : la charge et le PI.

En cas de prise en compte des frottements visqueux, L'intégration pure de la charge devient un pôle donc la marge de phase sera plus grande. Il restera l'intégration du PI pour annuler l'erreur statique; d'où l'intérêt de ce correcteur.

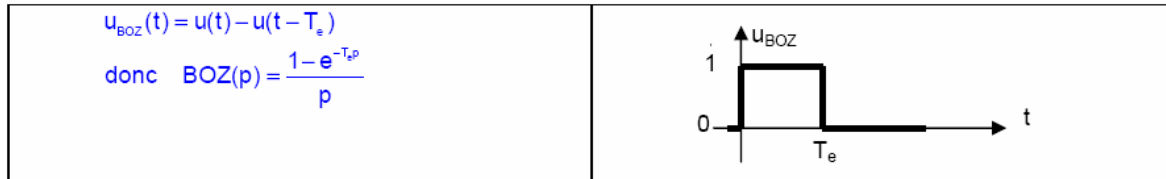
# Corrigé - B4 : Traitement numérique des informations

## Echantillonnage des informations.

On considère dans cette partie l'asservissement anti-ballant utilisant un gyromètre, présenté en début de la partie B2. La correction est réalisée par un calculateur qui échantillonne les informations ...

Q4.1 : Dans quel composant matériel est situé le « bloqueur d'ordre 0 » ? Exprimer sa fonction de transfert BOZ(p). Justifier votre réponse en traçant sa réponse impulsionnelle.

Le bloqueur se trouve dans le variateur. Celui-ci reçoit la consigne de vitesse via le bus de terrain et maintient cette vitesse jusqu'à l'arrivée d'une nouvelle consigne.



Q4.2 : Le correcteur implanté a une fonction de transfert  $C(p) = \frac{s(p)}{e(p)} = \frac{K}{\frac{p^2}{\omega_f^2} + \alpha p + 1}$ . Exprimer l'équation différentielle liant  $s(t)$  et  $e(t)$ .

différentielle liant  $s(t)$  et  $e(t)$ .

$$\frac{1}{\omega_f^2} \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + \alpha \frac{ds(t)}{dt} + s(t) = K \cdot e(t)$$

On rappelle que la méthode d'Euler (ou méthode des rectangles) permet d'approximer la dérivée d'un signal  $x(t)$  à l'instant  $t = kT_e$ , à partir de la connaissance des échantillons  $x(k)$  et  $x(k-1)$ .

Q4.3 : Exprimer l'approximation de  $\frac{ds(t)}{dt}$  à l'instant  $kT_e$  en fonction de  $s(k)$  et  $s(k-1)$ . En utilisant la même approximation, exprimer  $\frac{d^2 s(t)}{dt^2}$  à l'instant  $kT_e$  en fonction de  $s(k)$ ,  $s(k-1)$  et  $s(k-2)$ .

$$\left( \frac{ds(t)}{dt} \right)_{kT_e} = \frac{s(k) - s(k-1)}{T_e} \quad \left( \frac{d^2 s(t)}{dt^2} \right)_{kT_e} = \frac{\frac{s(k) - s(k-1)}{T_e} - \frac{s(k-1) - s(k-2)}{T_e}}{T_e} = \frac{s(k) - 2s(k-1) + s(k-2)}{T_e^2}$$

Q4.4 : Rappeler la définition de la variable  $z$  dans la transformée en  $z$  puis donner la fonction de transfert du correcteur  $C(z)$  dans l'approximation d'Euler. La présenter sous la forme  $C(z) = \frac{a_0}{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}$  puis identifier les coefficients.

Par définition  $z = e^{T_e p}$  donc multiplier par  $z^{-1}$  correspond à retarder un échantillon de  $T_e$ .

$$s(z) \left[ \frac{1}{\omega_f^2 T_e^2} (1 - 2z^{-1} + z^{-2}) + \frac{\alpha}{T_e} (1 - z^{-1}) + 1 \right] = K \cdot e(z)$$

$$\rightarrow s(z) \left[ \left( \frac{1}{\omega_f^2 T_e^2} \right) z^{-2} - \left( \frac{2}{\omega_f^2 T_e^2} + \frac{\alpha}{T_e} \right) z^{-1} + \left( \frac{1}{\omega_f^2 T_e^2} + \frac{\alpha}{T_e} + 1 \right) \right] = K \cdot e(z)$$



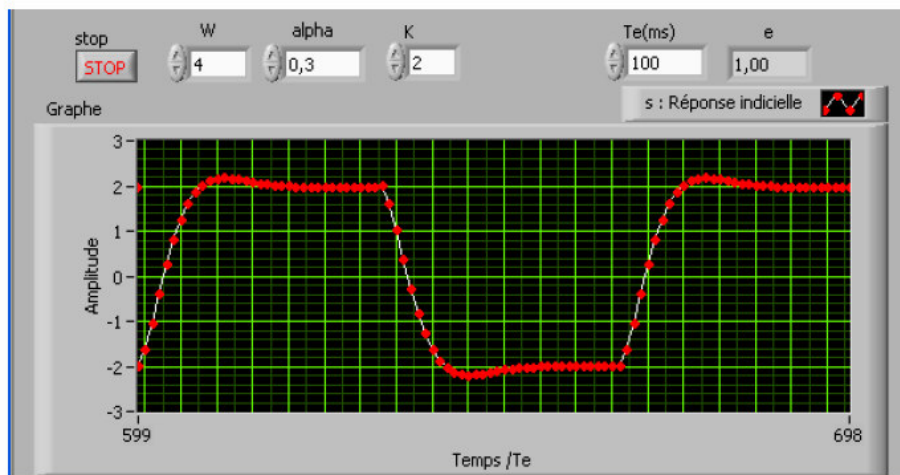
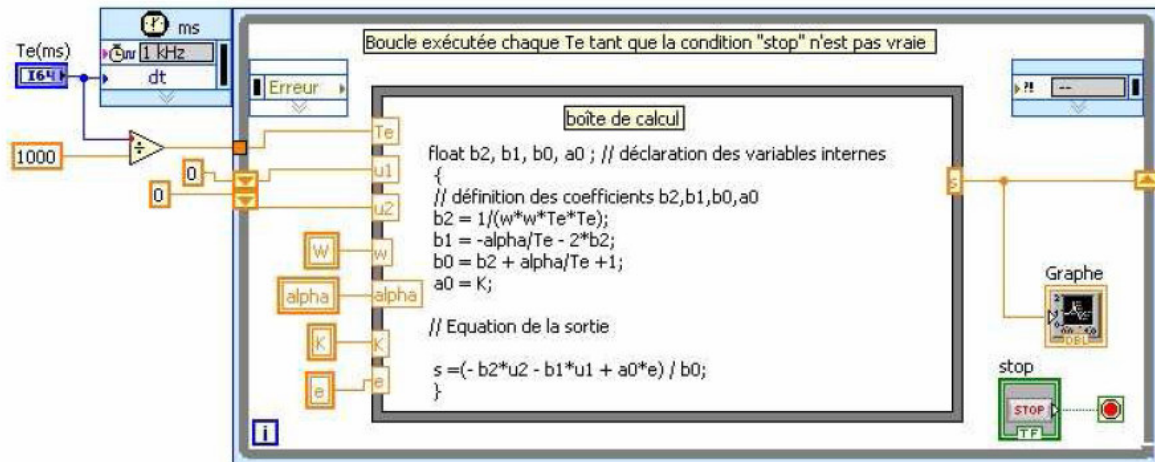
$$\rightarrow C(z) = \frac{K}{\left(\frac{1}{\omega_f^2 T_e^2}\right) z^{-2} - \left(\frac{2}{\omega_f^2 T_e^2} + \frac{\alpha}{T_e}\right) z^{-1} + \left(\frac{1}{\omega_f^2 T_e^2} + \frac{\alpha}{T_e} + 1\right)}$$

$$\rightarrow a_0 = K \quad b_2 = \left(\frac{1}{\omega_f^2 T_e^2}\right) \quad b_1 = -\left(\frac{2}{\omega_f^2 T_e^2} + \frac{\alpha}{T_e}\right) \quad b_0 = \left(\frac{1}{\omega_f^2 T_e^2} + \frac{\alpha}{T_e} + 1\right)$$

On propose d'implanter le correcteur sous la forme présentée sur le schéma fonctionnel de la Figure 15.

Q4.5 : Sur le document réponse **DR4**, compléter en langage C ANSI la boîte de calcul de la fonction LabVIEW qui réalise ce correcteur :

- Calcul des coefficients avec un minimum d'opération (5 lignes maximum)
- Calcul de la sortie (2 lignes maximum)



Q4.6 : On appelle  $H(z)$  la transformée en  $z$  de  $H(p)$ . Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée  $H_{BF}(z)$  en fonction de  $H(z)$  et  $C(z)$ .

$$H_{BF}(z) = \frac{C(z).H(z)}{1 + C(z).H(z)}$$

Q4.7 : Quelle est la condition à vérifier sur  $H_{BF}(z)$  pour que le système soit stable ?

Les pôles de  $H_{BF}(z)$  doivent avoir un module inférieur à 1. Sur le plan complexe, ils devront être situés à l'intérieur du cercle de rayon unité.

On linéarise la fonction échantillonneur – bloqueur afin de conserver les études conduites sur le plan de Bode.

Q4.8 : Préciser la période maximale d'échantillonnage  $T_{eMAX}$  pour que la marge de phase du système, de pulsation critique  $\omega_c = 5 \text{ rad/s}$ , ne soit pas dégradée de plus de  $5^\circ$ , à cause de l'échantillonnage - blocage. Faire l'application numérique.

L'échantillonnage introduit un retard pure évalué statistiquement à  $\frac{T_e}{2}$ , soit un déphasage de  $\omega_c \frac{T_e}{2}$  à la pulsation critique.

$$\omega_c \frac{T_e}{2} < 5^\circ \Rightarrow T_e < \frac{10}{\omega_c} \cdot \frac{\pi}{180} \Rightarrow T_e < 35 \text{ ms}$$

## Décodage des données du gyromètre.

Q4.9 : En considérant que le WiTilt émet ses trames de données sans aucune temporisation intermédiaire, calculer la période  $T_{eMIN}$  d'émission des trames.

La trame comporte 15 octets et il faut 10 bits pour transmettre un octet (start, octet, stop). Il y a donc 150 bits par trame d'où :

$$T_{eMIN} = \text{Nombre de bits par trame} / \text{nombre de bauds} = 150 / 115200 = 1.3 \text{ ms}$$

### 1<sup>ère</sup> méthode de lecture: « scrutation »

L'émission du flux binaire est déclenchée par l'envoi de la commande « S ». La période d'échantillonnage  $T_e$  du calculateur est asynchrone et très grande devant  $T_{eMIN}$ . Pour obtenir l'information du gyromètre, le calculateur va ensuite, chaque  $T_e$  :

- Effacer le tampon de mémoire FIFO de réception.
- Scruter le flux binaire jusqu'à détecter des deux premiers caractères de la trame, soit la suite #@.
- Lire les 12 octets suivants : le 11<sup>ème</sup> et le 12<sup>ème</sup> correspondant à l'information du gyromètre.
- Retour

Q4.10 : Quelle probabilité a-t-on de rencontrer cette suite (@#) ailleurs qu'en début de la trame et d'effectuer ainsi une mauvaise synchronisation.

La suite #@ se trouve en début de trame et aussi dans l'information du compteur de trame, lorsque celui-ci atteint 0x2340. → Soit une fois toutes les 65536 trames.

En effet les autres informations sont codées sur 10 bits, donc ne dépassent pas 0x03FF. En conséquence, un octet sur 2 est inférieur ou égal à 0x03.

Q4.11 Proposer une méthode de synchronisation qui ne tolère aucune erreur.

La méthode la plus simple consiste à utiliser le caractère de fin de trame (\$) pour augmenter la longueur de la synchronisation. La suite \$#@ ne pourra pas se trouver une seconde fois dans la trame. La scrutation étant asynchrone par rapport au flux de caractères, l'utilisation du caractère de fin de trame n'entraînera pas, statistiquement, de retard dans la lecture de l'information du gyromètre.

## Seconde méthode de lecture: « poignée de main »

On envisage d'utiliser les commandes du WiTilt pour instaurer un « poignée de main », comparable au protocole XON / XOFF des communications séries asynchrones.

Q4.12 Proposer un algorithme, présenté comme celui de la 1<sup>ère</sup> méthode, en 6 points au maximum.

- Effacer le tampon de mémoire FIFO de réception.
- Envoyer la commande « Start », octet 0x53, pour déclencher l'émission.
- Lire les 18 octets suivants : le 16ème et le 17ème correspondant à l'information du gyromètre
- Envoyer la commande « Abort », octet 0x52, pour stopper l'émission.
- Retour

## Surveillance de la batterie LiPo.

Q4.13 Quelle fonction est ici réalisée ? Dans quel but ? Préciser les caractéristiques de cette fonction linéarisée.

On réalise un filtrage passe bas pour s'affranchir des perturbations ou mesures erronées car l'information va être utilisée dans la procédure de sécurité qui décide de l'arrêt de la grue.

On linéarisant, on obtient un filtre du 1er ordre de constante de temps 999.Te.

$$V_{\text{BAT}}(k) = 0,999.V_{\text{BAT}}(k-1) + 0,001.U_m(k) \rightarrow 999.T_e \cdot (V_{\text{BAT}}(k) - V_{\text{BAT}}(k-1)) / T_e + V_{\text{BAT}}(k) = U_m(k)$$

En linéarisant on obtient :  $999.T_e \cdot \frac{dV_{\text{BAT}}(t)}{dt} + V_{\text{BAT}}(t) = U_m(t)$  donc un filtre du 1<sup>er</sup> ordre.

## 4.2 Rapport sur la composition d'électronique

Durée : 6 heures - coefficient 1

L'épreuve d'électronique de la session 2010 a pour support un système de localisation de fuite dans les conduites de distribution d'eau potable. La technique étudiée dans le cadre de ce sujet repose sur une méthode de corrélation acoustique croisée. Après une première partie (B1) consacré à l'étude du principe de la mesure le sujet propose l'étude de l'émetteur radio (B2) et celle du récepteur radio (B3).

### Partie B1

Pour cette première partie on propose quelques rappels sur les quantités importantes dans l'analyse des signaux. La plupart des candidats confondent énergie et puissance normalisée pour les signaux périodiques. La moitié des candidats n'a pas correctement mené les calculs des fonctions d'intercorrélation et n'a pas compris la notion de bruits indépendants.

Beaucoup d'erreurs ont été relevés pour les applications numériques concernant notamment le calcul de la vitesse de propagation dans la conduite d'eau. Ces erreurs sont essentiellement dues à de mauvaises conversions pour les unités de pression (Bar et Pascal). Pour la dernière question peu de candidats ont été inspiré pour la mesure de distance entre les deux capteurs et des propositions aussi originale que créer une nouvelle fuite d'eau a été proposé !

### Partie B2

Dans cette partie, l'étude de l'émetteur FM synthétisé est proposé en abordant les différentes fonctions : VCO, Comparateur de phase, Boucle à verrouillage de phase, Oscillateur à quartz.

Des notions de base tels que le principe physique d'une diode Varicap ou le tracé d'un diagramme de Bode ne sont pas maîtrisés par certains candidats. Néanmoins la modélisation de la boucle à verrouillage de phase et le fonctionnement du comparateur de phase à pompe de charge, quand ils ont été traités, sont assimilés.

Moins d'un tiers des candidats ont réussi à identifier correctement l'expression de l'impédance équivalente d'un quartz alors qu'il s'agit d'un grand classique en électronique analogique. Malgré les différentes relectures du sujet, une petite erreur s'est glissé dans le sujet puisqu'il fallait lire  $C=0,018\text{pF}$  et non  $0,0018\text{pF}$ . Toutefois cette coquille n'a eu aucune incidence pour la correction puisque aucun candidat n'a été en mesure de modéliser le fonctionnement de l'oscillateur et donc d'effectuer les applications numériques pour la question Q2.29. Les correcteurs ont toutefois pris en considération cette erreur en adaptant le barème et l'affectation des points pour cette partie.

La modulation de fréquence qui est encore très largement utilisé dans les systèmes de télécommunications n'est pas maîtrisée par une très grande partie des candidats. Les questions autour de l'analyse spectrale qui sont fondamentales en électronique et plus particulièrement dans le domaine des télécommunications ne sont pas abordées alors que ces lacunes ont été régulièrement signalées dans les rapports de jury de ces deux dernières années.

### Partie B3

Le changement de fréquence est une opération fondamentale dans tous les systèmes de télécommunications. Peu de candidats connaissent réellement l'intérêt et les technologies employés dans ces structures. De nombreuses confusions autour de la notion de fréquence image sont constatées. Très peu de candidats ont réellement examiné la structure du circuit RF2917 et noter que la fréquence de l'oscillateur local était 64 fois plus grande que la fréquence du quartz. Les candidats ayant abordés la partie démodulation FM ont plutôt réussis la question Q3.15 mais n'ont pas été capable d'exploiter ce résultat pour analyser le fonctionnement du démodulateur. Le rôle de l'interface entre le démodulateur et le convertisseur n'a pas été compris alors que le montage proposé utilise des structures basiques de l'électronique. L'étude du codec réduit pourtant à quelques questions n'a été traité que très superficiellement.

#### 4.2.1 Corrigé du problème

### Partie B1 : Principe de la mesure par corrélation croisée

**CORRECTION**

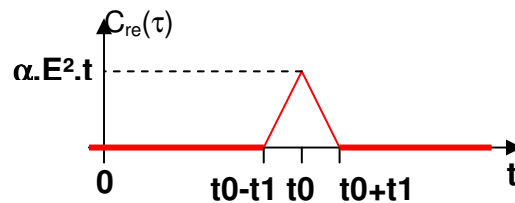
**Q1.1** L'énergie d'un signal  $s(t)$  se définit comme  $E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t) dt$  sous réserve d'existence de l'intégrale.

Signaux à énergie finie : Tous les signaux impulsionnels

Signaux à énergie infinie : Les signaux périodiques

**Q1.2**  $C_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt$  représente la puissance normalisée ou valeur efficace au carré du signal  $x(t)$

**Q1.3**



**Q1.4** Pour retrouver la valeur du retard entre les 2 signaux il suffit de rechercher le maximum de la fonction d'intercorrélation. C'est cette technique qui est utilisée dans le RADAR.

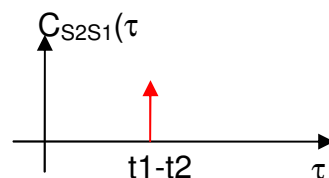
**Q1.5** Un bruit blanc possède une densité spectrale constante.

**Q1.6** Tout simplement car la transformée de Fourier d'un Dirac est une constante.

**Q1.7** Comme les bruits sont indépendants les fonctions d'intercorrélation  $C_{BN1}(\tau)$ ,  $C_{BN2}(\tau)$  et  $C_{N1N2}(\tau)$  sont nulles.

**Q1.8**  $C_{S2S1}(\tau) = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot C_{BB}(\tau - t_1 + t_2)$

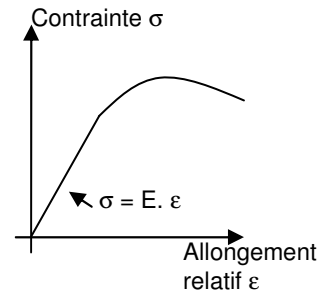
**Q1.9** En respectant le positionnement des capteurs de la figure 1 on en déduit que  $t_1 > t_2$  et par conséquent :



La fonction d'intercorrélation est maximale en  $\tau d = t_1 - t_2 = \frac{L_1 - L_2}{v}$

**Q1.10** En mesurant  $\tau d$  il est donc ainsi possible de déterminer  $L_1 = (L + \tau d.v)/2$  et  $L_2 = (L - \tau d.v)/2$  puisque les distances  $L$  et  $v$  sont connus.

**Q1.11** Le module de Young ou module d'élasticité longitudinale est la constante qui relie la contrainte de traction et la déformation pour un matériau (isotrope) donné.



**Q1.12** Pour de l'eau douce  $S=0$ , par ailleurs  $1\text{bar} = 100000\text{Pa}$ ,  $D=250\text{mm}-2*15\text{mm}=220\text{mm}$   
Module de Young pour un type DIP :  $157000\text{MPa}$   
Pour une température de  $10^\circ\text{C}$  on trouve  $v_0=1449,23\text{m/s}$  et donc  $v= 1320 \text{ m/s}$

**Q1.13**  $L_2=54,884\text{m}$  et  $L_1=45,116\text{m}$

**Q1.14** Il faut envoyer un signal acoustique de test au point n°1 et mesurer le retard par inter corrélation au point n°2. La connaissance de la vitesse de propagation nous donne alors la distance parcourue par l'onde sonore.

## Partie B2 : Etude de l'émetteur radio

## CORRECTION

### *Principe de fonctionnement général de l'émetteur*

**Q2.1** Antenne quart d'onde ou ground plane de longueur  $L=17\text{cm}$  approximativement  $\left( L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4.f} \right)$

**Q2.2** La bande de fréquence  $433\text{MHz}/434\text{MHz}$  est réservée aux applications ISM (Industriel, Scientifique & Médical) en Europe

**Q2.3** La PLL est utilisée en synthèse de fréquence donc  $433,6\text{MHz}/3,3875\text{MHz} = 128$  correspond à la valeur du Prescaler donc  $\text{MOD\_CTRL} = \text{« high »}$  et  $\text{DIV\_CTRL} = \text{« low »}$

**Q2.4** Un VCO seul à base d'élément LC ne permet pas d'obtenir la précision et la stabilité nécessaire.

Modulation sur l'entrée du VCO en choisissant un filtre de boucle suffisamment « lent » pour assurer la correction de dérive sur la valeur de la fréquence porteuse.

**Q2.5** Il assure un découplage efficace des tensions d'alimentation sur une large gamme de fréquence. Les condensateurs de  $10\text{nF}$  ont tendances à devenir « inductif » pour les fréquences très élevées et ils sont « secondés » par des condensateurs de  $22\text{pF}$ . Il s'agit d'un montage classique dans tous les dispositifs HF.

## Etude du VCO

**Q2.6** La diode varicap est une diode qui polarisée en inverse présente une capacité équivalente dont la valeur décroît en fonction de la tension de polarisation. La tension inverse agit en fait sur la largeur de la zone de déplétion qui forme une capacité équivalente. Toutes les diodes possèdent cette propriété mais dans une diode varicap ce phénomène est optimisé afin d'obtenir des valeurs de capacités conséquentes et une bonne variabilité.

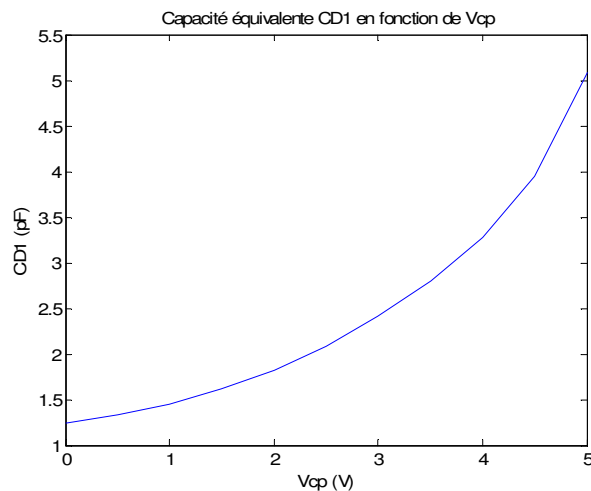
La capacité de cette diode est décrite dans le modèle spice par une relation du type

$$C = \frac{C_{J0}}{\left(1 - \frac{Vr}{\phi}\right)^M}$$

$C_{J0}$  représente la capacité pour une tension inverse  $Vr=0$   
 $M$  : grading coefficient  
 $\phi$  : junction barrier potential  
<http://www.nalanda.nitc.ac.in/industry/appnotes/Zetex/an23.pdf>

**Q2.7** La résistance R2 permet d'assurer la polarisation en inverse de la diode varicap et sa valeur est choisie suffisamment grande pour que l'on puisse la négliger dans le modèle « petits signaux »

**Q2.8** En continu les inductances L1 et L3 peuvent être considérées comme un fil donc  $Vr=Vcc-Vcp$ .



**Q2.9** gm représente le paramètre de transconductance

$I_C = I_s \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{U_T}\right)$  avec  $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$  donc pour de petites variations  $V_{be}$  autour du point de polarisation

$(I_{C0}, V_{BE0})$

donc  $gm = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right|_{V_{BE0}} = \frac{I_{C0}}{U_T}$ . Comme les transistors sont appairés  $gm1=gm2$ .

**Q2.10** Vue des bornes 18 et 20 un observateur voit une résistance équivalente :  $Re q = \frac{-2}{gm}$

**Q2.11** L'inductance  $L3 \gg L1$  donc pour les fréquences d'oscillations en jeu elle se comporte comme un circuit ouvert (impédance très élevée)

**Q2.12** Le schéma équivalent du circuit LC équivalent constituant l'oscillateur peut se représenter comme suit :

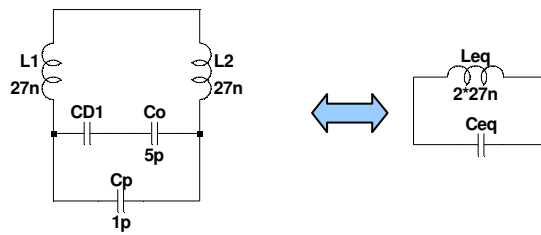


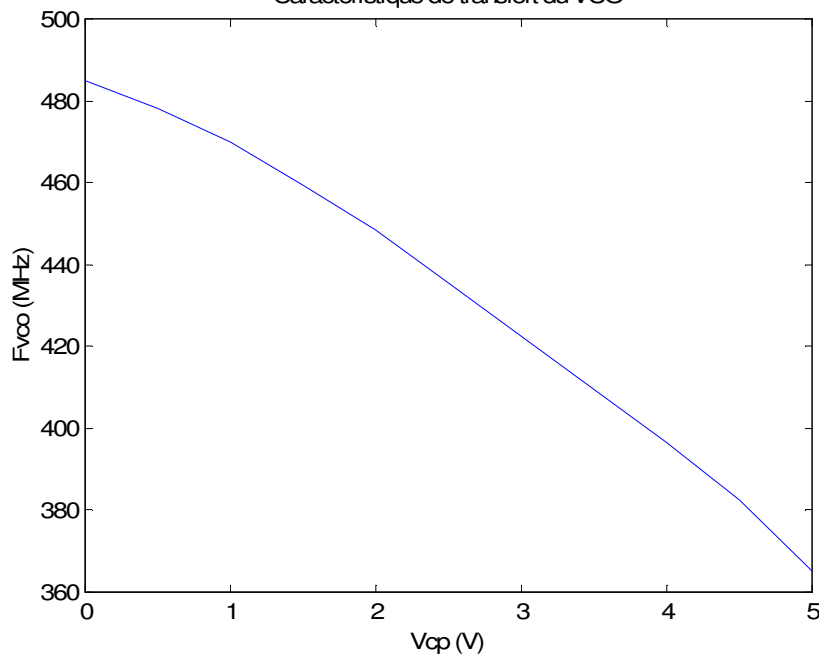
Schéma équivalent des éléments de l'oscillateur

**Q2.13** La fréquence d'oscillation  $F_{vco}$  est telle que :

$$F_{vco} = \frac{1}{2\pi\sqrt{Leq.Ceq}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L1+L2)\left(Cp + \frac{Co.CD1}{Co+CD1}\right)}}$$

<b>Vcp (V)</b>	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
<b>CD1 (pF)</b>	1.24	1.33	1.45	1.62	1.82	2.09	2.41	2.8	3.28	3.95	5.08
<b>Fvco (MHz)</b>	485.1	478.3	469.9	459.3	448.3	435.4	422.6	409.6777	396.7	382.5	365.1

Caractéristique de transfert du VCO



**Q2.14** En l'absence de modulation la fréquence d'oscillation correspond à la fréquence porteuse soit 433,6MHz

En considérant la caractéristique linéaire dans la zone correspondante (Cadre rouge) à cette fréquence on peut écrire que :

$$F_{vco} = (499,4 - V_{cp} \cdot 25,6) \text{MHz} \quad K_{vco} = 25,6 \text{MHz/V}$$

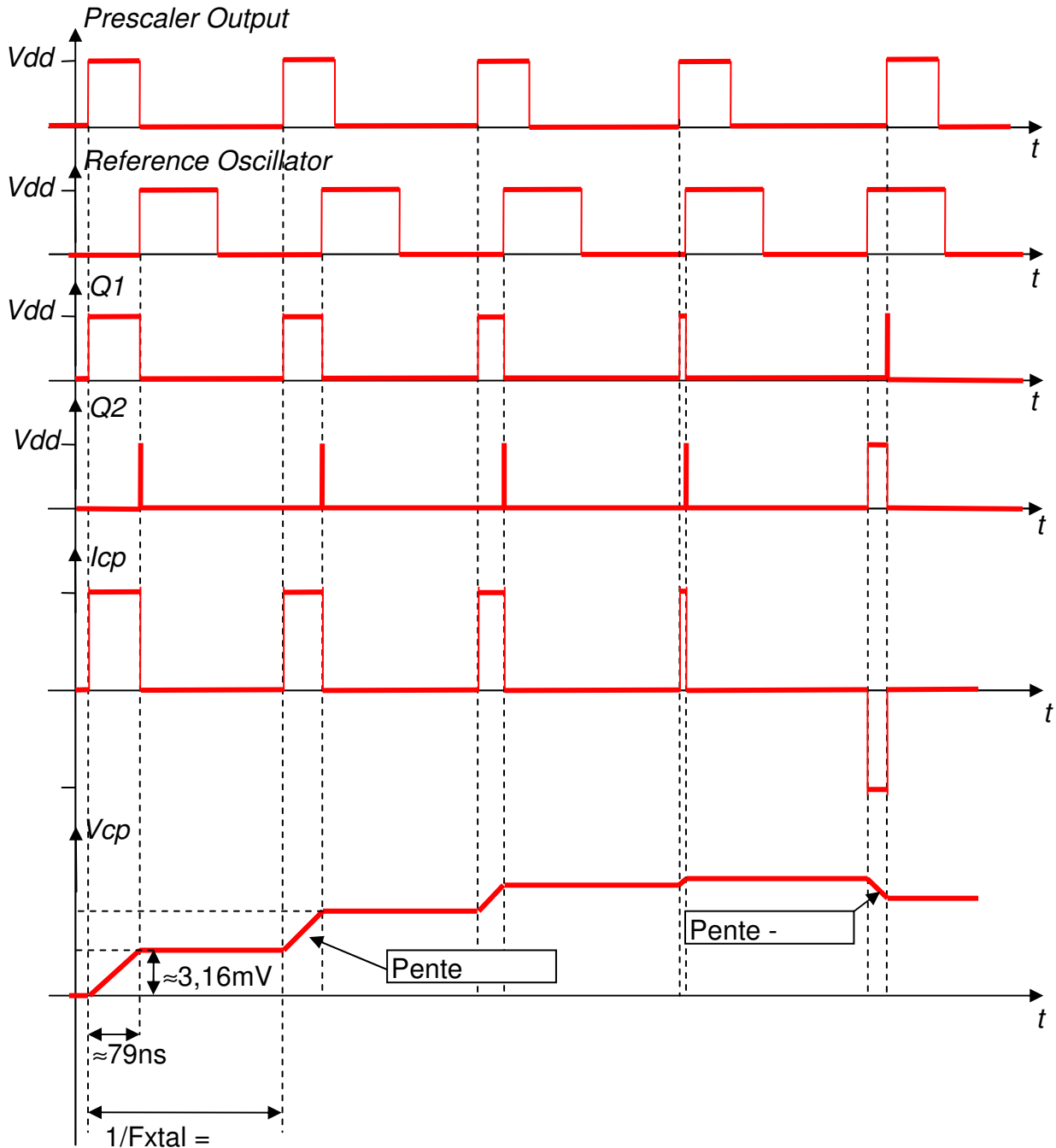
Donc pour  $F_{vcp}=433,6\text{MHz}$   $V_{cp}=2,57\text{V}$



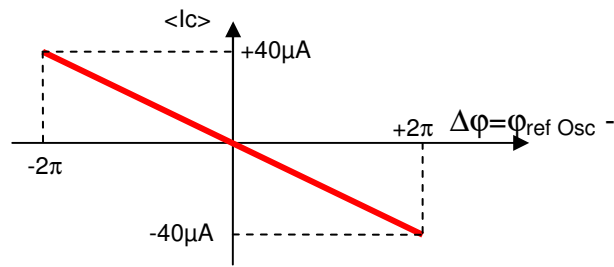
## Etude du comparateur de phase

**Q2.15** Comme il s'agit d'une sortie courant, le filtre de boucle est purement passif ce qui n'entraîne pas l'utilisation d'éléments actifs qui entraîne inévitablement des perturbations sur la commande du VCO. Le courant  $I_{cp}$  est égal à  $40\mu A$  (Charge Pump Current p11.12 doc RF2512)

**Q2.16**

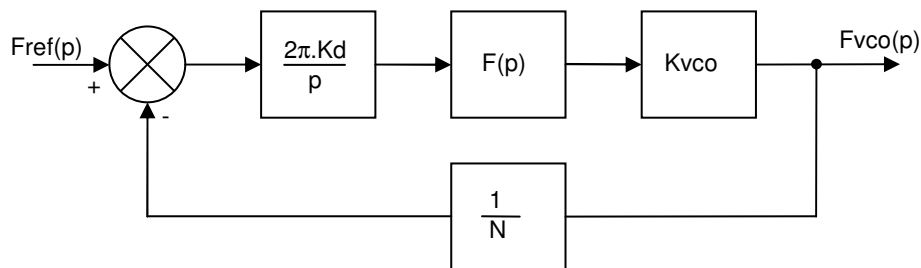


**Q2.17** La caractéristique de transfert du comparateur est la suivante dans laquelle le gain de conversion est  $K_{cp}=40\mu A/2\pi rd$  soit  $K_{cp}=6,37\mu A/rd$



**Modélisation et réglage de la boucle à verrouillage de phase**

**Q2.18** Le modèle dynamique de la boucle à verrouillage est le modèle classique suivant :



$F(p)$  désigne la fonction de transfert du filtre de boucle. Comme l'entrée de ce filtre est le courant  $I_c$  et sa sortie la tension  $V_{cp}$  alors :

$$F(p) = Z_{loop}(p) = \frac{\frac{1}{C2 \cdot p} \cdot \left( R1 + \frac{1}{C1 \cdot p} \right)}{\frac{1}{C2 \cdot p} + R1 + \frac{1}{C1 \cdot p}} = \frac{1 + R1 \cdot C1 \cdot p}{C1p + C2p + R1 \cdot C1 \cdot C2 \cdot p^2}$$

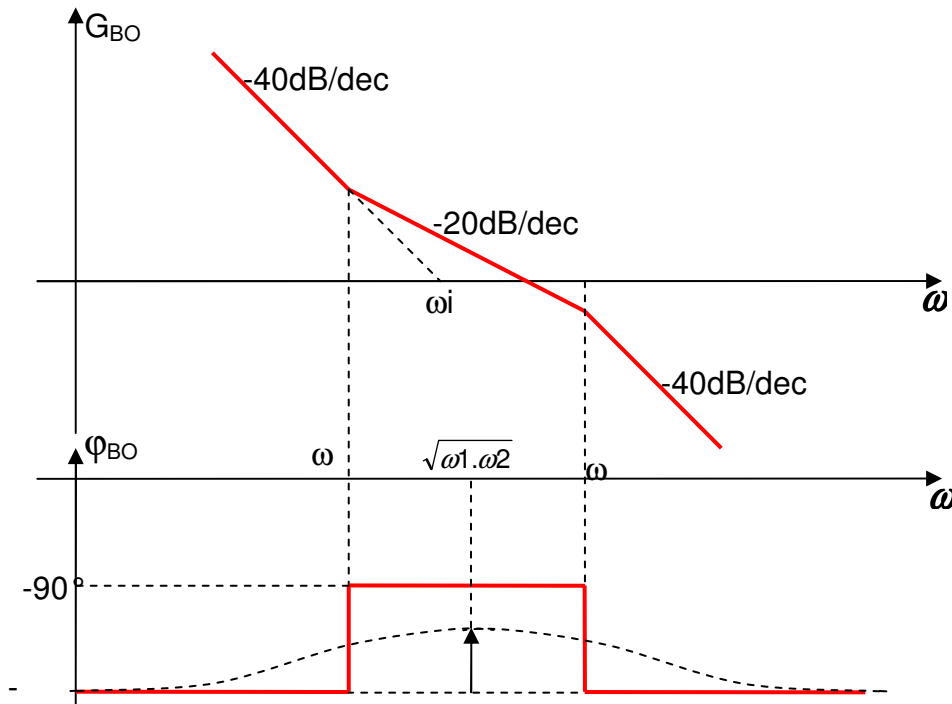
Donc  $F(p) = \frac{1}{(C1 + C2) \cdot p} \cdot \frac{1 + R1 \cdot C1 \cdot p}{1 + R1 \cdot \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2} \cdot p}$

**Q2.19** La fonction de transfert en boucle ouverte peut donc s'écrire :

$$FTBO(p) = \frac{2\pi \cdot Kd \cdot Kvco}{N \cdot (C1 + C2) \cdot p^2} \cdot \frac{1 + R1 \cdot C1 \cdot p}{1 + R1 \cdot \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2} \cdot p}$$

de la forme indiquée  $FTBO(p) = \left( \frac{\omega i}{p} \right)^2 \cdot \frac{1 + \frac{p}{\omega 1}}{1 + \frac{p}{\omega 2}}$  avec  $\omega 1 = \frac{1}{R1 \cdot C1}$ ,  $\omega 2 = \frac{C1 + C2}{R1 \cdot C1 \cdot C2}$  et  $\omega i = \sqrt{\frac{2\pi \cdot Kd \cdot Kvcp}{N \cdot (C1 + C2)}}$

**Q2.20** Il est assez facile de montrer que  $\omega_2 > \omega_1$ . Si l'on choisit pour le tracé  $\omega_2 > \omega_1 > \omega_1$  le résultat est le suivant :



Si l'on souhaite obtenir une marge de phase maximale de  $55^\circ$  il faut se placer à l'endroit où la phase est maximale soit pour  $\omega = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$ . Dans ces conditions

$$M\phi_{\max} = \arctan\left(\frac{\sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}}{\omega_1}\right) - \arctan\left(\frac{\sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}}{\omega_2}\right) \text{ soit } M\phi_{\max} = 2 \cdot \arctan\left(\sqrt{\frac{\omega_2}{\omega_1}}\right) - \frac{\pi}{2}$$

donc  $M\phi_{\max} = 55^\circ$  impose alors  $\omega_2 = 10 \cdot \omega_1$

**Q2.21** Pour que la marge de phase soit maximale à  $\omega = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$  il faut que  $|FTBO(\omega = \omega_{LBW})| = 1$

avec  $\omega_{LBW} = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$ . Dans ces conditions  $|FTBO(\omega = \omega_{LBW})| = \frac{\omega^2}{\omega_1 \cdot \omega_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{\omega_1 \cdot \omega_2}{\omega_1^2}}}{\sqrt{1 + \frac{\omega_1 \cdot \omega_2}{\omega_2^2}}} = 1$  soit

$$\omega^2 = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}}$$

**Q2.22** Il faut que  $f_{LBW} \ll f_{xtal}$  pour que le filtre joue son rôle de filtre moyenneur permettant d'assurer le bon fonctionnement du comparateur de phase. Mais il faut aussi que  $f_{LBW} \gg$  fréquence du signal modulant pour que la PLL réalise une multiplication en fréquence sans déformation.

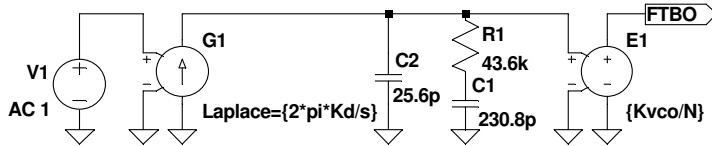
**Q2.23**  $\omega_2=10.\omega_1$  peut s'écrire  $\frac{C_1 + C_2}{R_1.C_1.C_2} = \frac{10}{R_1.C_1}$  soit  $\frac{C_1}{C_2} = 9$

$\omega_j^2 = \omega_1.\omega_2.\sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} = \frac{\omega.LBW^2}{\sqrt{10}}$  et comme  $\omega_j = \sqrt{\frac{2\pi.Kd.Kvcp}{N.(C_1 + C_2)}}$  alors  $C_1 + C_2 = 10.C_2 = \frac{2\pi.Kd.Kvco.\sqrt{10}}{N.\omega.LBW^2}$

On en déduit donc  $C_2=25,6\text{pF}$  (27pF E12)  $C_1=230,8\text{pF}$  (220pF E3)

$\omega_j^2 = \omega_1.\omega_2.\sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} = \frac{\omega.LBW^2}{\sqrt{10}} = \frac{\sqrt{10}}{(R_1.C_1)^2}$  donc  $R_1 = \frac{\sqrt{10}}{C_1.\omega.LBW}$  soit  $R_1=43,6\text{k}\Omega$  (43k E24)

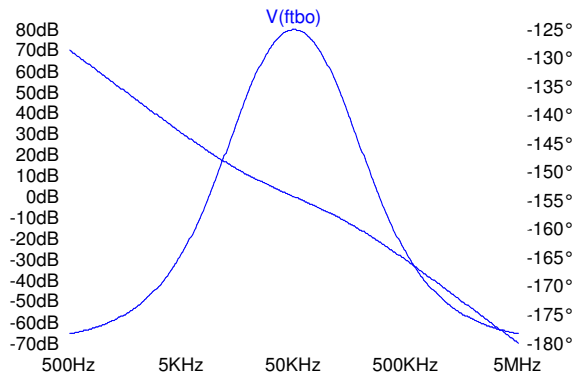
**Modélisation de la boucle ouverte**



.param Kd=6.37μ Kvco=25.6meg N=128

.inc SP.lib

.ac dec 100 500 5meg



**Etude de l'oscillateur à quartz**

**Q2.24** L'impédance du quartz est de la forme indiquée avec :

$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Pulsation de résonance série

$Q_s = \frac{L\omega_s}{R}$

Facteur de qualité série :

$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L.\frac{C.Co}{C + Co}}}$

Pulsation de résonance parallèle

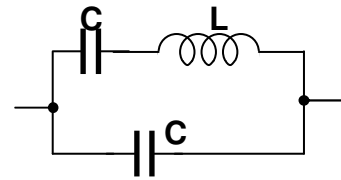
$Q_p = \frac{L\omega_p}{R}$

Facteur de qualité parallèle

**Q2.25** Il s'agit de la capacité de charge qui permet d'obtenir la fréquence d'oscillation indiquée. On doit alors vérifier la relation  $|ZQ(f=f_{xtal})|=1/(C_{load}.2\pi.f_{xtal})$

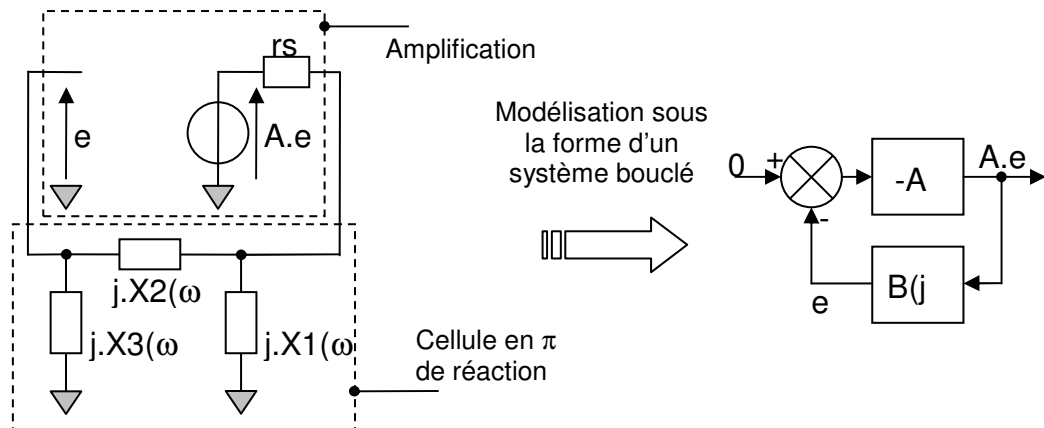
**Q2.26** Il s'agit d'un oscillateur à boucle de réaction de type Colpitts. Le montage à transistor sert d'amplificateur et la chaîne de réaction est formée par le quartz et les condensateurs C9 C10 et la diode varicap D2.

**Q2.27** Le modèle sans perte conduit au schéma suivant :



Dans ces conditions 
$$Z_Q = \frac{1}{j(C + C_0)\omega} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_S}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_P}\right)^2} = jX_Q(\omega)$$

**Q2.28** Le montage oscillateur peut se modéliser de la façon suivante :



La modélisation sous la forme d'un système bouclé conduit alors à

$$B(j\omega) = \frac{-X1.X3}{-X1 \cdot (X2 + X3) + j.rs.(X1 + X2 + X3)}$$

La recherche des conditions pour que ce système soit instable et donc oscillant nous donne en outre  $X1(\omega) + X2(\omega) + X3(\omega) = 0$  qui nous permet ainsi de déterminer la fréquence des oscillations  $\omega = \omega_{OSC}$

Appliquer à notre oscillateur cela donne :  $X_Q(\omega) - \frac{1}{C_{D2} \cdot \omega} - \frac{1}{C_9 \cdot \omega} - \frac{1}{C_{10} \cdot \omega} = 0$  de la forme

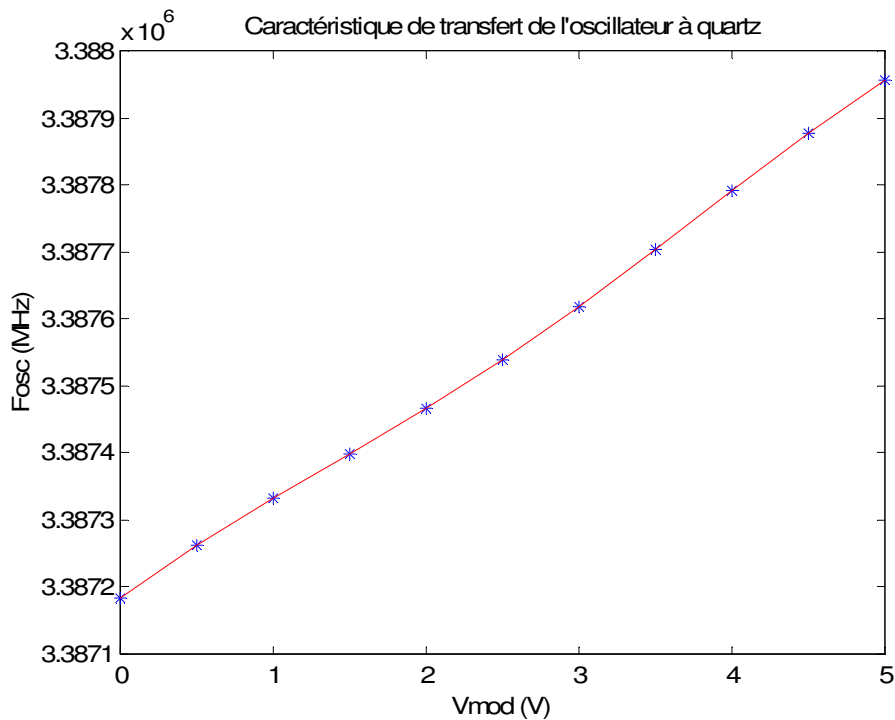
$$X_Q(\omega_{osc}) = \frac{1}{C_1 \cdot \omega_{osc}}$$

Avec 
$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_{D2}} + \frac{1}{C_9} + \frac{1}{C_{10}}$$

**Q2.29** L'application de la relation précédente conduit à poser

$$Xa(\omega_{osc}) = \frac{-1}{(C + Co)\omega_{osc}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\omega_{osc}}{\omega_s}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega_{osc}}{\omega_p}\right)^2} = \frac{1}{Cl \cdot \omega_{osc}} \text{ soit } \omega_{osc} = \sqrt{\frac{\frac{C + Co}{Cl} + 1}{\frac{1}{\omega_s^2} + \frac{C + Co}{Cl \cdot \omega_p^2}}}$$

Vmod (V)	0	0,5	1	1,5	2	2,5
CD2 (pF)	71.82	56.1	46.89	40.33	35.13	30.71
Cl (pF)	28.73	25.83	23.69	21.89	20.26	18.71
Fosc (MHz)	3.387184	3.387263	3.387332	3.387399	3.387466	3.387539
Vmod (V)	3	3,5	4	4,5	5	
CD2 (pF)	26.87	23.57	20.83	18.62	16.87	
Cl (pF)	17.21	15.79	14.51	13.41	12.47	
Fosc (MHz)	3.387619	3.387704	3.387791	3.387876	3.387955	



Si l'on se place au point de repos correspondant à la fréquence porteuse 433,6MHz à la sortie du montage correspondant à la fréquence d'oscillation de 3,3875MHz on peut espérer une déviation  $\Delta f = \pm 400\text{Hz}$  approximativement.

### Modulation de fréquence

**Q2.30** Il s'agit d'une modulation de fréquence caractéristique appelée « faux porteur » pour laquelle il n'existe pas de composante fréquentielle à la fréquence porteuse. L'indice de modulation correspondant est  $m=2,4$ .

### Q2.31

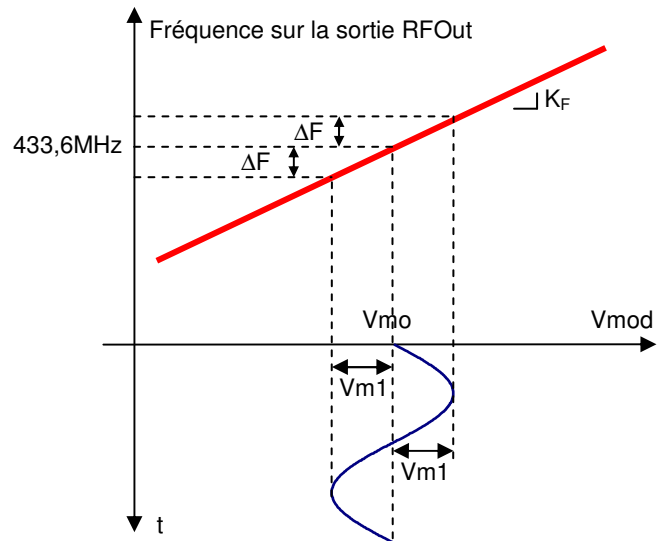
L'offset  $V_{m0}$  présent sur l'entrée du modulateur permet d'obtenir la fréquence porteuse à 433,6MHz en sortie. Dans le tracé de l'oscillateur à quartz une tension de 2,5V correspond à la fréquence de 3,3875MHz qui permet d'obtenir par multiplication de 128 grâce à la boucle à verrouillage de phase la fréquence de 433,6MHz.

L'indice de modulation est tel que :

$$m = \frac{K_F \cdot V_{m1}}{f_a} \text{ donc } K_F = \frac{m \cdot f_a}{V_{m1}}$$

Avec  $f_a = 5\text{kHz}$  (d'après l'analyse spectrale) soit  $K_F = 20\text{kHz/V}$

Le gain de conversion autour du point de polarisation pour l'oscillateur à quartz est d'environ  $153\text{Hz/V}$  ce qui correspond à  $19,6\text{kHz}$  pour le modulateur FM et confirme ainsi le résultat obtenu.



**Q2.32** Le paramètre RBW pour Resolution Bandwidth correspond à la résolution du filtre d'analyse utilisé dans l'analyseur de spectre à balayage dont le temps de balayage correspond à la grandeur SWT (Sweep Time). Pour que la mesure soit correcte ces paramètres doivent vérifier la relation :

$$\text{SWT} > \frac{\text{SPAN}}{(\text{RBW})^2}$$

**Q2.33** En considérant un niveau moyen de  $5,38\text{dBm}$  pour les 2 raies présentes à  $f_0 + f_a$  ou  $f_0 - f_a$  et si l'on appelle  $S_{eff}$  l'amplitude efficace du signal modulé FM et  $P_{RF}$  sa puissance dans une charge de  $50\Omega$  sur la sortie  $\text{RFOut}$  alors

$$P_{1dBm} = 5,38\text{dBm} = 10 \cdot \log \left( \frac{J_1^2 \cdot S_{eff}^2}{50} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{S_{eff}^2}{50} \right) + 20 \cdot \log(J_1) = 10 \cdot \log \left( \frac{P_{RF}}{1\text{mW}} \right) + 20 \cdot \log(J_1) \text{ avec } J_1 \text{ qui}$$

correspond à la fonction de Bessel pour  $m=2,4$  soit  $J_1=0,52$  donc  $P_{RF} = 12,8\text{mW}$  ce qui correspond aux performances du circuit  $\text{RF2512}$

**Q2.34** La déviation maximale du modulateur FM est de  $2,5V \cdot K_F$  soit  $\Delta F_{max}=50\text{kHz}$ .

La bande passante maximale est obtenue en utilisant la bande de Carson soit  $B_{max}=2(\Delta F_{max}+f_{amax})$ . Comme la bande passante des signaux capteurs ne dépasse pas  $5\text{kHz}$  on en déduit une bande maximale  $B_{max}=110\text{kHz}$ .

**Q2.35** Les éléments à la sortie permettent d'effectuer un filtrage sélectif tout en garantissant une adaptation d'impédance entre la sortie du circuit  $\text{RF2512}$  et l'étage suivant.

**Questions générales sur la réception radio**

**Q3.1**  $\lambda$  représente la longueur d'onde.  $\lambda = \frac{c}{f}$  donc  $\lambda = 69,2\text{cm}$

**Q3.2** Le gain d'une antenne correspond au meilleur gain directif dans une ou éventuellement plusieurs directions en utilisant comme modèle de référence une antenne isotrope qui se comporte comme un point dans l'espace qui rayonnerait de la même façon dans toutes les directions. Pour une antenne isotrope le gain est de 1 ou, exprimé en décibel, il est de 0 dBi (décibel par rapport à l'antenne isotrope).

**Q3.3** En reformulant la formule de Friis en adoptant une notation en dBm on montre que

$$P_r \text{ dBm} = P_o \text{ dBm} + G_1 \text{ dBi} + G_2 \text{ dBi} + 20 \cdot \log\left(\frac{c}{4\pi}\right) - 20 \cdot \log(f) - 20 \cdot \log(D)$$

Ce qui nous donne  $P_r \text{ dBm} = -72,5\text{dBm}$  ce qui est nettement supérieur à la sensibilité du circuit RF2917 qui annonce une valeur typique de  $-101\text{dBm}$ .

**Q3.4** Il est parfaitement adapté à la liaison puisque ce circuit permet :

- La réception d'un signal modulé FM à 433,6MHz
- La démodulation FM avec une sortie analogique
- Une bande passante du démodulateur suffisante

**Etude du changement de fréquence**

**Q3.5** Le changement de fréquence permet d'abaisser la fréquence de réception afin d'effectuer une démodulation autour d'une valeur plus raisonnable en utilisant des dispositifs conventionnels. Il permet aussi de recevoir plusieurs fréquences porteuses sans changer la structure du démodulateur. En abaissant la fréquence de réception il est ainsi possible d'utiliser des éléments classiques permettant d'effectuer un filtrage efficace de la bande passante autour de la porteuse. Les 2 étages d'amplification et de filtrage permettent d'obtenir un fort gain et assure ainsi une bonne sensibilité d'entrée au récepteur. Les 2 filtres sont nécessaires pour améliorer la réjection hors bande.

**Q3.6** Les 2 fréquences pour l'oscillateur à quartz sont :

$$F_{\text{xtal1}} = (433,6 - 10,7)\text{MHz} / 64 = 6,6078125\text{MHz} \text{ et } F_{\text{xtal2}} = (433,6 + 10,7)\text{MHz} / 64 = 6,9421875\text{MHz}$$

Les fréquences images correspondantes sont alors :

$$F_{\text{image1}} = (433,6 - 2 \cdot 10,7)\text{MHz} = 412,2\text{MHz} \text{ et } F_{\text{image2}} = (433,6 + 2 \cdot 10,7)\text{MHz} = 455\text{MHz}$$

**Q3.7** Afin d'éliminer la fréquence image il est nécessaire d'utiliser un filtre de nature passe bande centré à 433,6MHz et possédant une forte réjection pour la fréquence image considérée. Pour ces fréquences seuls les filtres à ondes de surface (SAW Filter) sont possibles.



**Q3.8** Comme  $f_{OL}$  prend la valeur la plus basse alors  $f_R=f_{OL}+F_I$  et  $f_{IM}=f_{OL}-F_I$

On obtient donc à la sortie des 2 mélangeurs :

$$V_{me1} = \alpha \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (f_{OL} + F_I) \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (f_{OL} - F_I) \cdot t)] \cdot \cos(2\pi f_{OL} t) \text{ et}$$

$$V_{me2} = \alpha \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (f_{OL} + F_I) \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (f_{OL} - F_I) \cdot t)] \cdot \cos(2\pi f_{OL} t - \pi/2) \text{ avec } \alpha = 10^{-(G_m/20)}$$

Ce qui permet d'écrire que

$$V_{me1} = (\alpha/2) \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} + F_I) \cdot t) + R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} - F_I) \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t)]$$

$$V_{me2} = (\alpha/2) \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} + F_I) \cdot t - \pi/2) + R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \pi/2) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} - F_I) \cdot t - \pi/2) +$$

$$R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t - \pi/2)]$$

Donc

$$V_{if1} = (\alpha/2) \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} + F_I) \cdot t) + R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} - F_I) \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t)]$$

$$V_{if2} = (\alpha/2) \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} + F_I) \cdot t - \pi) + R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} - F_I) \cdot t - \pi) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t - \pi)]$$

Ce qui nous donne à la sortie  $F_I$  :

$$V_{if} = 10^{-(6/20)} \cdot (\alpha/2) \cdot R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t)$$

On ne retrouve qu'un seul terme en  $R_0$ . ce qui justifie bien le nom de réjection de fréquence image

**Q3.9** En reprenant le calcul précédent, seul  $V_{if2}$  est affecté par l'erreur de phase :

$$V_{if1} = (\alpha/2) \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} + F_I) \cdot t) + R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} - F_I) \cdot t) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t)]$$

$$V_{if2} = (\alpha/2) \cdot [R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} + F_I) \cdot t - \pi/2 + \theta_r) + R_0 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \theta_r) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot (2 \cdot f_{OL} - F_I) \cdot t - \pi/2 + \theta_r) + R_1 \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t - \pi/2 + \theta_r)]$$

Ce qui nous donne à la sortie  $F_I$  :

$$V_{if} = 10^{-(6/20)} \cdot (\alpha/4) \cdot R_0 \cdot [\cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) + \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \theta_r)] + 10^{-(6/20)} \cdot (\alpha/4) \cdot R_1 \cdot [\cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) - \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \theta_r)]$$

$$\cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) + \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \theta_r) = (1 + \cos(\theta_r)) \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) - \sin(\theta_r) \cdot \sin(2\pi \cdot F_I \cdot t) = 2 \cdot \cos(\theta_r/2) \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \psi_r)$$

$$\cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) - \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \theta_r) = (1 - \cos(\theta_r)) \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t) + \sin(\theta_r) \cdot \sin(2\pi \cdot F_I \cdot t) = 2 \cdot \sin(\theta_r/2) \cdot \cos(2\pi \cdot F_I \cdot t + \xi_r)$$

On retrouve donc 2 composantes fréquentielles l'une dépendante de  $R_0$  avec un facteur  $\cos(\theta_r/2)$  et l'autre dépendante de  $R_1$  avec un facteur  $\sin(\theta_r/2)$

**Q3.10** Il faut que le rapport  $\sin(\theta_r/2)/\cos(\theta_r/2) < 1/100$  donc  $\theta_{rmax} = 2 \arctan(1/100)$  soit  $\theta_{rmax} = 1,15^\circ$

**Q3.11** Le déphaseur  $D_{ph1}$  peut être réalisé numériquement (Bascules D).

### ***Etude de la partie démodulation***

**Q3.12** La démodulation de fréquence peut être effectuée au moyen d'une boucle à verrouillage de phase ou par une technique de discrimination en fréquence.

**Q3.13** La borne MUTE permet de choisir entre les 2 types de modulations FM ou FSK. Dans notre cas la borne MUTE doit être laissée non connecté (en l'air)

**Q3.14** Si l'on considère un signal modulant de la forme  $\cos(2\pi.f_1.t)$ , le signal modulé en fréquence peut s'écrire :

$$V_{23}(t) = U \cdot \cos\left(2\pi.F_1.t + \frac{\Delta f_1}{f_1} \cdot \sin(2\pi.f_1.t)\right)$$

**Q3.15** On obtient la forme indiquée avec  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L.(C + C_0)}}$   $Q = R \cdot \sqrt{\frac{C + C_0}{L}}$  et  $A_0 = \frac{R.C_0}{\sqrt{L.(C + C_0)}}$

**Q3.16**  $|T(jf)| = \frac{\frac{A_0.f}{f_0}}{\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}} = \frac{\frac{A_0.f}{f_0}}{\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{f^2 - f_0^2}{f_0 f}\right)^2}}$  donc pour f proche de  $f_0$   $|T(jf)| = A_0$

$Arg[T(jf)] = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(Q \cdot \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)\right)$  ce qui pour f proche de  $f_0$  ( $f=f_0+\Delta f$ ) avec  $\Delta f$  petit conduit à

$Arg[T(jf)] = \frac{\pi}{2} - 2Q \frac{\Delta f}{f_0}$  de la forme  $Arg[T(jf)] = \frac{\pi}{2} + \alpha \cdot \Delta f$  avec  $\alpha = -\frac{2Q}{f_0}$

**Q3.17** La fréquence  $f_0$  doit être parfaitement calé sur la fréquence intermédiaire  $F_1$  ce qui est le cas lorsque l'on utilise des éléments piezo-électrique. Dans le cas de circuit d'accord LC il est indispensable de prévoir un réglage généralement en utilisant une inductance variable.

**Q3.18** On peut écrire le signal à la sortie du mélangeur que l'on considère ici comme un multiplieur :

$$FMOUT = A.K.U^2 \cdot \cos\left(2\pi.F_1.t + \frac{\Delta f_1}{f_1} \cdot \sin(2\pi.f_1.t)\right) \cdot \cos\left(2\pi.F_1.t + \frac{\Delta f_1}{f_1} \cdot \sin(2\pi.f_1.t) + \frac{\pi}{2} - 2Q \frac{\Delta f_1 \cdot \cos(2\pi.f_1.t)}{f_0}\right)$$

$$FMOUT = \frac{A.K.U^2}{2} \left[ \cos\left(2\pi.2F_1.t + \frac{2\Delta f_1}{f_1} \cdot \sin(2\pi.f_1.t) + \frac{\pi}{2} - 2Q \frac{\Delta f_1 \cdot \cos(2\pi.f_1.t)}{f_0}\right) + \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2Q \frac{\Delta f_1 \cdot \cos(2\pi.f_1.t)}{f_0}\right) \right]$$

Un filtrage passe bas dont la fréquence de coupure  $f_c$  est telle que  $2F_1 \gg f_c > f_1$  permet d'obtenir un signal démodulé de la forme

$$DemOUT = \frac{A.K.U^2}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2Q \frac{\Delta f_1 \cdot \cos(2\pi.f_1.t)}{f_0}\right) = \frac{A.K.U^2}{2} \cdot \sin\left(2Q \frac{\Delta f_1 \cdot \cos(2\pi.f_1.t)}{f_0}\right)$$
 ce qui pour de petites

variations de fréquence nous donne  $DemOUT = \frac{A.K.U^2.Q.\Delta f_1}{f_0} \cdot \cos(2\pi.f_1.t)$  correspondant au signal modulant.

### **Etude de l'interface démodulateur / convertisseur**

**Q3.19** La capacité  $C_0$  permet d'assurer avec la résistance de sortie de la borne FMOUT du circuit RF2917 un filtrage passe bas permettant d'éliminer les composantes autour de  $2.F_1$ . L'impédance de sortie élevée du circuit RF2917 oblige l'utilisation d'un montage suiveur à ampli-op.

**Q3.20** : Cette question n'existe pas.

**Q3.21** Le second ampli-op apporte une amplification d'un facteur de 10 nécessaire pour permettre l'utilisation de la dynamique complète à l'entrée du convertisseur. On se retrouve donc avec une variation de 2Vpp sur l'entrée LINR du convertisseur.

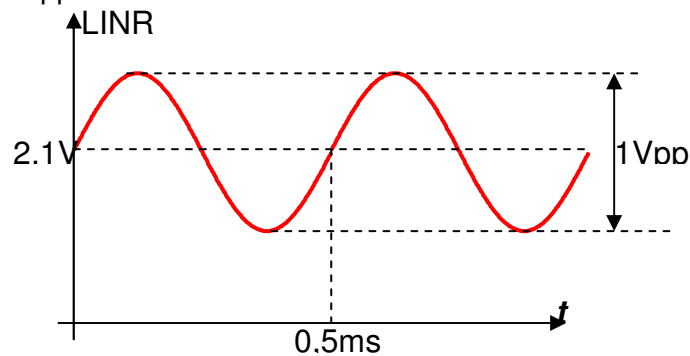
Le condensateur C1 permet de couper la composante continue en entrée. La fréquence de coupure haute est alors  $f_{c1} = \frac{1}{2\pi R1.C1} = 7,2\text{Hz}$  ce qui est largement inférieur aux fréquences les plus basses du capteur acoustique (20Hz)

Le condensateur C2 assure un filtrage passe bas suffisamment efficace pour le convertisseur analogique numérique utilisé. La fréquence de coupure est alors  $f_{c2} = \frac{1}{2\pi R2.C2} = 72,3\text{kHz}$  largement supérieure à la fréquence des signaux du capteur.

La sortie CMOUT permet d'effectuer une polarisation correcte du montage à amplificateur opérationnel.

**Q3.22** OLB=1 pour bénéficier de la dynamique de conversion complète du convertisseur.

**Q3.23** Avec une déviation de 15kHz on obtient sur la sortie FMOOut un signal dont la composante alternative est de 100mVpp.



### **Etude du CODEC CS4215**

**Q3.24** La séparation des alimentations en 2 sections analogique et numérique permet d'améliorer les performances de conversion du circuit en évitant que le bruit de découpage numérique interagisse avec les parties analogiques de ce composant.

**Q3.25** Il s'agit d'un convertisseur analogique numérique de type  $\Delta\Sigma$  avec une fréquence de sur-échantillonnage 64 fois plus grande. Ce circuit intègre des filtres décimateurs permettant ainsi une l'utilisation de filtre anti-repliement très simple en entrée du circuit.

**Q3.26** Bande passante du signal capteur = 5kHz donc  $F_e = 11.025\text{kHz}$  car  $F_e/2 > 5\text{kHz}$  donc DFR2-0 = [0 0 1]

Les lois A et  $\mu$  correspondent à des lois classiquement utilisés pour la conversion de la voix en téléphonie. Dans notre cas, comme il s'agit d'un système d'acquisition de signaux en sortie de capteurs, une simple loi linéaire suffit.

**Q3.27** Data Format Register 1 0 0 0 1 1 0 0

### 4.3 Rapport sur la composition d'électrotechnique

Le sujet de la session 2010 portait sur les différents sous-ensembles d'une alimentation sans interruption (ASI) de type « on-line ». Le sujet abordait quatre points principaux :

- Le redresseur à absorption sinusoïdale assurant la conversion AC-DC entre le réseau industriel monophasé et un bus continu. Etude des harmoniques et du filtrage.
- L'onduleur MLI générant le réseau secouru. Analyse du fonctionnement général, dimensionnement des semi-conducteurs et gestion des pertes.
- La source auxiliaire d'énergie et le convertisseur DC-DC associé. Fonctionnement de la pile à combustible et du hacheur, dimensionnement des composants magnétiques.
- Le groupe électrogène. Machine synchrone en fonctionnement déséquilibré.

Le sujet permettait de tester les connaissances des candidats sur un spectre large, ainsi qu'il est attendu d'un professeur agrégé.

Le jury a constaté de graves lacunes sur les fondamentaux du Génie Electrique ce qui entraîne des erreurs préjudiciables au traitement de chaque partie.

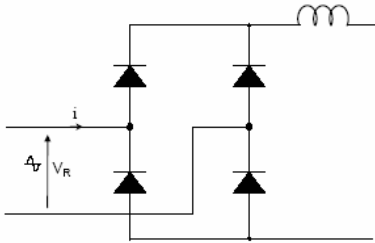
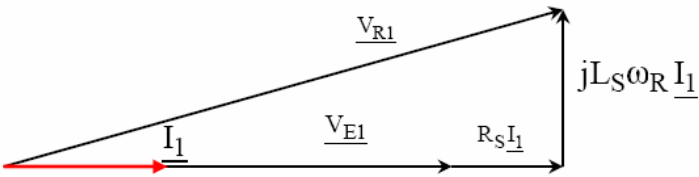
Pour faciliter la préparation à cette épreuve et compte tenu des faiblesses observées dans cette session, le jury propose les recommandations suivantes aux candidats :

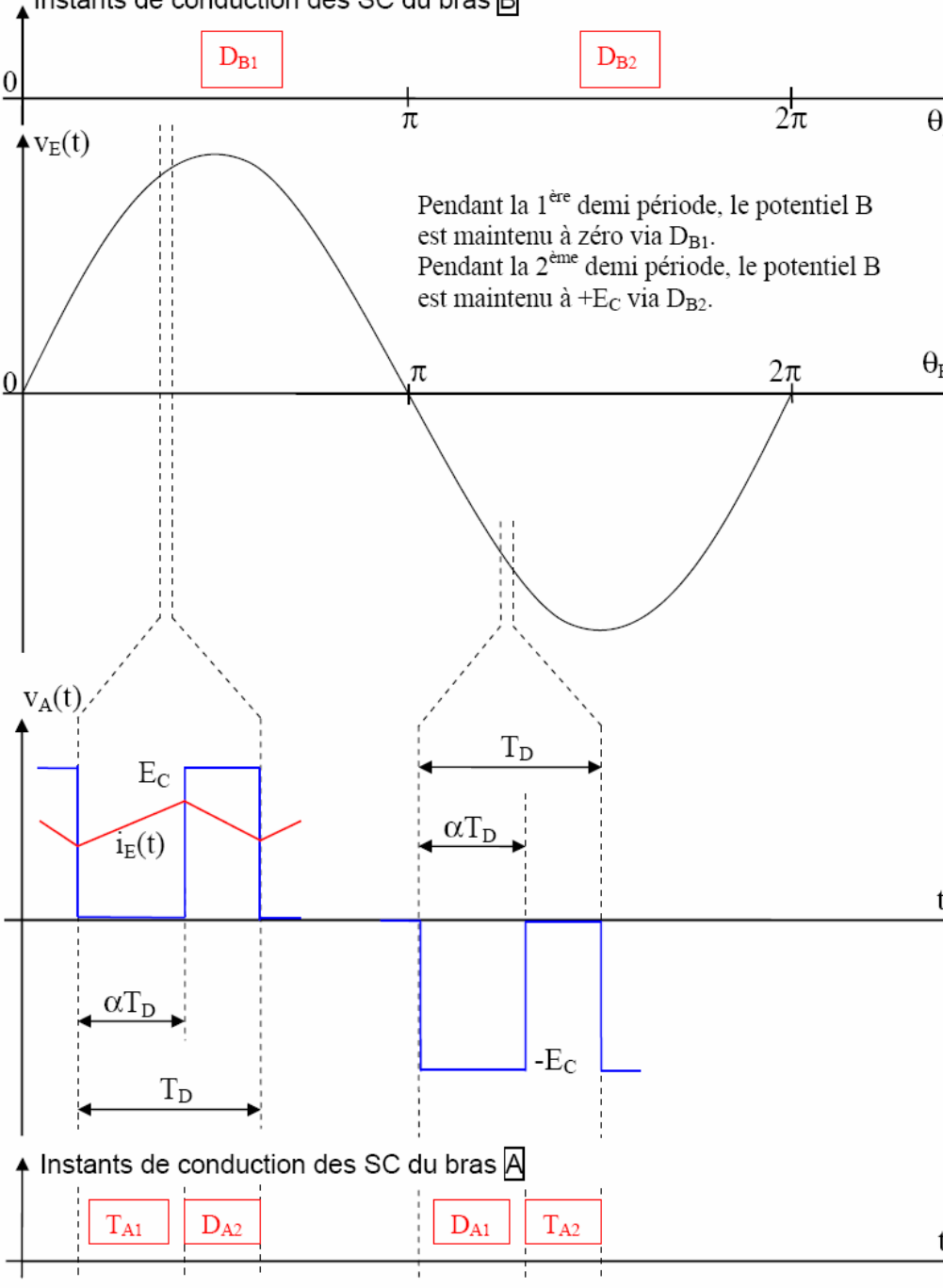
- Les fondamentaux de l'électrotechnique (en particulier les harmoniques et le filtrage), l'électronique de puissance (connaissance des structures de base à modulation de largeur d'impulsions) ainsi que les notions de compatibilité électromagnétique et de thermique doivent impérativement être mieux maîtrisés : ceux-ci relèvent des programmes en EEA à tous niveaux.
- Le sujet comportant des parties indépendantes, il est recommandé aux candidats de ne pas traiter celui-ci de façon linéaire mais plutôt en fonction de leurs connaissances les mieux maîtrisées. Une lecture préalable de l'ensemble du sujet est donc fortement conseillée.

L'épreuve est longue, les candidats doivent s'entraîner aux techniques de composition afin de traiter une proportion suffisante du sujet.

### 4.3.1 Corrigé du problème

#### Partie A. CONVERSION AC-DC

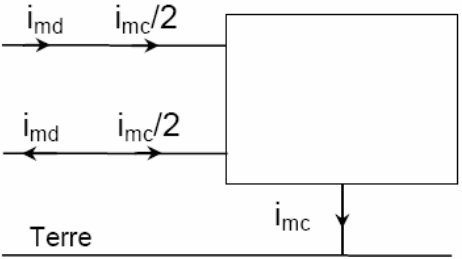
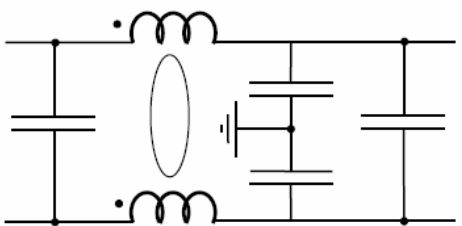
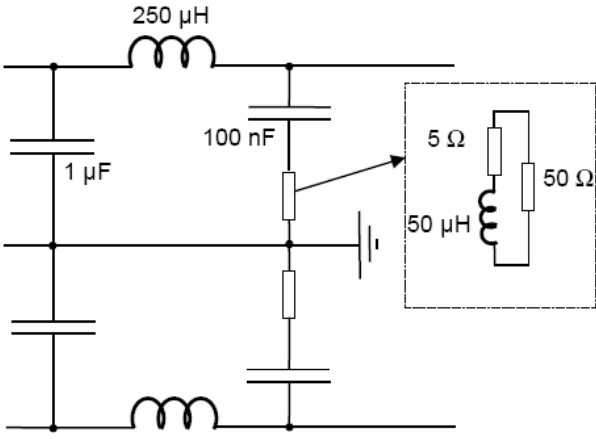
Q1.	<p>Cette forme d'onde de courant est typique d'un redresseur monophasé en pont débitant sur une source de courant.</p> 	
Q2.	$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_2^{\infty} I_k^2} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}$ <p><math>I = 51,6 \text{ A}</math></p> <p>Soit <math>S = V_R \cdot I = 11,9 \text{ kVA}</math></p>	
Q3.	<p>Le taux de distorsion harmonique s'exprime par :</p> $\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_k^2}}{I_1} = 25,7\%$	
Q4.	<p>Facteur d'accroissement des pertes :</p> <p><math>P = V_R \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1 = V_R \cdot I'</math></p> <p><math>\cos\phi_1 = 1</math> soit <math>I_1 = I'</math></p> <p>Pertes : <math>R_S \cdot I^2 = R_S \left( I_1^2 + \sum_2^{\infty} I_k^2 \right) = R_S \cdot I_1^2 (1 + \text{THD}_i^2)</math></p> <p>Soit un facteur d'accroissement des pertes de <math>(1 + \text{THD}_i^2) = 1,066</math></p>	
Q5.	<p><math>\underline{V_R} = jL_S \omega_R \underline{I_1} + R_S \underline{I_1} + \underline{V_{E1}}</math></p> 	
Q6.	<p>Calcul de <math>V_{E1}</math></p> $V_{R1}^2 = (V_{E1} + R_S I_1)^2 + (L_S \omega_R I_1)^2$ <p>Soit <math>V_{E1} = \sqrt{V_{R1}^2 - (L_S \omega_R I_1)^2} - R_S I_1 = 229 \text{ V}</math></p>	
Q7.	<p>Harmoniques de tension</p> <p>Pour <math>k &gt; 1</math> <math>V_{Rk} = 0</math>, soit <math>V_{Ek} = L_S \cdot k \cdot \omega_R \cdot I_k</math></p> <p><math>V_{E3} = 10,2 \text{ V}</math>, <math>V_{E5} = 8,4 \text{ V}</math>, <math>V_{E7} = 7,9 \text{ V}</math>, <math>V_{E9} = 5,37 \text{ V}</math>, <math>V_{E11} = 5,36 \text{ V}</math>, <math>V_{E13} = 4,08 \text{ V}</math></p>	

Q8.	<p>Taux de distorsion en tension</p> $\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{E_k}^2}}{V_{E1}} = 7,7\%$	
Q9.	<p>Instants de conduction des SC du bras B</p>  <p>Pendant la 1<sup>ère</sup> demi période, le potentiel B est maintenu à zéro via <math>D_{B1}</math>. Pendant la 2<sup>ème</sup> demi période, le potentiel B est maintenu à <math>+E_C</math> via <math>D_{B2}</math>.</p> <p>Instants de conduction des SC du bras A</p> <p><math>T_{A1}</math> <math>D_{A2}</math> <math>D_{A1}</math> <math>T_{A2}</math></p>	
Q10.	<p>Valeur moyenne de <math>v_A</math> sur une période de découpage</p> $\langle v_A \rangle = (1-\alpha)E_C$	
Q11.	<p>Voir document réponse DR1 sur la question Q9.</p>	

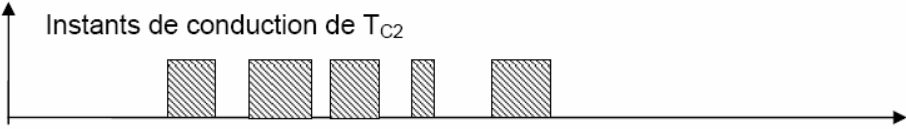
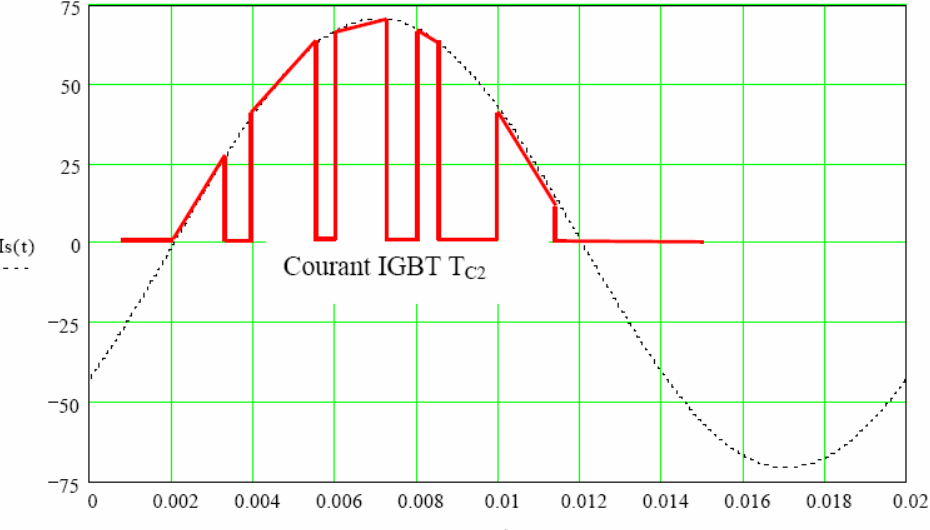
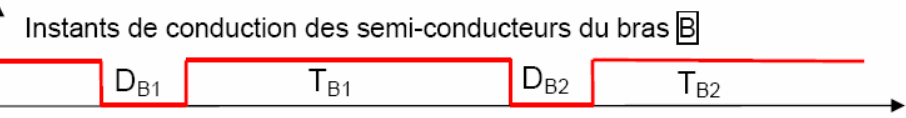
Q12.	Pour le bras $\mathbb{B}$ , ce sont les diodes $D_{B1}$ et $D_{B2}$ qui conduisent compte tenu du fait que le courant $i_{E-BF}$ est en phase avec la tension $v_E$ . Voir document réponse DR1 sur la question Q9.		
Q13.	$v_E = \langle v_A \rangle + L_E \frac{di_E}{dt}$ $v_{E(\theta_R)} = L_E \omega_R \frac{di_{E-BF}}{d\theta_R} + \langle v_A \rangle(\theta_R)$		
Q14.	$V_E \sqrt{2} \sin \theta_R = L_E \omega_R I_E \sqrt{2} \cdot \cos \theta_R + (1 - \alpha_{(\theta_R)}) E_C$ $\alpha_{(\theta_R)} = 1 - \frac{V_E \sqrt{2}}{E_C} \sin \theta_R + \frac{L_E \omega_R I_E \sqrt{2}}{E_C} \cdot \cos \theta_R$		
Q15.	<p>Au voisinage de zéro :</p> $\alpha_{(0)} = 1 + \frac{L_E \omega_R I_E \sqrt{2}}{E_C} > 1$ <p>Le rapport cyclique sera limité à 1, entraînant une distorsion du courant.</p>		
Q16.	<p>On limite le terme <math>\frac{L_E \omega_R I_E \sqrt{2}}{E_C}</math> à 2% de <math>\alpha_{max}</math></p> <p>Soit : <math>L_E \leq \frac{0,02 \cdot E_C}{\omega_R I_E \sqrt{2}}</math></p> <p><math>L_E \leq 360 \mu H</math></p>		
Q17.	Voir document réponse DR1 sur la question Q9.		
Q18.	$\Delta i_E = \frac{v_E}{L_E} \alpha \cdot T_D = \frac{v_{E(\theta_R)}}{L_E \cdot F_D} \alpha_{(\theta_R)}$		
Q19.	$\Delta i_{E(\theta_R)} = \frac{V_E \sqrt{2} \sin \theta_R}{L_E \cdot F_D} \left( 1 - \frac{V_E \sqrt{2}}{E_C} \sin \theta_R \right)$		
Q20.	<p>Ondulation maximale : on exprime la dérivée de l'ondulation</p> $\Delta i'_{E(\theta_R)} = \frac{V_E \sqrt{2}}{L_E \cdot F_D} \left( \cos \theta_R \left( 1 - \frac{V_E \sqrt{2}}{E_C} \sin \theta_R \right) + \sin \theta_R \left( -\frac{V_E \sqrt{2}}{E_C} \cos \theta_R \right) \right)$ $\Delta i'_{E(\theta_R)} = \frac{V_E \sqrt{2}}{L_E \cdot F_D} \cos \theta_R \left( 1 - 2 \frac{V_E \sqrt{2}}{E_C} \sin \theta_R \right)$ <p>Maximum pour <math>\Delta i'_{E(\theta_{RMAX})} = 0</math></p> <p>Soit <math>\theta_{RMAX} = \text{Arc sin} \frac{E_C}{2V_E \sqrt{2}} = 37,9^\circ</math></p> <p>On en déduit <math>\Delta i_{E \max} = \frac{E_C}{4 \cdot L_E \cdot F_D}</math></p>		

Q21.	<p>Valeur minimale de <math>L_E</math> :</p> $\Delta i_{E \max} = \frac{E_C}{4.L_E.F_D} \leq 30 \text{ A}$ $L_E \geq \frac{E_C}{4.\Delta i_{E \max}.F_D} \geq 208 \mu\text{H}$ <p>Le choix de <math>300 \mu\text{H}</math> est correct, compris entre <math>208 \mu\text{H}</math> et <math>360 \mu\text{H}</math>.</p>	
Q22.	<p>Le redresseur absorbe un courant sinusoïdal en phase avec la tension. Vis-à-vis du fondamental, il peut être considéré comme une résistance :</p> $R_{\text{eq}} = \frac{V_E}{I_E} = 4,6\Omega$	
Q23.	<p>Fonction de transfert du filtre :</p> $\frac{\frac{V_E}{V_R}}{\frac{R_{\text{eq}}}{1 + jR_{\text{eq}}C_F\omega_r}} = \frac{R_{\text{eq}}}{R_{\text{eq}} + jL_F\omega_r - R_{\text{eq}}L_FC_F\omega_r^2}$ <p>Coefficient d'amortissement :</p> $z = \frac{1}{2.R_{\text{eq}}} \sqrt{\frac{L_F}{C_F}}$	
Q24.	<p>Atténuation :</p> $\left  \frac{i}{i_E} \right _{j\omega} = \frac{1}{\frac{1}{jC_F\omega} + jL_F\omega} = \frac{1}{1 - L_FC_F\omega^2}$ <p>Pour <math>\omega = \omega_D</math> :</p> $\left  \frac{i}{i_E} \right _{\omega_D} = \frac{1}{\left  1 - \left( \frac{\omega_D}{\omega_F} \right)^2 \right }$	
Q25.	<p>Calcul du filtre :</p> <p>Atténuation de 40 dB <math>\Rightarrow \frac{\omega_D}{\omega_F} = 10</math> soit <math>\omega_F = 10 \text{ krad/s}</math></p> <p>Amortissement : <math>z = 1</math> soit <math>\sqrt{\frac{L_F}{C_F}} = 2.R_{\text{eq}} = 9,2\Omega</math></p> <p>On en déduit : <math>L_F = 915 \mu\text{H}</math> et <math>C_F = 10,8 \mu\text{F}</math></p>	
Q26.	<p>Seules les perturbations de mode différentiel (ondulation du courant <math>i_E</math>) seront atténuées par le filtre.</p>	



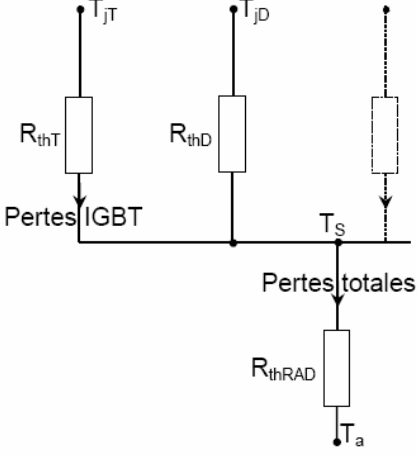
Q27.	<p>Les perturbations de mode commun concernent les courants qui ne se rebouclent pas par l'alimentation mais par la terre via le châssis de l'appareil.</p> 	
Q28.	<p>Filtre de mode commun :</p> 	
Q29.	<p>Le RSIL (Réseau Stabilisateur de Ligne) assure 3 rôles essentiels :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- garantit l'alimentation correcte en basse fréquence ou en continu,</li> <li>- bloque les perturbations HF venant du réseau,</li> <li>- aiguille les perturbations venant de l'appareil en test vers l'impédance de mesure.</li> </ul>	
Q30.	<p>Schéma simplifié d'un RSIL :</p> 	

Partie B. Onduleur

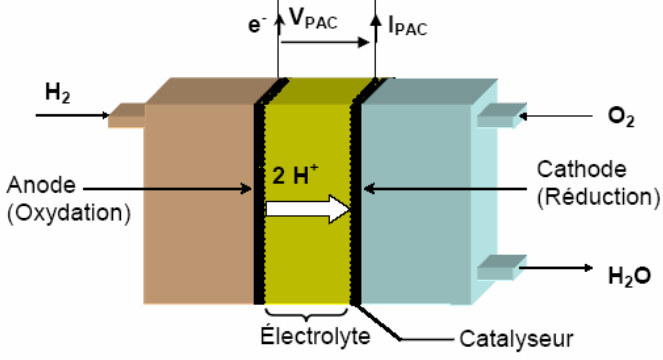
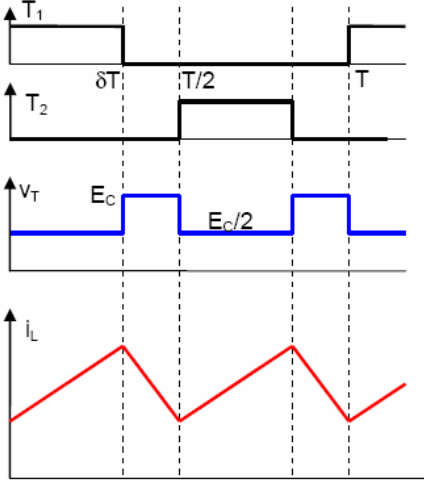
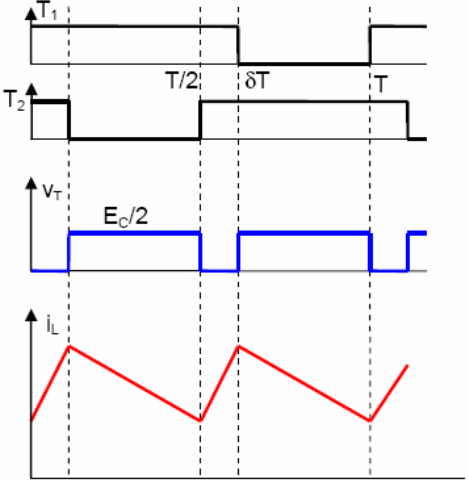
Q31.	<p>Modulation :</p> <p>Sur une période de découpage : <math>\langle v_C \rangle = \beta \cdot E_C</math></p> <p>Sur une période BF : <math>\langle v_C \rangle_{(t)} = \beta_{(t)} \cdot E_C = V_S \sqrt{2} \cdot \sin \omega_S t</math></p> <p>Soit : <math>\beta_{(t)} = \frac{V_S \sqrt{2}}{E_C} \sin \omega_S t = r \cdot \sin \omega_S t</math></p>		
Q32.	<p>Document réponse DR2, figure 2 :</p> 		
Q33.			
Q34.			
Q35.	<p>Dimensionnement du bras B :</p> <p>Valeurs moyennes :</p> <p>IGBT : <math>\langle I_{TB} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\pi} I_S \sqrt{2} \sin(\theta - \varphi) d\theta = I_S \sqrt{2} [-\cos(\theta - \varphi)]_{\varphi}^{\pi}</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px 0;"> <math display="block">\langle I_{TB} \rangle = \frac{I_S \sqrt{2}}{2\pi} (1 + \cos \varphi) = 20,26 \text{ A}</math> </div> <p>Diodes : <math>\langle I_D \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} -I_S \sqrt{2} \sin(\theta - \varphi) d\theta = I_S \sqrt{2} [\cos(\theta - \varphi)]_0^{\varphi}</math></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px 0;"> <math display="block">\langle I_{DB} \rangle = \frac{I_S \sqrt{2}}{2\pi} (1 - \cos \varphi) = 2,25 \text{ A}</math> </div>		

	<p>Valeurs efficaces :</p> $I_{\text{GBT}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\pi} (I_S \sqrt{2})^2 \sin^2(\theta - \varphi) d\theta = \frac{I_S^2}{2\pi} \int_{\varphi}^{\pi} [1 - \cos 2(\theta - \varphi)] d\theta$ $I_{\text{GBT}}^2 = \frac{I_S^2}{2\pi} \left[ \theta - \frac{\sin 2(\theta - \varphi)}{2} \right]_{\varphi}^{\pi} = \frac{I_S^2}{2\pi} \left[ \pi - \varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right]$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <math display="block">I_{\text{GBT}} = \frac{I_S}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\varphi}{\pi} + \frac{\sin 2\varphi}{2\pi}} = 34,4 \text{ A}</math> </div> <p>Diodes : <math>I_{\text{DB}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} (I_S \sqrt{2})^2 \sin^2(\theta - \varphi) d\theta = \frac{I_S^2}{2\pi} \int_0^{\varphi} [1 - \cos 2(\theta - \varphi)] d\theta</math></p> $I_{\text{DB}}^2 = \frac{I_S^2}{2\pi} \left[ \theta - \frac{\sin 2(\theta - \varphi)}{2} \right]_0^{\varphi} = \frac{I_S^2}{2\pi} \left[ \varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right]$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <math display="block">I_{\text{DB}} = \frac{I_S}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\varphi}{\pi} - \frac{\sin 2\varphi}{2\pi}} = 8,07 \text{ A}</math> </div>																									
Q36.	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">Bras <b>B</b></th> <th colspan="2">Bras <b>C</b></th> </tr> <tr> <th>IGBT</th> <th>Diode</th> <th>IGBT</th> <th>Diode</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Courant moyen</td> <td>20,26 A</td> <td>2,25 A</td> <td>13,75 A</td> <td>8,76 A</td> </tr> <tr> <td>Courant efficace</td> <td>34,4 A</td> <td>8,07 A</td> <td>27,5 A</td> <td>22,2 A</td> </tr> <tr> <td>Tenue en tension</td> <td colspan="4">400 V</td> </tr> </tbody> </table>		Bras <b>B</b>		Bras <b>C</b>		IGBT	Diode	IGBT	Diode	Courant moyen	20,26 A	2,25 A	13,75 A	8,76 A	Courant efficace	34,4 A	8,07 A	27,5 A	22,2 A	Tenue en tension	400 V				
	Bras <b>B</b>		Bras <b>C</b>																							
	IGBT	Diode	IGBT	Diode																						
Courant moyen	20,26 A	2,25 A	13,75 A	8,76 A																						
Courant efficace	34,4 A	8,07 A	27,5 A	22,2 A																						
Tenue en tension	400 V																									
Q37.	<p>Pertes par conduction du bras <b>C</b> :</p> <p>IGBT : <math>V_{\text{CE(TO)}} = 1,1 \text{ V}</math>, <math>r_T = 18 \text{ m}\Omega</math>  Diode : <math>V_{\text{(TO)}} = 0,9 \text{ V}</math>, <math>r_D = 10 \text{ m}\Omega</math></p> $P_{\text{Tc-cond}} = V_{\text{CE(TO)}} \langle I_T \rangle + r_T I_T^2 = 28,7 \text{ W}$ $P_{\text{Dc-cond}} = V_{\text{(TO)}} \langle I_D \rangle + r_D I_D^2 = 12,8 \text{ W}$																									
Q38.	<p>Pertes par commutation du bras <b>C</b> :</p> $E_{\text{on}} = E_{\text{off}} = E_{\text{RR}} = k \cdot E_C \cdot I_{\text{commuté}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ à } 70 \text{ A} / 600 \text{ V}$ <p>Soit <math>k = 47,6 \cdot 10^{-9}</math></p> $E_{\text{on}} = E_{\text{off}} = k \cdot 400 \cdot \langle I_T \rangle = 0,26 \text{ mJ}$ $E_{\text{RR}} = k \cdot 400 \cdot \langle I_D \rangle = 0,167 \text{ mJ}$ $P_{\text{Tc-com}} = (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \cdot F_D = 8,38 \text{ W}$ $P_{\text{Dc-com}} = E_{\text{RR}} \cdot F_D = 2,67 \text{ W}$																									
Q39.	<p>Pertes par conduction du bras <b>B</b> :</p> $P_{\text{TB-cond}} = V_{\text{CE(TO)}} \langle I_{\text{TB}} \rangle + r_T I_{\text{TB}}^2 = 43,6 \text{ W}$ $P_{\text{DB-cond}} = V_{\text{(TO)}} \langle I_{\text{DB}} \rangle + r_D I_{\text{DB}}^2 = 2,67 \text{ W}$																									

Q40.	Pertes par commutation du bras <b>B</b> : Elles peuvent être considérées négligeables car le bras <b>B</b> commute à 50 Hz.						
Q41.	Bras <b>B</b>		Bras <b>C</b>				
		IGBT	Diode	IGBT			Diode
	Pertes par conduction	43,6 W	2,67 W	28,7 W			12,8 W
	Pertes par commutation			8,38 W			2,67 W
	Pertes totales	43,6 W	2,67 W	<b>P<sub>T</sub> = 37,1 W</b>			<b>P<sub>D</sub> = 15,5 W</b>
Q42.	Le bras <b>B</b> voit la différence des courants des bras <b>A</b> et <b>C</b> : $i_B = i_C - i_E = I_S \sqrt{2} [\sin(\omega_S t - \varphi) - \sin \omega_S t]$ avec $I_E = I_S$ et $\omega_S = \omega_R$ $i_B = 2 \cdot I_S \sqrt{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \left( \omega_S t - \frac{\pi + \varphi}{2} \right)$ On en déduit : <b><math>I_B = 31,6</math> A et <math>\varphi' = 108^\circ</math></b>						
Q43.	Pertes par conduction du bras <b>B</b> : Courants moyens : $\langle I_{TB} \rangle = \frac{I_B \sqrt{2}}{2\pi} (1 + \cos \varphi') = 4,87$ A $\langle I_{DB} \rangle = \frac{I_B \sqrt{2}}{2\pi} (1 - \cos \varphi') = 9,37$ A Courants efficaces : $I_{TB} = \frac{I_B}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\varphi'}{\pi} + \frac{\sin 2\varphi'}{2\pi}} = 12,3$ A $I_{DB} = \frac{I_B}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\varphi'}{\pi} - \frac{\sin 2\varphi'}{2\pi}} = 18,7$ A Nouvelles pertes en conduction : $P_{TB\text{-cond}} = V_{CE(T0)} \cdot \langle I_{TB} \rangle + r_T I_{TB}^2 = 8,07$ W $P_{DB\text{-cond}} = V_{(T0)} \cdot \langle I_{DB} \rangle + r_D I_{DB}^2 = 11,9$ W						
Q44.	Pertes totales : Bras <b>A</b> = bras <b>C</b> = 2.(37,1+15,5) = 105 W Bras <b>B</b> = 2.(8,07+11,9) = 40 W <b>Pertes totales du module = 250 W</b>						

Q45.	<p>Schéma équivalent thermique :</p>  <p>The diagram shows a thermal equivalent circuit. At the top, there are three nodes representing temperatures: <math>T_{jT}</math>, <math>T_{jD}</math>, and a node connected to <math>T_s</math> via a dashed line. Below these are thermal resistances <math>R_{thT}</math>, <math>R_{thD}</math>, and <math>R_{thRAD}</math> respectively. A horizontal line represents the source temperature <math>T_s</math>. From this line, an arrow labeled 'Pertes IGBT' points down to <math>R_{thT}</math>, and another arrow labeled 'Pertes totales' points down to <math>R_{thRAD}</math>. The bottom node is <math>T_a</math>.</p>	
Q46.	<p>Calcul du refroidisseur :</p> <p>Le composant le plus contraint est l'IGBT, bras <b>A</b> ou <b>C</b>.</p> $T_{jT} = R_{thT} \cdot P_{IGBT} + R_{thRAD} \cdot P_{Totales} + T_a$ <p>Soit : <math>R_{thRAD} = \frac{T_{jT} - T_a - R_{thT} \cdot P_{IGBT}}{P_{Totales}} = 0,3^{\circ}\text{C} / \text{W}</math></p>	
Q47.	<p>Régime de neutre :</p> <p>Le neutre étant commun, les schémas de liaison à la terre devront être identiques en amont et en aval, à moins d'introduire une isolation galvanique.</p>	
Q48.	<p>Principaux schémas de liaison à la terre :</p> <p>T-T :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neutre de la source à la terre</li> <li>- Masses des appareils reliées à la terre</li> </ul> <p>Protection par disjoncteur différentiel</p> <p>I-T :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neutre de la source isolé</li> <li>- Masses des appareils reliées à la terre</li> </ul> <p>Protection par surveillance :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1<sup>er</sup> défaut : continuité de service</li> <li>- 2<sup>ème</sup> défaut : différentiel ou coupure (fusibles, ...)</li> </ul> <p>T-N :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neutre à la terre</li> <li>- Masses reliées à la terre et au neutre <ul style="list-style-type: none"> <li>- TNC : neutre et PE confondus</li> <li>- TNS : neutre et PE séparés</li> <li>- TNCs : TNS en aval de TNC</li> </ul> </li> </ul> <p>Protection par disjoncteur ou fusible</p>	

Partie C. Pile à Combustible et conversion DC-DC

Q49.	<p>Réaction chimique :</p>  <p style="text-align: center;"> <b>Réaction à l'anode :</b> <math>H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-</math> <span style="margin-left: 200px;"><b>Réaction à la cathode :</b> <math>1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O</math></span> </p>
Q50.	<p>Produits de la réaction : Eau + Chaleur</p>
Q51.	<p>Tension à vide : <math>V_{PAC-O} = 160.1 = 160 \text{ V}</math>  Tension en charge : <math>V_{PAC-n} = 160.0,6 = 96 \text{ V}</math>  Courant disponible : <math>I_{PAC} = 250.0,5 = 125 \text{ A}</math>  Puissance nominale : <math>96.125 = 12 \text{ kW}</math></p>
Q52.	<p>Autonomie :  50 litres =&gt; <math>8,5 \text{ m}^3</math>, soit <math>12,7 \cdot 10^6 \cdot 8,5 = 108 \text{ MJ}</math>  108 MJ correspondent à 30 kWh  Soit une énergie électrique disponible en sortie de PaC de <math>30.0,4 = 12 \text{ kWh}</math>  On en déduit, à 12 kW, une autonomie de 1 heure.</p>
Q53.	<p>Forme d'ondes :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Cas <math>\delta &lt; 0.5</math></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Cas <math>\delta &gt; 0.5</math></p>  </div> </div>

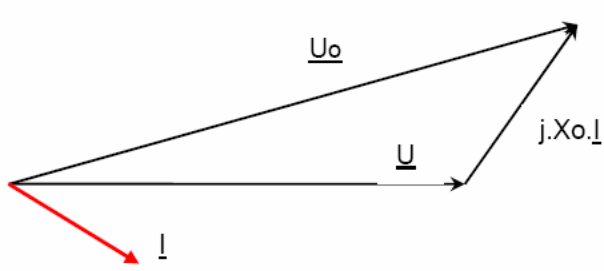
Q54.	<p>Expression de la tension de sortie :</p> <p>Pour <math>\delta &lt; 0,5</math> :</p> $\langle v_T \rangle = V_{PAC} = 2 \frac{E_C}{2} \delta + 2 \cdot E_C \left( \frac{1}{2} - \delta \right) = E_C (1 - \delta) \Rightarrow E_C = \frac{V_{PAC}}{1 - \delta}$ <p>Pour <math>\delta &gt; 0,5</math> :</p> $\langle v_T \rangle = V_{PAC} = 2 \cdot \frac{E_C}{2} (1 - \delta) = E_C (1 - \delta) \Rightarrow E_C = \frac{V_{PAC}}{1 - \delta}$ <p>Dans tous les cas, la tension de sortie est déterminée par : <math>E_C = \frac{V_{PAC}}{1 - \delta}</math></p>	
Q55.	<p>Rapport cyclique nominal :</p> $\delta = 1 - \frac{V_{PAC}}{E_C} = 1 - \frac{96}{400} = 0,76$	
Q56.	<p>Ondulation du courant d'entrée pour <math>\delta &gt; 0,5</math> :</p> <p>Pendant <math>(\delta T - T/2)</math>, <math>v_T = 0</math></p> $\text{Soit } \Delta i_L = V_{PAC} \frac{\delta T_D - \frac{T_D}{2}}{L} = \frac{(2\delta - 1)V_{PAC}}{2 \cdot L \cdot F_D}$	
Q57.	<p>Valeur de L :</p> $L = \frac{(2\delta - 1)V_{PAC}}{2 \cdot \Delta i_L \cdot F_D} = \frac{(2 \cdot 0,76 - 1) \cdot 96}{2 \cdot 0,25 \cdot 125 \cdot 16 \cdot 10^3} = 50 \mu\text{H}$ <p>Cette ondulation est à <math>2 \cdot F_D</math>, soit 32 kHz.</p>	
Q58.	<p>La tenue en tension des semi-conducteurs est de <math>E_C/2</math>, soit 200V. La technologie MOSFET est bien adaptée à ce montage.</p>	
Q59.	<p>Valeur efficace du courant <math>i_L</math> :</p> $I_L = \sqrt{\langle (i_L) \rangle^2 + \left( \frac{\Delta i_L}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^2} = 125,1 \text{ A}$ <p>Cette valeur diffère peu de la valeur moyenne.</p>	
Q60.	<p>Expression de la section du noyau :</p> $\hat{\Phi}_{\text{Total}} = \hat{B} \cdot A_e \cdot N = L \cdot \hat{I}$ <p>soit : <math>A_e = \frac{L \cdot \hat{I}}{\hat{B} \cdot N}</math></p>	
Q61.	<p>Produit des aires :</p> $S_b = k_b \cdot N \cdot S_{\text{cu}}$ $\text{soit } S_b \cdot A_e = \frac{k_b \cdot L \cdot \hat{I}_L \cdot I_L}{\hat{B} \cdot J} = 584 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$	

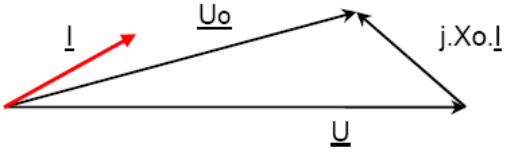
Q62.	<p>Choix du noyau :</p> <p>Parmi les noyaux U, on peut calculer :</p> <p>2.U 7236 : <math>S_b \cdot A_e : 561 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4</math></p> <p>2.U 8020 : <math>S_b \cdot A_e : 650 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4</math></p> <p>2.U 8038 : <math>S_b \cdot A_e : 792 \cdot 10^{-12} \text{ m}^4</math></p> <p>Seul l'association de 2.U 8020 convient, le noyau 8038 ne présentant pas une hauteur suffisante pour le bobinage de 50 mm.</p>		
Q63.	<p>Nombre de spires :</p> <p><math>A_e = 195 \text{ mm}^2</math></p> $N = \frac{L \cdot \hat{I}}{\hat{B} \cdot A_e} = 60 \text{ spires}$		
Q64.	<p>Occupation de la fenêtre de bobinage :</p> <p>Hauteur : <math>50 \text{ mm} &lt; 2 \cdot D = 56,2 \text{ mm}</math></p> <p>Largeur : <math>60 \text{ spires} \cdot 0,6 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = 56 \text{ mm} &lt; E = 59,3 \text{ mm}</math></p>		
Q65.	<p>Choix de la perméabilité relative :</p> <p>Longueur du circuit magnétique : <math>l_e = 273 \text{ mm}</math></p> $L = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A_e}{l_e}$ <p>soit <math>\mu_r = \frac{L \cdot l_e}{\mu_o \cdot N^2 \cdot A_e} = 15,5</math></p>		
Q66.	<p>Dans le cas d'une perméabilité relative réelle trop grande, il sera nécessaire d'insérer un entrefer entre les deux parties U.</p>		



## Partie D. Groupe électrogène

Q67.	<p>Choix de l'alternateur :</p> <p>En monophasé, l'alternateur délivrera :  <math>I = S/U = 12000 / 230 = 52,2 \text{ A} &lt; 55 \text{ A}</math>  L'alternateur débitera un courant inférieur à son courant nominal pour une puissance apparente d'environ 1/3 de <math>S_{\text{nominale}}</math>  (En triphasé, <math>U_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} = 325 \text{ V} &gt; 230 \text{ V}</math>)</p>		
Q68.	<p>Nombre de pôles :  <math>p = F/n = 2</math>, soit 4 pôles</p>		
Q69.	<p>En triphasé équilibré, le modèle de Behn-Eschenburg est applicable car la machine est à pôles lisses et est non saturée.  <math>X</math> représente la réaction magnétique d'induit : <math>X = (L_s - M)\omega</math>  Où <math>L_s</math> est l'inductance propre d'une phase et <math>M</math> la mutuelle entre deux phases.</p>		
Q70.	<p>Asservissement :  La fréquence de sortie peut être asservie à 50 Hz par action sur la vitesse du moteur thermique.  La tension de sortie est régulée à 230 V par action sur l'excitation de l'alternateur.</p>		
Q71.	<p>Rendement du moteur thermique :  Puissance utile de sortie = 11,8 kW  Puissance gaz consommée = <math>(9,5 \text{ kWh/m}^3) \cdot (5,1 \text{ m}^3/\text{h}) = 48,45 \text{ kW}</math>  Soit un rendement de 24,4%.</p>		
Q72.	<p>L'isolation classe H correspond à une température maximale de 180°C pour une élévation de température max de 125°C.</p>		
Q73.	<p>Composantes symétriques :</p> $\underline{I_a} = \underline{I_d} + \underline{I_i} + \underline{I_h}$ $\underline{I_b} = a^2 \cdot \underline{I_d} + a \cdot \underline{I_i} + \underline{I_h}$ $\underline{I_c} = a \cdot \underline{I_d} + a^2 \cdot \underline{I_i} + \underline{I_h}$ $\underline{I_d} = \frac{1}{3} (\underline{I_a} + a \cdot \underline{I_b} + a^2 \cdot \underline{I_c})$ $\underline{I_i} = \frac{1}{3} (\underline{I_a} + a^2 \cdot \underline{I_b} + a \cdot \underline{I_c})$ $\underline{I_h} = \frac{1}{3} (\underline{I_a} + \underline{I_b} + \underline{I_c})$		
Q74.	<p>A partir du schéma équivalent par phase :</p> $\underline{V_d} = \underline{E_d} - j \cdot X_d \cdot \underline{I_d} = \underline{E} - j \cdot X_d \cdot \underline{I_d}$ $\underline{V_i} = \underline{E_i} - j \cdot X_i \cdot \underline{I_i} = -j \cdot X_i \cdot \underline{I_i}$ $\underline{V_h} = \underline{E_h} - j \cdot X_h \cdot \underline{I_h} = -j \cdot X_h \cdot \underline{I_h}$		
Q75.	<p>Débit monophasé :</p> $\underline{I_a} = \underline{I} \quad \underline{I_d} = \frac{1}{3} (1 - a) \quad \underline{V_d} = \underline{E} - j \cdot X_d \cdot \frac{1}{3} (1 - a)$ $\underline{I_b} = -\underline{I} \quad \underline{I_i} = \frac{1}{3} (1 - a^2) \quad \underline{V_i} = -j \cdot X_i \cdot \frac{1}{3} (1 - a^2)$ $\underline{I_c} = 0 \quad \underline{I_h} = 0 \quad \underline{V_h} = 0$		

	$\underline{V}_a = \underline{V}_d + \underline{V}_i + \underline{V}_h = \underline{E} - j.X_d.\frac{I}{3}(1-a) - j.X_i.\frac{I}{3}(1-a^2)$ $\underline{V}_b = a^2.\underline{V}_d + a.\underline{V}_i + \underline{V}_h = a^2.\underline{E} - j.X_d.\frac{I}{3}a^2(1-a) - j.X_i.\frac{I}{3}a(1-a^2)$ $\underline{V}_c = \text{inutile}$		
Q76.	<p>Expression de la tension de sortie :</p> $\underline{U} = \underline{V}_a - \underline{V}_b = \underline{E}(1-a^2) - j.X_d.\frac{I}{3}(1-a-a^2+1) - j.X_i.\frac{I}{3}(1-a^2-a+1)$ $\underline{U} = \underline{E}(1-a^2) - j.(X_d+X_i)I$ $\underline{U} = -j.a\sqrt{3}.\underline{E} - j.(X_d+X_i)I$ $\underline{U} = \underline{U}_o - j.X_o.I$		
Q77.	<p>On en déduit : <math>\underline{U}_o = \sqrt{3}.\underline{E}</math>  <math>X_o = X_d + X_i = 1,1.X = 1,43 \Omega</math></p> <p><math>X_o</math> ne dépend pas de <math>X_h</math> car le courant neutre est nul, ce qui entraîne l'absence de composante homopolaire.</p>		
Q78.	<p>Courant et facteur de puissance :</p> $I = S/U = 52,2 \text{ A}$ $\cos\varphi = P/S = 0,833$		
Q79.	<p>Plage de variation de <math>U_o</math> :</p> $\underline{U}_o = \underline{U} + j.X_o.I$ <p>Phase AR</p>  $U_o^2 = U^2 + (X_o.I)^2 - 2.U.X_o.I.\cos(\varphi + \pi/2)$ $U_o = 278 \text{ V} \Rightarrow E = \frac{U_o}{\sqrt{3}} = 161 \text{ V}$		

	<p>Phase AV</p>  <p><math>U_o = 199 \text{ V} \Rightarrow E = \frac{U_o}{\sqrt{3}} = 115 \text{ V}</math></p> <p>On en déduit : <math>115 \text{ V} &lt; E &lt; 161 \text{ V}</math></p>	
Q80.	<p>En régime nominal triphasé :</p> <p><math>X = 1,3 \Omega</math></p> <p>E<sub>max</sub> est obtenu sur charge inductive :</p> <p><math>E^2 = V^2 + (X.I)^2 - 2.V.X.I.\cos(\varphi + \pi/2)</math>  avec <math>V = 135 \text{ V}</math> et <math>\cos \varphi = 0,8</math>AR  soit <math>E = 185 \text{ V}</math></p> <p>Malgré l'augmentation de X de 10%, la valeur max de E en régime déséquilibré reste inférieure à celle du fonctionnement équilibré.</p>	

## 5 Epreuves d'admission (oral)

### 5.1 Déroulement des épreuves d'admission

**La bibliothèque de l'agrégation** est constituée d'un ensemble d'ouvrages de base mis à la disposition des candidats, entre autres, par la bibliothèque centrale et le département EEA de l'E.N.S. de Cachan. Cette documentation est constituée de livres, de revues, de dossiers sur des systèmes industriels, de CD-ROMs de constructeurs référents et de quelques documents de spécialité (par exemple les Techniques de l'Ingénieur dans le domaine de l'EEA) mais elle n'a nullement la prétention d'être complète. En particulier, des revues spécifiques à la spécialité comme RGE, Onde électrique, Électronique Industrielle, Mesures, etc... ne sont pas présentes de façon complète. Les revues 3EI et REE sont disponibles au laboratoire et mises à la disposition des candidats.

En vue de compléter cette base de données et de l'actualiser des dispositions complémentaires ont été retenues :

#### 1) Les candidats peuvent apporter des ouvrages complémentaires dans les conditions suivantes :

- les ouvrages doivent être déposés avant le début des épreuves et laissés à la disposition de tous les candidats jusqu'à la fin de celles-ci. Ils doivent être (ou avoir été) disponibles en librairie ou avoir été en vente ou en distribution publique officielle (ils doivent donc porter un numéro d'ISBN ou d'ISSN) ;
- le jury admet aussi les documentations des constructeurs mais ils ne doivent contenir aucune note ou référence personnelle autre que le nom du propriétaire ;
- les photocopies d'ouvrages, d'actes de conférences,... ne sont pas admises. Seuls les ouvrages originaux complets peuvent figurer en bibliothèque.

#### **Dans tous les cas, les ouvrages déposés sont soumis à l'approbation du jury.**

2) Par ailleurs, des dossiers sur des systèmes industriels peuvent servir d'application-support dans le cadre de l'épreuve pédagogique ou pour la préparation d'un montage. Ces documents ne sont pas exhaustifs et ne couvrent pas nécessairement tous les thèmes. Les candidats peuvent donc apporter des dossiers complémentaires dans les conditions suivantes :

- les dossiers doivent être déposés avant le début des épreuves et laissés à la disposition de tous les candidats jusqu'à la fin de celles-ci, ils ne doivent contenir aucune note ou référence personnelle autre que le nom du propriétaire ;
- les dossiers doivent concerner des systèmes réels commercialisés ou des extraits de notices techniques de constructeurs ;
- ces dossiers doivent être reliés et peuvent :
  - o soit provenir de documents fournis par l'entreprise qui a développé le produit ou qui en assure la maintenance ;
  - o soit être (ou avoir été) disponibles en librairie ou avoir été en vente ou en distribution publique officielle (ils doivent donc porter un numéro d'ISBN ou d'ISSN) ;
  - o soit provenir de dossiers fournis dans le cadre d'épreuves officielles, c'est-à-dire de type BTS, Baccalauréat, concours liés au génie électrique,... ;

Aucun dossier étudiant associé à des thèmes développés dans le cadre d'un projet d'étude n'est autorisé hormis les documents décrits ci dessus.

Ces dossiers doivent être accompagnés :

- d'un sommaire général des documents inclus dans le dossier, avec le récapitulatif des documents constructeurs intégrés au dossier (si possible, ces documents constructeurs doivent être regroupés) ;
- d'une table des matières pour chacun des documents ;
- d'une indication sur la date de fabrication du produit ;
- d'un tableau résumé (papier et fichier Excel) décrivant les thèmes (ou fonctions) principaux qui peuvent être traités avec cette application technique.

**Dans tous les cas, les dossiers déposés sont soumis à l'approbation du jury.**

3) Des ordinateurs sont mis à la disposition des candidats de manière à leur permettre d'accéder à des documentations de constructeurs sous forme de CD-ROM.

Ces ressources, communes à tous les candidats, ne peuvent être que ponctuelles (consulter une documentation et/ou l'imprimer, tracer une courbe,...). Au cours d'une journée d'épreuve, trois à neuf candidats peuvent être présents simultanément. Un ordinateur ne peut donc pas être monopolisé par un candidat pendant toute la durée de l'épreuve.

À titre indicatif, les CD-ROMS constructeurs mis à disposition provenaient de Analog Devices, Burr Brown, Limear Technology, NS, Maxim, Texas Instruments, Cypress, Siemens, Fuji, ST Microelectronics, Farnell, IR, HP, Xicor, Schneider-Electric, Legrand, Semikron, Ferraz, LEM, Endress-Hauser,...

Les candidats peuvent apporter des CD-ROMs complémentaires dans les conditions suivantes :

- les CD doivent être des originaux avec une licence d'utilisation en bonne et due forme permettant l'installation sur le site de l'ENS Cachan ;
- ces CD doivent être déposés avant le début des épreuves et laissés à la disposition de tous les candidats jusqu'à la fin de celles-ci ;

Les lecteurs de CD-ROM et de disquettes des ordinateurs à usage des candidats sont désactivés. Les CD-ROMS sont préinstallés sur disque dur. Toute introduction d'un CD-ROM ou d'une disquette durant les épreuves est formellement interdite.

Un rétro projecteur et vidéo projecteur sont mis à la disposition des candidats lors des épreuves orales.

**4) Les calettes personnelles ainsi que les moyens de communication portables sont totalement interdits** pendant les épreuves. Sous la responsabilité du président du jury, les surveillants, techniciens, agrégés préparateurs et membres du jury sont les garants du respect de cette interdiction.

## 5.2 Rapport de l'épreuve de montage

Comme les autres épreuves orales de l'agrégation de Génie Électrique, l'épreuve de montage a une durée de 6h. Elle se décompose en 5h de préparation et 1h de présentation et d'interrogation. Après ouverture du sujet, les candidats peuvent prendre un certain nombre d'ouvrages à la bibliothèque avant d'être accompagnés dans une salle de travaux pratiques.

### 5.2.1 Généralités

L'une des principales vocations de cette épreuve à caractère expérimental est de juger l'aptitude du candidat à la conception et la mise en œuvre de dispositifs. Le jury apprécie la justification des mesures ainsi que leurs interprétations (caractérisation de composants, de sous-systèmes ou de systèmes ...) L'objectif est donc :

- soit d'analyser les critères de choix technologiques de composants ou partie de composants d'une fonction par rapport aux contraintes d'une application donnée,
- soit d'analyser la démarche de conception et de mettre en évidence les critères de choix technologiques en liaison avec les contraintes de l'application,
- soit de caractériser un dispositif donné, d'effectuer les réglages, les dimensionnements ou les adaptations nécessaires de manière à illustrer les contraintes technologiques associées à une application donnée,
- soit de présenter un aspect spécifique du montage dont le thème aura été précisé dans le sujet.

Le jury est sensible :

- aux choix des solutions techniques, aux prédéterminations, aux choix technologiques des composants et/ou des sous systèmes utilisés, qui devront être scientifiquement justifiés,
- à la forme de la démarche expérimentale (nature des tests et des mesures),
- à l'analyse des résultats,
- à la qualité de la présentation.

De plus, le jury attend que les candidats soient capables d'utiliser de manière autonome les appareils de mesure standards : oscilloscope, oscilloscope à mémoire, générateur de fonction, analyseur de puissance, wattmètre et pour les candidats de sensibilité "courant faible", analyseur de spectre et générateur de fonctions programmables.

Les aspects métrologiques, i.e. choix des appareils de mesure, emploi, méthodes de mesure, domaine de validité, précision, doivent être maîtrisés.

Le jury attend également dans cette épreuve que le candidat connaisse les fonctionnalités principales et soit familier avec l'un des produits professionnels les plus courants du marché dans les domaines suivants :

- la simulation des circuits d'électronique de puissance et des circuits électriques BF, RF,
- la description en langage VHDL et la mise en œuvre de circuits CPLD et FPGA,
- le développement en C et C++ sur PC.

Il faut noter que la plupart des logiciels utilisés à l'agrégation sont, soit en distribution libre soit disponibles en version d'évaluation, permettant ainsi à tout un chacun de se familiariser avec ces outils.

## 5.2.2 Organisation de la présentation du montage en présence du jury

Le candidat peut fournir au jury en début de présentation les documents papier réalisés ainsi que les documents caractéristiques (courbes, chronogrammes, listing, copie d'écran, ...) concernant le déroulement de la préparation du montage.

### *Phase 1*

Sous la forme d'un exposé, le candidat doit :

- présenter le principe du montage mis en œuvre,
- préciser les résultats de la prédétermination des caractéristiques technologiques des composants ou des sous systèmes en regard des caractéristiques attendues, et présenter les mesures ou essais afin que le jury puisse apprécier la démarche,
- présenter et valider quantitativement les résultats expérimentaux par rapport aux caractéristiques du dispositif utilisé (par exemple, il peut mettre en évidence les limites de validité des relations et les justifier),
- analyser les résultats expérimentaux par rapport aux contraintes de l'application,
- caractériser le dispositif en **reproduisant certains essais**.

Cette phase de présentation des étapes de développement doit être **prévue pour durer vingt minutes**.

### *Phase 2*

Le jury pose des questions au candidat destinées à expliciter :

- le choix des solutions techniques,
- les éléments de la prédétermination des choix technologiques des composants et/ou des sous-systèmes utilisés, qui doivent être scientifiquement justifiés,
- la démarche expérimentale (choix des moyens d'analyse, de mesure et de visualisation), l'analyse des résultats obtenus par le candidat.

Le jury s'intéresse ensuite au fonctionnement du montage. Le candidat doit présenter le matériel mis en œuvre dans sa manipulation et effectuer une démonstration de son fonctionnement.

### **Note importante**

Il appartient au candidat de s'informer auprès des agrégés préparateurs et techniciens :

- des caractéristiques concernant les maquettes et sous-systèmes qui sont mis à sa disposition dans le cadre de cette épreuve (tous les documents et notices correspondants peuvent et doivent être consultés),
- des moyens logiciels et des outils de simulation disponibles,
- des matériels de mesure utilisables,
- des composants passifs ou actifs disponibles.

Des travaux particuliers peuvent être demandés aux agrégés préparateurs ou aux techniciens dans la mesure de leur disponibilité, sur présentation d'un document écrit explicitant le travail à réaliser. Ce document devra donc donner les schémas structurels, les valeurs, les références des composants, les schémas blocs, le réglage des appareils, etc...

**À titre d'information, une liste non exhaustive de moyens mis à la disposition des candidats pour la session 2010 est ébauchée ci-dessous :**

- composants électroniques passifs et actifs de caractéristiques diverses,
- maquettes, systèmes et sous-systèmes,
- logiciel de présentation et de calcul : Excel,
- logiciels de tracé des réponses des filtres, (Filtercad de Linear technologie)
- logiciels de simulation de structures analogiques de type SPICE,
- logiciels de calcul et de simulation : MATLAB, PSIM,
- logiciels de simulation RF : RFsim99 (en distribution libre)
- logiciels de développement de PAL-CPLD-FPGA : Warp (CYPRESS), WEB Pack (XILINX)
- Logiciels de développement en C : chaîne Code Composer Studio (TEXAS INSTRUMENTS), Borland C++, Builder 6
- Cartes d'acquisition sur PC : Fastlab et Pcmes (société Eurosmart),
- Carte DSPACE avec SIMULINK distribué par la société Scientific Software, Modules multiplication de tension, affichage, comptage, correcteurs etc..,
- CDROM fournis par les constructeurs ou distributeurs, (Analog Devices, Linear technologie, Maxim, Texas, ...).

### 5.2.3 Épreuve de montage de 2010

La moyenne de l'épreuve de montage est pour l'année 2010 de 7,44 sur 20.

Pendant cette session, 17 sujets différents ont été proposés aux candidats de sensibilité "courant fort" et 10 sujets différents aux candidats de sensibilité "courant faible". Parmi ces sujets, deux étaient nouveaux pour la sensibilité "courant fort" et un pour la sensibilité "courant faible". Ces nouveaux sujets ont pour titre :

- Pour la sensibilité "courant fort" :

Onduleurs de tension multicellulaires

Ce montage a pour objectif l'analyse et la comparaison de deux structures multiniveaux, notamment du point de vue des pertes et de la qualité des formes d'ondes.

Machine asynchrone à double alimentation

L'objectif de ce montage est de mettre en œuvre une machine asynchrone à double alimentation couplée au réseau et utilisée pour la génération d'énergie éolienne.

- Pour la sensibilité "courant faible" :

Générateur de données codées numériques pour transmission numérique

L'objectif de ce montage est de réaliser un générateur de données numériques pseudo aléatoires avec les principaux codes utilisés dans les transmissions numériques. Le cœur du générateur est assuré par un circuit logique programmable que l'on demande de programmer en assurant la liaison avec une carte d'interface analogique.

De façon générale, le jury constate qu'il est impossible de réussir cette épreuve sans un minimum d'aisance dans la manipulation des appareils de mesure, des logiciels et des langages de programmation. Il est également indispensable de connaître les aspects théoriques associés à chacun des montages, et ceci avant l'épreuve. C'est notamment le cas des structures de base en électronique de puissance et en particulier l'onduleur de tension MLI qui est encore mal maîtrisé. Les ouvrages ne sont là que pour éviter de refaire certains calculs ou développements fastidieux, le candidat devant être à même de les justifier.



### **Remarques et conseils aux candidats concernant la préparation :**

Lorsque le candidat a des difficultés par rapport au thème proposé dans le montage, le jury lui conseille d'avoir une démarche progressive au lieu de mettre en œuvre un dispositif complet.

Le candidat doit s'assurer que le domaine de validité des relations utilisées correspond bien aux caractéristiques de son montage.

Un candidat doit être capable d'analyser de façon rigoureuse une structure logicielle ainsi que son environnement, puis de les adapter à un cahier des charges. Il doit pouvoir la présenter avec méthode.

Pour ce qui concerne le développement d'applications nécessitant l'usage d'outils informatiques, il est conseillé au candidat d'effectuer régulièrement des sauvegardes de son travail.

### **Remarques et conseils aux candidats concernant la présentation :**

La qualité de la présentation intervient dans une part non négligeable de la note du candidat. Compte tenu du temps imparti (20 min), le jury demande au candidat de préparer son tableau, et de présenter clairement la problématique du sujet.

Les schémas fonctionnels, structurels et autres courbes expérimentales (copies d'écran ou d'oscilloscope ...) pourront être rétro projetés.

### **Analyse de l'épreuve**

L'analyse du déroulement des épreuves de l'année 2010 nous amène à noter un certain nombre de points à améliorer :

- une plus grande rigueur sur la notation des différentes grandeurs physiques (valeurs moyennes, efficaces, temporelles, etc...)
- la justification des modèles utilisés (domaine de validité, degré d'approximation),
- une correspondance rigoureuse entre les grandeurs physiques observées et les grandeurs apparaissant dans les modèles,
- une meilleure gestion du temps imparti, permettant d'aborder toutes les parties proposées dans le sujet,
- Un meilleur positionnement du problème traité dans le contexte industriel,

Plus particulièrement pour la sensibilité « courant faible » :

- Les fondements de l'analyse des signaux concernant notamment l'analyse spectrale.

Plus particulièrement pour la sensibilité « courant fort » :

- la connaissance des fonctionnalités de l'onduleur de tension raccordé au réseau,
- la mesure et l'analyse des perturbations harmoniques sur le réseau,
- la maîtrise des modèles, moyens et HF, des convertisseurs,
- l'analyse des flux d'énergie mis en jeu dans les montages,
- l'analyse du comportement des systèmes,
- l'analyse du comportement mécanique simplifié des systèmes,
- la construction d'un système asservi à l'issue de l'identification, et plus particulièrement le calcul du correcteur ne conduisant pas systématiquement à la compensation pôle-zéro.

## Tendances

**Pour la sensibilité "courant faible"**, l'évolution des sujets vers, d'une part l'électronique numérique et d'autre part le domaine des transmissions, se confirme.

Les sujets utilisant des microcontrôleurs, DSP, CPLD ou FPGA vont donc progresser en nombre et surtout en performances des structures abordées (les outils de conception et de mise en oeuvre permettant d'en faciliter grandement l'étude).

Nous insistons donc, comme par le passé, sur l'importance de la maîtrise des langages, des outils et des principes associés à ces composants ou ces structures. D'autre part les connaissances théoriques en Traitement Numérique de Signal sont désormais tout aussi incontournables que celles de l'Automatique classique.

Pour l'électronique RF (Radiofréquence) il est donc encore une fois recommandé de se familiariser avec l'instrumentation spécifique (analyseur de spectre, analyseur de réseau, coupleur directif, etc).

Pour les transmissions numériques il est bon de se familiariser avec les différents outils d'investigation.

**Pour la sensibilité "courant fort"**, les sujets concernant les associations convertisseurs-machines et la qualité de l'énergie électrique sont couramment abordés lors de l'épreuve de montage.

Quel que soit le sujet abordé, l'analyse des flux d'énergie est primordiale. Les différentes fonctions de la chaîne de conversion ainsi que les boucles de régulation associées doivent être mises en évidence.

L'interrogation des candidats dans les domaines de l'automatique et de l'informatique industrielle ne se fait jamais dans des sujets spécifiques, mais au travers des montages proposés. Environ 80% des montages demandent une mise en oeuvre des principes de base de l'automatique. Certains de ces montages s'appuient sur l'utilisation de cartes numériques et nécessitent de ce fait la connaissance des systèmes échantillonnés.

## Liste des sujets EN

Vous trouverez ci-dessous une liste de sujets proposés lors des sessions 2009 et 2010 pour les montages à coloration électronique courant faible. Cette liste est donnée à titre indicatif et les montages indiqués sont susceptibles d'être proposés pour les prochaines sessions.

- Modules audio pour dispositif téléphonique

L'objectif de ce montage est de réaliser des modules audio utilisés dans un système de communication téléphonique. Le premier module est un amplificateur audio de faible puissance mettant en oeuvre un circuit intégré spécialisé. Le second module est un préamplificateur audio pour microphone électret et le troisième est un vumètre audio.

- Transmetteur FM pour baladeur audio

L'objet de ce montage porte sur l'étude et la mise en oeuvre d'une transmission en modulation de fréquence utilisant une synthèse de fréquence par boucle à verrouillage de phase.

- Modem en modulation GMSK

L'objet de ce montage porte sur l'étude et la mise en oeuvre d'une modulation GMSK dans le cadre d'un modem sans fil. Deux approches permettant la génération du signal modulé sont proposées au candidat : Utilisation d'un VCO ou d'un modulateur IQ.

- Liaison audio cryptée sans fil

L'objectif de ce montage est de réaliser une transmission audio sans fil mettant en oeuvre des modules HF. Le cryptage du signal audio est assuré par inversion de spectre.

- Courant porteur : Etude de la modulation et démodulation FSK

L'objet de ce montage porte sur l'étude et la mise en oeuvre d'une transmission numérique par modulation FSK. L'application recherchée est une liaison par courant porteur en ligne. La réalisation du modulateur FSK est assurée par un circuit de synthèse numérique directe et la démodulation par une boucle à verrouillage de phase intégrée.

- Serveur WEB embarqué

On se propose dans ce montage de mettre en évidence les protocoles utilisés dans un échange de pages web entre un système embarqué à base de microprocesseur PIC et un réseau Ethernet. Quelques notions de base sur le codage d'une page HTML ainsi que la mise en oeuvre du système sont également demandés.

- Transmission audio infrarouge

L'objectif de ce montage est de réaliser une transmission audio sans fil infrarouge en utilisant une technique de modulation MLI. Le candidat doit mettre en oeuvre progressivement les éléments constituant la chaîne de transmission en utilisant des composants optoélectroniques imposés.

- Liaison 4-20mA

Pour ce montage on demande au candidat de mettre en oeuvre un circuit spécialisé en respectant un cahier des charges donné.

- Système autonome d'éclairage de secours

Ce système permet d'aborder les thèmes de la gestion et du stockage de l'énergie en utilisant comme support de communication un bus CAN que l'on demande d'étudier et de mettre en oeuvre.

- Générateur de données codées numériques pour transmission numérique

L'objectif de ce montage est de réaliser un générateur de données numériques pseudo aléatoires avec les principaux codes utilisés dans les transmissions numériques. Le cœur du générateur est assuré par un circuit logique programmable que l'on demande de programmer en assurant la liaison avec une carte d'interface analogique.

## Liste des sujets ET

Vous trouverez ci-dessous une liste de sujets proposés lors des sessions 2009 et 2010 pour les montages à coloration électrotechnique courants forts. Cette liste, donnée à titre indicatif, est susceptible d'évoluer lors des prochaines sessions.

- Associations de redresseurs de tension

L'objectif de ce montage est de mettre en évidence l'intérêt d'une association de redresseurs de tension pour améliorer le facteur de puissance.

- Entrelacement de hacheurs

Ce montage permet d'aborder le principe de l'entrelacement avec la mise en parallèle de deux hacheurs et d'un asservissement de courant.

- Hacheurs élévateurs

L'objectif de ces montages est la réalisation de hacheurs élévateurs (parallèle ou à stockage inductif), munis de régulations et pouvant être employés en absorption sinusoïdale.

- Alimentations à découpage

L'objectif de ces montages est de dimensionner puis de réaliser une alimentation à découpage de type Flyback ou Forward mono-interrupteur.

- Onduleur à résonance pour plaque à induction

Il s'agit dans ce montage de mettre en évidence les propriétés des onduleurs à résonance utilisés dans le chauffage par induction

- Compensateur statique

L'objectif de ce montage est le calcul et la mise en oeuvre d'un compensateur statique d'énergie réactive et d'une régulation de puissance réactive.

- Génération de bord

On se propose ici de générer un réseau triphasé à tension et fréquence constante (400Hz) à partir d'un alternateur entraîné à vitesse variable, d'un redresseur et d'un onduleur autonome.

- Machine synchrone autopilotée alimentée par un onduleur de tension

L'objectif de ce montage est de réaliser une régulation de vitesse analogique d'une machine synchrone autopilotée, après avoir mis en œuvre l'alimentation en tension de la machine.

- Commande d'éclairage par gradateur

L'objectif de ce montage est de comparer un gradateur classique à thyristors commandés en angle de phase avec un gradateur MLI à IGBT.

- Onduleur de tension multiniveaux

Dans le cadre de ce sujet, on met en œuvre deux topologies d'onduleurs de tension trois niveaux dans le but de les comparer du point de vue des pertes.

- Liaison à courant continu

L'objectif de ce montage est d'illustrer le principe d'une interconnexion de réseaux triphasés par liaison à courant continu.

- Filtre actif monophasé

Ce montage met en œuvre un filtre actif MLI à IGBT permettant d'améliorer le courant absorbé par une charge polluante.

- Machine asynchrone à double alimentation

Ce montage permet de mettre en évidence les propriétés d'une machine asynchrone à rotor bobiné dans le cadre de la production d'énergie électrique.

- Alimentation sans interruption

Ce montage se rapporte à l'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions destiné à la réalisation d'une alimentation sans coupure.

- Variateur U/F et redresseur MLI

L'objectif de ce montage est de dimensionner et de mettre en œuvre un redresseur MLI associé à un variateur U/F afin de démontrer son intérêt du point de vue du facteur de puissance et de la réversibilité.

## 5.3 Rapport de l'épreuve de dossiers

### 5.3.1 Nature de l'épreuve

L'épreuve de dossier est une épreuve orale d'une durée de cinq heures pour la préparation et d'une heure pour la présentation au jury. La préparation se fait dans la bibliothèque de l'agrégation.

L'épreuve se décompose en trois parties :

1. un exposé de synthèse du dossier, d'une durée de 40 minutes, au meilleur niveau scientifique et technique ;
2. un entretien avec le jury, d'une durée de 20mn, portant sur les éléments développés dans le dossier.

#### Contenu du dossier

Le dossier est désigné par son titre et comprend différents documents relatifs à ce thème : des publications de revues ou de congrès, des notes d'applications de constructeurs, des documentations techniques. **Une problématique est proposée en sous-titre.** Notez que certains articles peuvent être issus de publications en langue anglaise. Une bonne pratique de la lecture de cette langue est donc recommandée.

### 5.3.2 Objectifs de l'épreuve

L'épreuve de dossier est destinée à tester la capacité du candidat à entretenir, actualiser et structurer ses connaissances afin d'assurer un enseignement restant au meilleur niveau technologique et scientifique.

Au travers de l'épreuve, le jury évalue plus précisément les capacités suivantes :

- acquisition et compréhension d'informations scientifiques et techniques contenues dans le dossier,
- détermination des informations essentielles et/ou nouvelles en les organisant logiquement selon un objectif identifié par la problématique proposée en sous-titre ;
- exposé synthétique des éléments essentiels du dossier (cet aspect fait appel aux connaissances initiales du candidat et à sa culture technologique) ;
- qualités pédagogiques, d'expression, de communication et d'inventivité (structuration générale de l'exposé, élocution, présentation, emploi des supports audiovisuels, etc.) ;
- qualité des réponses aux questions du jury.

Cette épreuve est tournée vers les applications technologiques : savoir expliquer, justifier et proposer des solutions technologiques basées sur une analyse scientifique ou économique précise d'un problème.

### 5.3.3 Déroulement de la session 2010

#### **Analyse de l'épreuve**

L'analyse du déroulement des épreuves de l'année 2010, nous amène à noter un certain nombre de points.

**Concernant la première partie de l'épreuve (analyse et synthèse du dossier) :**

- une partie des candidats a parfaitement réussi cette épreuve en développant à un bon niveau technique et scientifique la problématique qui leur était proposée. Il reste trop de candidats qui n'arrivent pas à identifier cette problématique ;
- le jury attend un exposé. Il est donc conseillé, pour cette partie, d'utiliser des supports médiatiques et d'éviter la lecture de notes manuscrites ;
- des candidats ne situent pas leur exposé à un niveau technologique et scientifique suffisant et se contentent de généralités, de l'historique d'une technique ou d'énumérations sans aucune référence technologique ;
- le jury a parfois regretté un refus d'utiliser des documents très spécifiques tels que notices de constructeurs et schémas structurels des applications industrielles, tableaux comparatifs chiffrés. Les documents en langue anglaise sont parfois ignorés ;
- certains candidats se sont contentés de résumer un seul article du dossier et d'autres ont opté pour une présentation de type catalogue, dénuée de toute classification comparative. Où est alors la synthèse ?

- de nombreux candidats n'ont utilisé qu'une faible partie des 40 mn d'exposé, proposant ainsi un exposé superficiel du point de vue technique ;
- le jury continue de relever des considérations très vagues sans aucune valeur numérique ni comparaison.

#### 5.3.4 Entretien avec le jury

Quelques candidats ont nourri un dialogue argumenté et ont développé une bonne qualité d'écoute. Malheureusement il reste de nombreux candidats pour lesquels l'entretien avec le jury a été rejeté dès le début, autisme révélateur d'une incompréhension totale sur les objectifs du dossier.

#### **Fiche d'objectifs**

Une fiche rappelant les objectifs et attendus de l'épreuve a été fournie aux candidats.

#### 5.3.5 Évolution de l'épreuve pour la session 2011

La phase d'exploitation pédagogique du dossier reste supprimée. L'épreuve se compose donc de **deux parties : la synthèse de 40mn et l'entretien de 20mn** qui ne peuvent se reporter l'une sur l'autre :

1. un exposé de synthèse du dossier au meilleur niveau scientifique et technique ;
2. un entretien avec le jury.

#### 5.3.6 Définition de l'épreuve

L'épreuve de dossier doit permettre d'évaluer la capacité du candidat à analyser une problématique à caractère technique (avec une dominante dans le domaine du génie électrique). L'argumentation sera construite à partir d'une synthèse d'éléments contenus dans les articles du dossier que l'on pourra éventuellement compléter par d'autres sources bibliographiques. La forme de l'exposé, bien différente d'une leçon, est celle d'une conférence illustrée par un support médiatique (un diaporama serait apprécié par le jury). Les compétences requises sont :

- la rigueur et l'honnêteté scientifique ;
- la maîtrise de la démarche technologique (proposer des solutions à partir de l'expression d'un besoin et des contraintes définies par un cahier des charges) ;
- l'aptitude à réaliser une synthèse à partir de plusieurs sources d'information en vue de construire un argumentaire ;
- la pertinence de l'analyse critique des documents proposés et du plan de l'exposé ;
- la qualité de la communication.

#### 5.3.7 Concernant la lecture du dossier

Le dossier est généralement volumineux (environ 8-10 articles) et il convient de savoir en faire une lecture rapide et critique : certains documents sont pauvres en informations, d'autres surabondants. Ceci sous-entend que le candidat possède un entraînement à la lecture scientifique ainsi qu'une culture scientifique et technique suffisante qui lui éviteront d'avoir à découvrir entièrement le thème le jour de l'épreuve.

L'expression orale doit être claire, vivante et convaincue. Le candidat doit prouver qu'il a su s'approprier le sujet. L'utilisation du tableau, pendant l'exposé est à éviter de même que la lecture continue de notes.

Le candidat doit avoir le plus grand souci de la gestion du temps pour aborder les deux parties de l'épreuve.

#### 5.3.8 Concernant l'exposé de synthèse

L'exposé dure au maximum 40 minutes. Le candidat doit donc synthétiser les points essentiels des différents articles contenus dans le dossier et les organiser logiquement en vue de répondre à la problématique définie par le titre du dossier.

Le candidat peut être amené à émettre un avis critique sur tel document du dossier si cela reste dans la logique de son exposé.

Le niveau technique et scientifique doit être le plus élevé et le plus rigoureux possible. Lors de l'exposé, il doit être fait référence aux documents fournis afin d'en situer l'intérêt et le contenu. L'exposé de vulgarisation est à éviter. Comme tout exposé, celui-ci doit se terminer par une conclusion de synthèse, qui doit faire émerger les points clés du dossier répondant à la problématique.

Les techniques de présentation s'apparentent à celle de la conférence. L'exposé doit aller dans le sens de la synthèse, de la clarté et de la précision : on évitera les longs développements au tableau au profit de résumés ou de schémas sur transparent ou diaporama. Il pourra être utile de présenter sous forme de tableaux ou de graphiques comparatifs différents aspects communs trouvés dans les divers documents.

### 5.3.9 Concernant l'entretien avec le jury

Le jury questionne le candidat sur plusieurs aspects présentés dans l'exposé au-delà du strict contenu du dossier. Le candidat doit donc parfaitement maîtriser et être capable de développer les notions qu'il a abordées dans l'exposé. Il doit donc approfondir les notions qui lui sont inconnues au cours de la préparation en exploitant si nécessaire les ouvrages de la bibliothèque de l'épreuve. Pour être efficace, il doit donc posséder une large culture technologique et scientifique que seules la lecture de revues techniques, d'ouvrages scientifiques et la participation à des conférences pourront efficacement enrichir. Il est donc conseillé d'aborder dans la préparation le maximum des thèmes qui apparaissent dans cette épreuve.

## **RECOMMANDATIONS AUX CANDIDATS**

### **I. Analyse et synthèse du dossier (40 minutes)**

Suite à l'analyse critique des documents fournis, vous devez faire un exposé de synthèse du dossier. Cet exposé doit se situer au meilleur niveau scientifique et technique.

En vous référant aux articles du dossier, vous devez :

- mettre en évidence la problématique traitée dans le dossier ;
- définir les principes utilisés ;
- présenter les technologies mises en œuvre pour répondre aux besoins identifiés;
- citer des exemples d'applications ;
- donner les éventuelles perspectives en cours.

Vous ferez apparaître relativement à chaque rubrique les articles exploités et vous justifierez la non utilisation de documents. Cet exposé ne peut être fondé que sur les articles du dossier.

### **II. Entretien avec le jury (20 minutes)**

Le jury questionne le candidat sur plusieurs aspects présentés dans l'exposé au-delà du strict contenu du dossier. Le candidat doit donc parfaitement maîtriser et être capable de développer les notions qu'il a abordées dans l'exposé. Il doit donc approfondir les notions qui lui sont inconnues au cours de la préparation en exploitant si nécessaire les ouvrages de la bibliothèque de l'épreuve.

### **Remarques**

Le dossier comporte suffisamment d'éléments pour atteindre les objectifs décrits. Néanmoins le candidat peut puiser dans la bibliothèque du centre d'examen :

- des informations qui le confortent dans sa connaissance des techniques abordées par le dossier ;
- des extraits de notices techniques de composants ou de systèmes de commande lui permettant de traiter son application pédagogique.



## Listes des dossiers

Les candidats trouveront ci-dessous la liste des dossiers proposés en juin 2010.

### **Production et stockage d'énergie électrique**

Petite centrale hydroélectrique

Installations photovoltaïques, intégrées au bâti et raccordé au réseau BT

Centrales éoliennes

### **Applications de l'énergie électrique**

Le transport ferroviaire, aspect européen

Éclairage public : technologie innovante d'aujourd'hui et demain

Véhicule à faible émission de CO<sub>2</sub>, solutions d'hybridation.

### **Dispositifs de contrôle commande**

La commande des moteurs électriques : modèles de connaissances

La commande des moteurs électriques : modèles de comportement

### **Traitement, transmission, stockage de l'information**

La technologie WiMax : choix d'une technologie

Identification par radio fréquences les aspects technico-économiques

Filtre de Kalman, centrale inertielle et GPS.

### **Technologie Micro électronique**

Typologie des microcontrôleurs

Microcontrôleur : stratégie interne, jeu d'instructions, E/S

### **Fabrication électronique :**

La testabilité, évolution du standard de test Boundary Scan

La CEM des cartes électroniques, la modélisation et la simulation des perturbations

## 5.4 Epreuve pédagogique consistant en la rédaction de documents à caractère pédagogique à partir d'une question posée par le jury

Durée 6 h (préparation 5 h, présentation 1 h) – coefficient 1

La question est nécessairement empruntée au domaine (A ou B) qui n'a pas été retenu par le candidat lors du tirage au sort pour la première épreuve d'admission. L'épreuve pédagogique est d'une durée de 6h comme les autres épreuves orales de l'agrégation de Génie Électrique. Elle se décompose en 5h de préparation et 1h de présentation et d'interrogation. Après ouverture du sujet, les candidats composent dans la salle de bibliothèque où ils peuvent avoir accès à une liste d'ouvrages.

### **Généralités**

La moyenne à l'épreuve pédagogique des candidats admis est de 14,6. La moyenne générale est de 8. Celle des candidats non admis est de 5,5. La note la plus élevée est 19, la plus basse est 1. La liste des leçons est publiée en annexe.

Tous les sujets sont accompagnés des extraits des référentiels.

Nous rappelons que cette liste est publiée dans le rapport de jury ainsi que la feuille de recommandations aux candidats. Cette liste des leçons est publiée à titre indicatif. Elle est susceptible d'être modifiée.

### **Remarques et conseils aux candidats concernant la préparation :**

Le candidat doit lire attentivement les objectifs de la leçon proposée afin d'éviter de construire une séance hors du sujet proposé. Le candidat ne pourra en aucun cas modifier le titre de la séance ou le niveau imposé par le sujet.

Il doit garder une certaine distance avec la bibliographie utilisée et exercer son esprit critique vis à vis de celle-ci. Un choix ne peut être justifié par le seul fait qu'il a été extrait d'un document existant.

Le candidat doit préparer des documents clairs et présentés proprement. Il évitera les schémas complexes ou peu lisibles en projection. Il est rappelé au candidat qu'il doit utiliser le tableau comme il le ferait avec des élèves et qu'il ne doit en aucun cas l'effacer en cours d'épreuve.

Les schémas et documents constructeurs utilisés par le candidat dans sa séance pourront être remis au jury comme il le ferait avec des élèves ou des étudiants.

Les candidats disposent des outils de communication habituels, vidéo projecteur, rétroprojecteur, ordinateur associé aux logiciels de calcul et de simulation. Certaines leçons peuvent se prêter à une démonstration expérimentale. Les candidats peuvent solliciter les agrégés préparateurs.

## ***Analyse de l'épreuve***

L'analyse du déroulement des épreuves nous amène à noter un certain nombre de points :

### **Points positifs :**

Quelques leçons de bonne qualité ont été appréciées par le jury, avec des plans rigoureux, des documents bien présentés, une gestion du temps maîtrisée, le respect des objectifs proposés, une bonne utilisation du tableau, une présentation vivante, une expression claire et rigoureuse scientifiquement.

Le jury a apprécié que la majorité des candidats ait :

- proposé une séance en adéquation avec le référentiel imposé;
- utilisé des applications représentatives des solutions récentes et courantes.

## Points restant à améliorer :

- la qualité des documents retro projetés,
- l'exploitation d'outils didactiques variés (vidéo projecteur, moyens informatiques, maquettes, etc.)
- la capacité à enseigner dans des champs technologiques du génie électrique où le candidat n'est pas forcément spécialiste,
- la présence de schémas élémentaires permettant de comprendre les principes, les courbes représentant les signaux entrée et sortie ou les réponses des systèmes,
- la maîtrise par le candidat de notions de base et des concepts théoriques,
- la relation entre le choix du support, le niveau visé ainsi que la spécialité du diplôme préparé (courant fort ou faible).

L'épreuve pédagogique a pour but premier d'évaluer les capacités à transmettre des connaissances. Il est indispensable que les candidats s'expriment avec rigueur et clarté, et qu'ils adoptent des attitudes conformes à celles attendues d'un professeur en salle de classe. Cependant, il ne s'agit pas d'une épreuve qui consisterait à ne présenter que l'organisation pédagogique de la séance ou de la séquence et le titre des activités proposées aux élèves. Le jury attend que les contenus scientifiques et technologiques soient développés et justifiés.

Une leçon ne peut se réduire à la reproduction d'une partie d'un ouvrage ou d'un rapport de concours.

Le choix d'une application support de la leçon est indispensable. Le support doit être accessible aux élèves concernés. Celui-ci doit permettre de présenter les problèmes techniques à résoudre et d'illustrer la ou les solutions mises en œuvre.

Cette application ne doit pas être seulement un titre. C'est le support sur lequel doit s'appuyer la leçon. Elle a été souvent évoquée trop rapidement, apparaissant brièvement au début de la leçon puis négligée, sans que soit établi de lien véritable entre les contenus de la leçon et leur exploitation dans le contexte décrit par l'application.

Il est rappelé que la présentation doit mettre en avant les aspects pédagogiques et se situer au niveau du référentiel concerné. L'entretien permet l'approfondissement des connaissances du candidat, il investit alors l'ensemble du programme de l'agrégation et va au delà du niveau évoqué pour bâtir la leçon.

## Exemple de leçon

### ÉPREUVE PÉDAGOGIQUE

**Contenu** : **FILTRAGE PASSIF DES HARMONIQUES DE COURANT SUR LE SECTEUR**

**Niveau** : BTS Électrotechnique/DUT Génie électrique et informatique industrielle

**Objectif** : Au terme de la séance, les élèves ou les étudiants devront être capables de :

- Analyser les problèmes d'harmoniques liés à l'usage de convertisseurs statiques type pont de Graëtz.
- Calculer une cellule de filtrage d'un harmonique de courant.
- Dimensionner un filtre et juger de l'interaction de ce filtre avec l'inductance du réseau dans le cadre d'une application donnée.

**NOTA** : *des extraits des référentiels et des programmes à utiliser sont fournis en annexe.  
Toutefois, le candidat pourra, utilement, se reporter aux référentiels et programmes complets.*

# Extraits du référentiel et du programme du B.T.S. Électrotechnique

*Brevet de technicien supérieur Électrotechnique*

---

## 4. Les savoirs :

Les compétences identifiées dans le tableau récapitulatif mobilisent des savoirs qui renvoient à des disciplines d'enseignement général ou scientifique et technique. L'analyse des différentes situations de travail, liées aux tâches, a permis de lister les savoirs indispensables associés aux compétences. Pour les savoirs relevant du domaine professionnel, un niveau taxonomique précise le degré de maîtrise pour ce BTS.

### o Les savoirs associés :

Les savoirs généraux font partie intégrante du diplôme et peuvent être communs à plusieurs BTS. Les savoirs scientifiques et techniques définissent les contenus de formation liés à la spécificité "électrotechnique" du brevet de technicien supérieur.

Les compétences s'appuient sur l'ensemble de ces savoirs.

Les compétences professionnelles s'appuient sur des savoirs classés dans les domaines relevant :

- de la culture générale et de l'expression ;
- de l'anglais ;
- des fonctions mathématiques ;
- de l'économie et de la gestion ;
- de la construction des structures matérielles appliquée à l'énergétique ;
- des sciences appliquées ;
- du génie électrique ;
- des activités pratiques professionnelles.

Les savoirs technologiques, électrotechniques et professionnels sont regroupés en 6 thèmes :

1. La conversion de l'énergie électrique dans les applications ;
2. La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique ;
3. Les équipements communicants ;
4. La communication technique appliquée aux infrastructures, aux bâtiments industriels et tertiaires ;
5. L'organisation de chantier ;
6. La construction des structures matérielles appliquée à l'énergétique.

### o Niveaux taxonomiques :

Le degré d'approfondissement des savoirs est un point déterminant pour la construction des séquences pédagogiques. À chaque savoir est associé un niveau taxonomique qui situe la hauteur des connaissances à apporter durant la formation.

Quatre niveaux taxonomiques ont été retenus :

#### Niveau 1 : niveau de l'information

Le candidat a reçu une information minimale sur le concept abordé et il sait, de manière globale, de quoi il s'agit. Il peut donc par exemple identifier, reconnaître, citer, éventuellement désigner un élément, un composant au sein d'un système, citer une méthode de travail ou d'organisation, citer globalement le rôle et la fonction du concept appréhendé.

#### Niveau 2 : niveau de l'expression

Ce niveau est relatif à l'acquisition des moyens d'expression et de communication en utilisant le langage de la discipline. Il s'agit à ce niveau de maîtriser un savoir relatif à l'expression orale (discours, réponses orales, explications) et écrite (textes, croquis, schémas, représentations graphiques et symboliques en vigueur). Le candidat doit être capable de justifier l'objet de l'étude en expliquant par exemple un fonctionnement, une structure, une méthodologie, etc. Ce niveau englobe le précédent.

#### Niveau 3 : niveau de la maîtrise d'outils

Cette maîtrise porte sur la mise en œuvre de techniques, d'outils, de règles et de principes en vue d'un résultat à atteindre. C'est le niveau d'acquisition de savoir-faire cognitifs (méthode, stratégie). Ce niveau permet donc de simuler, de mettre en œuvre un équipement, de réaliser des représentations, de faire un choix argumenté, etc. Ce niveau englobe, de fait, les deux niveaux précédents.

#### Niveau 4 : niveau de la maîtrise méthodologique

Ce niveau vise à poser puis à résoudre les problèmes dans un contexte global industriel. Il correspond à une maîtrise totale de la mise en œuvre d'une démarche en vue d'un but à atteindre. Il intègre des compétences élargies, une autonomie minimale et le respect des règles de fonctionnement de type industriel (respect des normes, de procédures garantissant la qualité des produits et des services). Ce niveau englobe, de fait, les trois niveaux précédents.

## S6 - GÉNIE ÉLECTRIQUE :

1	La conversion de l'énergie électrique dans les applications :	Niveau			
		1	2	3	4
<b>1.1</b>	<b>L'entraînement électrique :</b>				
1.1.1	▪ Couplage d'une charge à une source par rapport à la charge (réversibilité) ou par rapport à l'environnement <sup>16</sup> ;				
1.1.2	▪ Outils méthodologiques associés à l'étude d'une chaîne cinématique.				
<b>1.2</b>	<b>Les différents types d'actionneurs électromécaniques :</b>				
1.2.1	▪ Actionneurs électromécaniques dédiés au déplacement de produit ;				
1.2.2	▪ Actionneurs électromécaniques dédiés à la transformation de produit.				
<b>1.3</b>	<b>Les différents types de récepteurs en électrothermie :</b>				
1.3.1	▪ Différents procédés de conversion de l'énergie électrique en électrothermie.				
<b>1.4</b>	<b>Les différents types de récepteurs en électrochimie :</b>				
1.4.1	▪ Différents procédés de conversion en électrochimie.				
<b>1.5</b>	<b>La chaîne de commande des moteurs :</b>				
1.5.1	▪ Différents principes et choix des matériels :				
1.5.1.1	○ Représentations graphiques utilisées dans le domaine de la conversion d'énergie électrique ;				
1.5.1.2	○ Logiciel de conception assisté par ordinateur (C.A.O.) pour les représentations graphiques normalisées des installations de motorisation ;				
1.5.1.3	○ Appareillage des départs moteurs selon les normes en vigueur (coordination type 1 & 2, ...);				
1.5.1.4	○ Appareillage des départs moteurs progressifs (électromécaniques et électroniques) ;				
1.5.1.5	○ Appareillage de variation de vitesse.				
1.5.2	▪ Réalisation des équipements				
1.5.2.1	○ Règles de conception et réalisation des armoires électriques de commande de machine automatisée selon les règles de l'art et les normes en vigueur				
<b>1.6</b>	<b>La régulation industrielle et les fonctions spéciales :</b>				
1.6.1	▪ Différents principes de régulation				
1.6.1.1	○ Constituants d'un procédé de régulation				
1.6.1.2	○ Boucle de régulation				
1.6.2	▪ Boucle de régulation d'un procédé				
1.6.2.1	○ Outils adaptés pour programmer une application de régulation				
1.6.2.2	○ Paramètres d'une boucle de régulation				
<b>1.7</b>	<b>La sécurité machine et la mise en conformité :</b>				
1.7.1	▪ Mise en sécurité des machines en accord avec la réglementation en vigueur				
1.7.1.1	○ Normes régissant la sécurité des machines				
1.7.1.2	○ Démarche de réception d'une machine neuve ou reconditionnée vis à vis de la réglementation				
1.7.1.3	○ Constituants de sécurité				

<sup>16</sup> D'un point de vue technique (implication sur la source d'alimentation, perturbations électromagnétiques, ...), économique et humain. Il est à noter que la compatibilité électromagnétique ne sera jamais abordée à un niveau 3

2	La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique :	Niveau			
		1	2	3	4
<b>2.1</b>	<b>Les différentes sources d'énergie et leurs exploitations dans les applications électriques :</b>				
2.1.1	▪ Production de l'énergie électrique :				
2.1.1.1	○ Principales sources de production de l'énergie (nucléaire, hydraulique et fossile) ;		■		
2.1.1.2	○ Principes et matériels mis en œuvre dans les autres sources d'énergie électrique (nouvelles énergies renouvelables) ;		■		
2.1.1.3	○ Classement des différentes sources de production en fonction de leurs applications.		■		
2.1.2	▪ Transport de l'énergie électrique :				
2.1.2.1	○ Architectures des réseaux de transport et d'interconnexion ;		■		
2.1.2.2	○ Caractéristiques de l'appareillage HT ;		■		
2.1.2.3	○ Normes relatives aux équipements mis en œuvre.		■		
2.1.3	▪ Distribution de l'énergie électrique :				
2.1.3.1	○ Vision globale d'une installation électrique et de son environnement ;		■		
2.1.3.2	○ Matériels permettant de générer des économies d'énergie et d'optimiser les investissements (HTA et BT) ;			■	
2.1.3.3	○ Définition graphique d'une architecture de réseau d'alimentation (HTA et BT) ;			■	
2.1.3.4	○ Dimensionnement, par les calculs et les outils logiciels, des différents éléments qui composent une installation électrique (transformateurs, appareils, câbles...);			■	
2.1.3.5	○ Contrôle des modifications d'une installation électrique (compensation réactif normal, ...) en toute sécurité ;			■	
2.1.3.6	○ Normes NFC15-100 et UTE 15-105 ;			■	■
2.1.3.7	○ Sources de remplacement (groupes électrogènes, onduleurs,...) et équipements assurant la disponibilité de l'énergie électrique en toute sécurité ;			■	■
2.1.3.8	○ Représentations graphiques utilisées dans le domaine de la distribution électrique ;			■	■
2.1.3.9	○ Maîtrise d'un logiciel de CAO pour les représentations graphiques normalisées des installations électriques.			■	■
<b>2.2</b>	<b>La qualité de l'énergie électrique en environnement perturbé :</b>				
2.2.1	▪ Connaissance des protections contre la foudre, conformément aux normes régissant la basse tension :				
2.2.1.1	○ Éléments qui contribuent à la sûreté des installations ;		■		
2.2.1.2	○ Dimensionnement des sources de remplacement (ASI, ADI <sup>17</sup> ...);		■		
2.2.1.3	○ Protections contre la foudre nécessaires à la bonne marche d'une l'installation ;		■		
2.2.1.4	○ Architecture des protections contre la foudre d'une installation ;		■		
2.2.1.5	○ Normes et réglementations.		■		
2.2.2	▪ La compatibilité électromagnétique : faire coexister courants forts et courants faibles				
2.2.2.1	○ Mise en évidence des phénomènes CEM au travers d'expériences simples ;		■		
2.2.2.2	○ Exigences normatives de la directive CEM ;		■		
2.2.2.3	○ Effets des perturbations sur une installation électrique ;		■		
2.2.2.4	○ Modifications nécessaires sur une installation électrique pour éliminer les perturbations dans le domaine de la CEM.		■		
2.2.3	▪ Compréhension et minimisation des harmoniques				
2.2.3.1	○ Observation par des manipulations des perturbations dues aux harmoniques et leurs effets sur les équipements, analyser les relevés de mesure ;			■	
2.2.3.2	○ Dysfonctionnements d'une installation électrique dus à la présence de perturbations harmoniques ;			■	
2.2.3.3	○ Modifications nécessaires à une installation électrique pour minimiser les perturbations harmoniques.			■	
2.2.4	▪ Détermination et mise en œuvre d'une compensation d'énergie réactive en milieu perturbé				
2.2.4.1	○ Choix des condensateurs adéquats permettant de réduire la facture énergétique sur une installation, en milieu perturbé ;		■		
2.2.4.2	○ Choix de la protection des condensateurs contre les phénomènes harmoniques pour éviter leur surcharge.		■		

<sup>17</sup> Voir lexique  
BTS Electrotechnique-décembre 2005.doc

**Extraits** du Programme Pédagogique National  
du DUT « Génie Électrique et Informatique Industrielle »

DUT GEII - Génie Électrique		
UE UE22	Matière Électrotechnique et Électronique de Puissance	Volume horaire 8C, 12TD, 10TP
Référence ET2	Module Machines à courant continu et redressement	Positionnement S2
<p>Objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprendre le principe et le fonctionnement des machines tournantes, et plus particulièrement de la machine à courant continu.</li> </ul>		
<p>Compétences minimales :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Être capable de mettre en œuvre la machine à courant continu,</li> <li>- Être capable de dimensionner un redresseur non commandé.</li> </ul>		
<p>Pré-Requis :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- P1, GE11, ET1, GE12</li> </ul>		
<p>Contenu :</p> <p>Introduction aux convertisseurs électromécaniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fonction d'usage d'une machine tournante,</li> <li>- Principe de base des machines tournantes,</li> </ul> <p>La machine à courant continu :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Constitution des machines à courant continu,</li> <li>- Relations fondamentales (fem, vitesse, couple), réversibilité,</li> <li>- Notion sur les réglages de la vitesse et du couple,</li> <li>- Présentation des différents modes d'excitation,</li> </ul> <p>- Le redressement monophasé :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Objectif de la conversion alternatif – continu,</li> <li>- Montages redresseurs de tension non commandés,</li> <li>- Filtrage et lissage, régulation.</li> </ul>		



## **Pour la session à venir et pour l'épreuve pédagogique,**

Les dénominations « courant faible » et « courant fort » seront toujours d'actualité.

Le niveau d'exploitation des différents thèmes peut se situer au niveau baccalauréat ou au niveau baccalauréat + 2 années. Les exploitations au niveau BTS concernent les sections Systèmes Electroniques, IRIS et Electrotechnique. Celles au niveau DUT concernent les DUT de Génie Electrique et Informatique Industrielle. La liste des sujets pourra être remaniée. L'automatique et l'informatique industrielle restent toujours des domaines transversaux.

L'épreuve restera séparée en deux parties :

- la présentation orale du candidat pendant laquelle les compétences pédagogiques seront évaluées (30 à 40 minutes) ;
- le questionnement du candidat pendant lequel les connaissances de celui-ci seront évaluées (20 à 30 minutes maximum).

### **SESSION AGREGATION EXTERNE GE 2010**

#### **Liste des leçons pour l'épreuve pédagogique proposées au tirage au sort**

1. Modulations numériques (DUT GEII)
2. Lignes de transmission, adaptation d'impédance (DUT GEII)
3. Production d'oscillations utilisant le quartz ( DUT GEII)
4. Synthèse de filtre numérique (DUT GEII)
5. Amplification d'instrumentation (DUT Mesures Physiques)
6. Modulateurs de signaux en fréquence (DUT GEII)
7. Compatibilité électromagnétique, les perturbations rayonnées (BTS systèmes électroniques)
8. Démodulation FM utilisant une boucle à verrouillage de phase (DUT GEII)
9. Les interruptions des microprocesseurs ou microcontrôleurs
10. Choix et mise en œuvre d'un filtre anti-repliement et théorème de Shannon
11. Caractérisation et modélisation des systèmes linéaires continus
12. Les bus de terrain : étude d'une application industrielle mettant en œuvre une liaison Ethernet.
13. Centrale de production photovoltaïque raccordée au réseau d'énergie électrique.
14. Filtrage passif des harmoniques de courant sur le secteur.
15. Onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions : Application à la commande de la machine asynchrone
16. Machine synchrone autopilotée : analogie avec la machine à courant continu
17. Stockage d'énergie électrique pour un véhicule électrique
18. Asservissement continu en vitesse d'une machine à courant continu à excitation constante.
19. Correction des asservissements linéaires continus Régulateurs P. I. D. industriels
20. Modulations numériques (DUT GEII)
21. Synthèse de fréquence (DUT GEII)
22. Synthèse de filtres analogiques (DUT GEII)
23. Transmission avec isolement galvanique d'informations analogiques et numériques.
24. Compatibilité électromagnétique, les perturbations rayonnées (BTS systèmes électroniques)
25. Les bus de terrain : étude d'une application industrielle mettant en œuvre une liaison Ethernet.
26. Asservissement d'une boucle à verrouillage de phase
27. Modélisation et identification des systèmes linéaires continus
28. Alimentation électrique de petites unités isolées à partir de l'énergie solaire.
29. Production d'énergie électrique par micro-centrale hydraulique.
30. Onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions : Application à la commande de la machine asynchrone
31. Distribution de l'énergie électrique en basse tension. Protection des personnes et des installations.
32. Pompage à vitesse variable.
33. Asservissement continu en vitesse d'une machine à courant continu à excitation constante.
34. Etude d'une application nécessitant une correction PI.