Filière TSI ***CNC SESSION 2025***

Epreuve de Génie Electrique

Durée : 3 heures

Aucun document n'est autorisé.
La calculatrice est autorisée.

Le sujet comporte :

- ***Deux pages de garde non numérotée.***
- ***Le texte de l'épreuve (pages numérotées de 2 à 11).***
- ***Deux annexes (pages 12 et 13).***
- ***Trois de documents réponses (pages 14,15 et 16).***

Le sujet se compose d'un exercice préliminaire et de quatre parties ***indépendantes*** *:*

- **Exercice préliminaire (Noté 4 points sur 20 'de la note finale').**
- **Partie A : REFROIDISSEMENT DU FOUR À ARC.**
- **Partie B : DÉPOLLUTION DES HARMONIQUES.**
- **Partie C : RÉGULATION DE LA POSITION DES ÉLECTRODES.**
- **Partie D : LA SUPERVISION ET LE CONTRÔLE DU FOUR À ARC.**

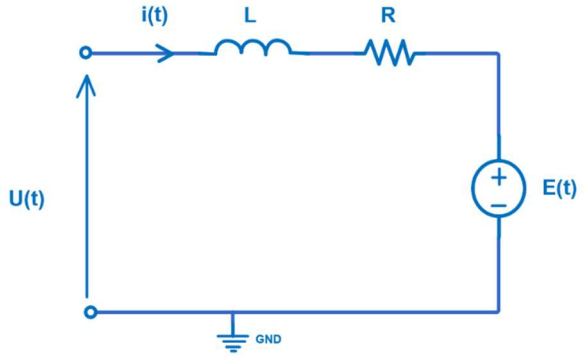
En fin de l'épreuve GE le candidat doit obligatoirement rendre même vides :

- Le cahier des réponses réservé à l'épreuve GE
- Le document réponse figurant sur la page 14, 15 et 16.

Nota *: Si un candidat repère ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.*
Il est rappelé aux candidats que la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des explications entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.

Exercice préliminaire (Notée 4/20 'de la note finale') :

La figure suivante illustre le circuit équivalent de l'induit d'une machine à courant continu en fonctionnement moteur :



Les caractéristiques techniques nominales, fournies par le constructeur, sont :

- ✓ Tension nominale « U_n » : 30 V.
- ✓ Résistance d'induit « R » : 3 Ω.
- ✓ Courant induit nominal « I_n » : 1.5 A.
- ✓ Vitesse nominale du moteur « Ω_n » : 300 rad/s.

P.1- En appliquant la loi des mailles, exprimer la tension d'alimentation $U(t)$ en fonction des éléments du schéma de l'induit.

Par la suite, le moteur fonctionne en régime nominal permanent ($\mathrm{di}/\mathrm{dt} = 0$).

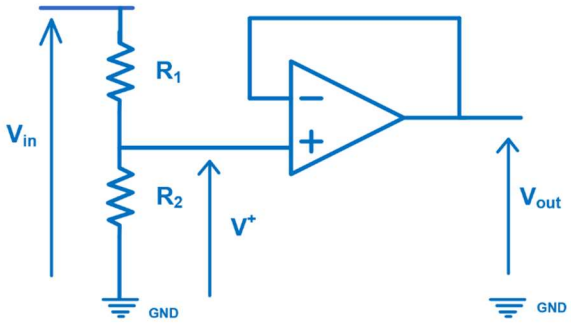
P.2- Calculer la force électromotrice E.

P.3- Calculer la constante de force électromotrice K_e $(E = K_e\Omega)$.

P.4- Calculer la puissance absorbée par le moteur P_a.

P.5- Calculer les pertes par effet de joule P_j.

Afin de mesurer la tension d'alimentation de la machine, on utilise un pont diviseur de tension et un suiveur de tension à l'aide d'un AOP idéal, présenté dans le schéma suivant :



P.6- Sachant que $\mathrm{i}^+ = 0$, exprimer V^+ en fonction de V_{in}, R_1 et R_2.

P.7- Exprimer V_{out} en fonction de V_{in}, R_1 et R_2.

P.8- Trouver la valeur de V_{out} pour $V_{in} = 30V$, $R_1 = 178$ kΩ et $R_2 = 22$ kΩ.

Fin de l'exercice préliminaire

LE FOUR À ARC ET LA SIDERURGIE

Présentation générale :

Le secteur sidérurgique occupe une place très importante au monde et couvre de nombreuses activités dont la fabrication des produits longs, des produits plats, des produits tréfilés, destinés aux BTP (Bâtiment et Travaux Publics), à l'équipement routier, à l'agriculture, au mobilier métallique, à l'électroménager, etc. l'acier est produit dans deux filières : la filière fonte et la filière ferraille.

L'industrie de la ferraille peut produire de l'acier directement à partir de la ferraille dans de petites aciéries (aciéries électriques). Ce procédé de production d'acier relativement nouveau est né à la fin des années 1950 et s'est développé rapidement. Aujourd'hui, l'industrie représente 35 % de la production mondiale d'acier.

Au Maroc, le secteur de la sidérurgie emploie environ 5.000 personnes, avec un chiffre d'affaires de 10 milliards de DH en 2016, et participe à hauteur d'1 milliard de DH au PIB (produit intérieur brute) national, on parle de deux fleurons de la sidérurgie au Maroc : Maghreb Steel et SONASID. La conception de l'aciérie doit permettre d'obtenir du four à arc dans sa production maximale, en évitant toute perte de temps due aux opérations elles-mêmes ou aux équipements auxiliaires. La figure suivante montre le processus global de l'aciérie, depuis la matière première jusqu'à stockage du produit :

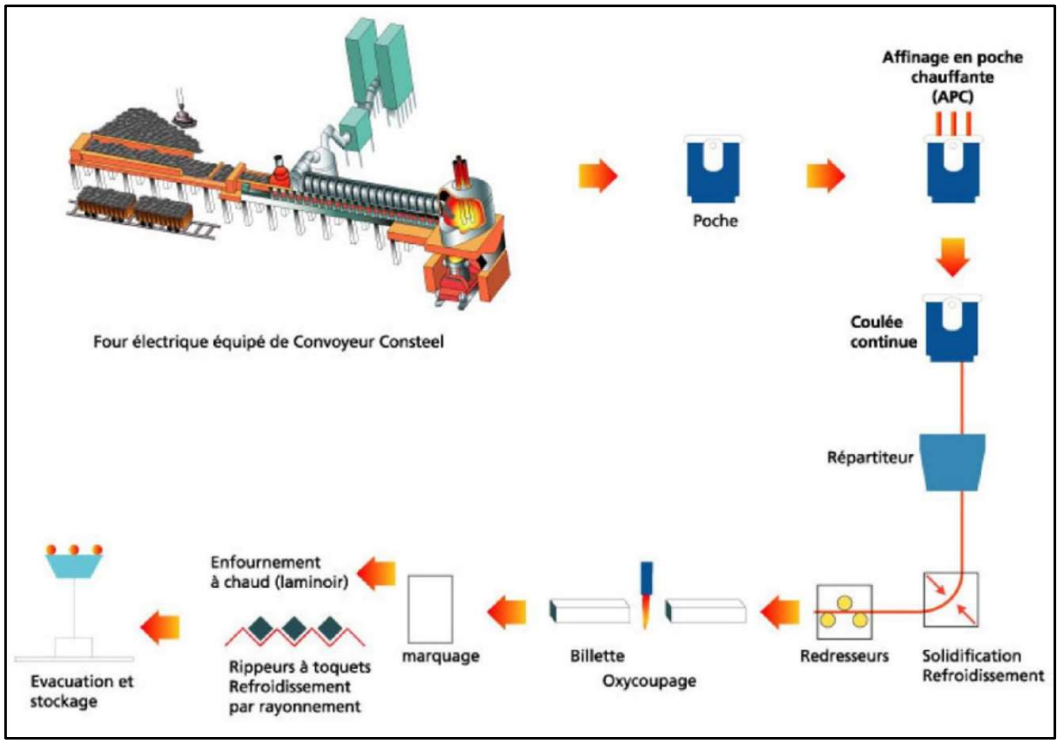


Figure 1 : Processus de l'aciérie.

Le four à arc a besoin d'une grande puissance pour fusionner la ferraille, il est d'ordre de dizaine de mégawatt, l'alimentation en haute tension assure le transport de cette énergie, La figure suivante présente le schéma unifilaire de l'aciérie à SONASID :

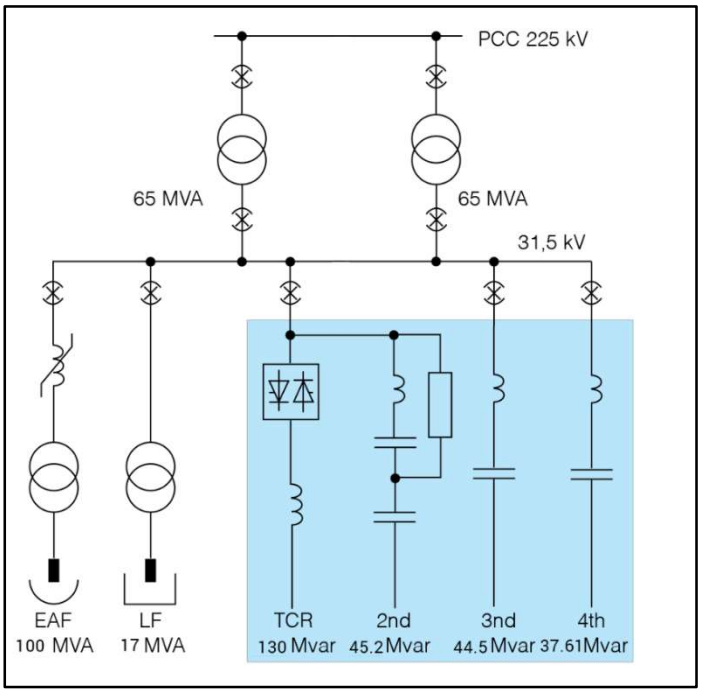


Figure 2 : Architecture électrique de l'aciérie
(schéma unifilaire ; une seule phase est présentée).

Le diagramme de définition de bloc suivant présente les principaux éléments du four à arc :

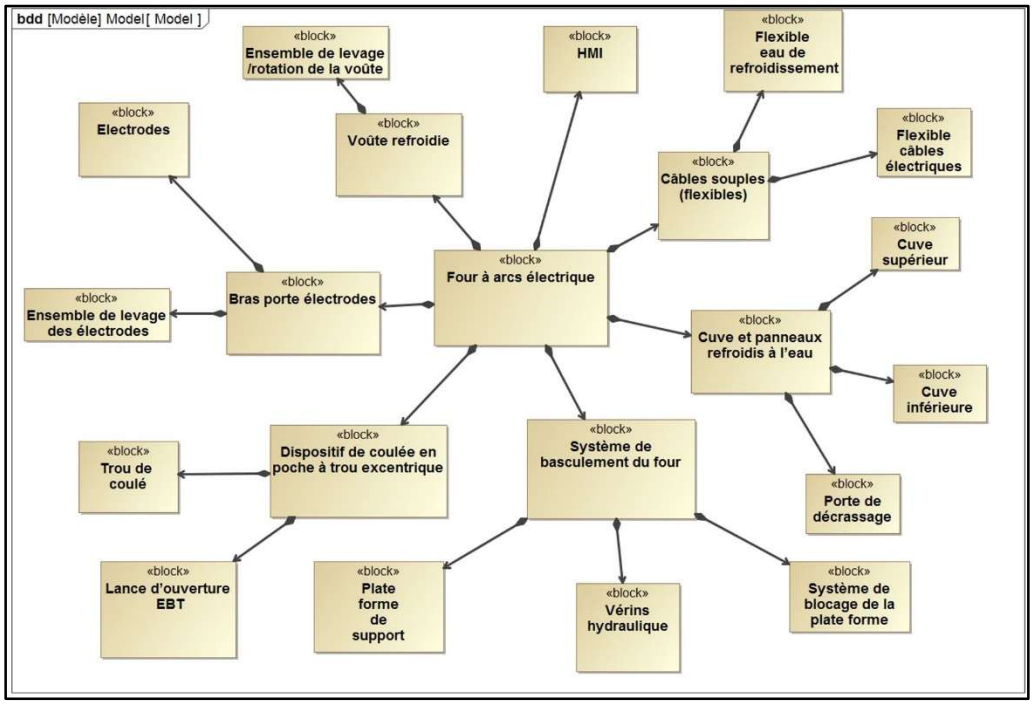


Figure 3 : Diagramme de définition de bloc du four à arc.

Pour le fonctionnement normal du four, on doit respecter le diagramme d'exigence suivant :

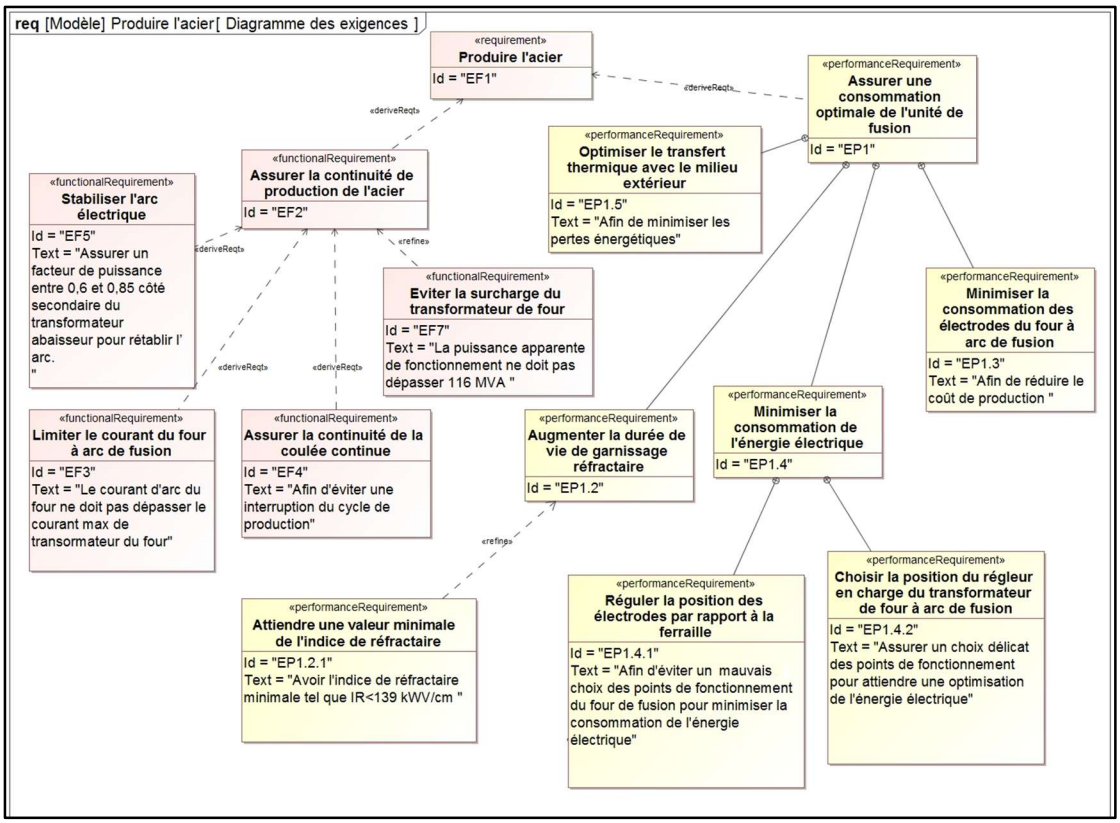


Figure 4 : Diagramme des exigences du four à arc.

Partie A : REFROIDISSEMENT DU FOUR À ARC :

Le refroidissement du four à arc est primordial, premièrement pour protéger le four à arc et ses parties contre la fusion et respecter l'exigence ''**EP1.5 Optimiser le transfert thermique avec le milieu extérieur**'', cela nous permet d'avoir un bon fonctionnement du four, le système de refroidissement est assuré par un système de pompage alimenté par des moteurs asynchrones, le réseau d'alimentation est de 230/400-50Hz, le moteur disponible est couplé en étoile, le schéma équivalent d'un moteur asynchrone utilisé est le schéma monophasé du transformateur ramené au primaire présenté par la figure suivante :

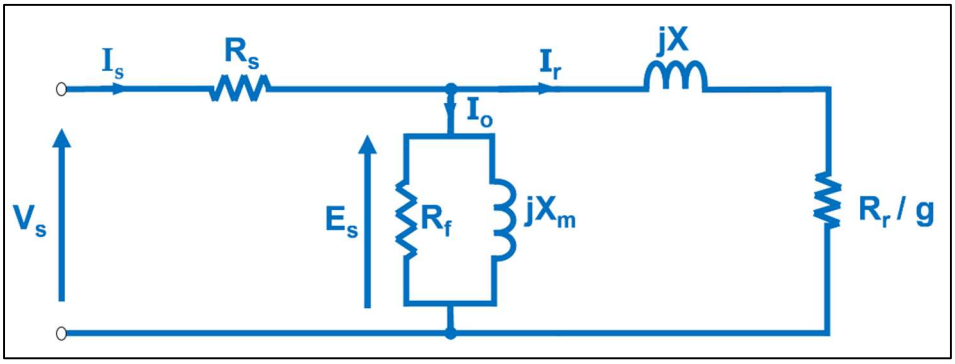


Figure 5 : Schéma équivalent monophasé du moteur asynchrone.

Avec :

- ✓ R_s Resistance d'une phase du stator qui représente les pertes Joules au stator p_{js}.
- ✓ R_f Représente les pertes dans le fer au stator p_{fs}.
- ✓ R_r/g Correspond à la puissance transmise P_{tr}.
- ✓ R_r Représente les pertes Joules au rotor p_{jr}.
- ✓ X_m Représente la réactance magnétisante.
- ✓ X Représente la réactance de fuite totale.

Le moteur disponible a une puissance de 7.5 kW, un ensemble de mesure ont été faite sur ce moteur :

- ✓ Un essai à vide (sans charge mécanique), la puissance active et réactive sont respectivement : $P_0 = 424$ W (pertes fers + pertes mécaniques) et $Q_0 = 3.1$ kVAR.
- ✓ Un essai à rotor bloqué, la puissance active et réactive sont : $P_b = 400$ W, $Q_b = 1.39$ kVAR, et un courant absorbé vaut $I = 14A$.
- ✓ On mesure la résistance entre phase de la machine, on trouve $R_m = 1\Omega$.

A.1- Calculer la valeur de R_s (on rappelle que le couplage du moteur est en étoile).

A.2- En négligeant les pertes joules dans l'essai à vide et en admettant que les pertes fers et mécaniques sont égales, calculer la valeur X_m et R_f.

A.3- Dans l'essai à rotor bloqué, en négligeant le courant à vide, donner le schéma équivalent et calculer les valeurs de R_r et X.

D'après le document constructeur fourni en annexe 1 :

A.4- Indiquer la hauteur d'axe du moteur.

A.5- Calculer la puissance absorbée par le moteur P_{abs}.

A.6- Calculer la valeur de glissement du moteur.

A.7- Calculer la puissance transmise au rotor du moteur P_{tr}.

A.8- Calculer le couple électromagnétique C_{em} transmis au rotor.

Partie B : DÉPOLLUTION DES HARMONIQUES :

Les effets des harmoniques sont très dangereux aux installations et équipements électriques, le four à arc est parmi les plus générateurs des harmoniques dans le réseau

électrique, et afin de respecter l'exigence ''**EF5 Stabiliser l'arc électrique**'' on utilise les filtres électriques anti-harmoniques pour réduire les harmoniques dans le réseau.

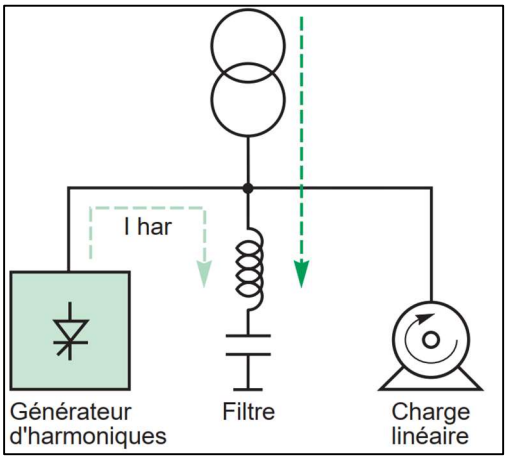


Figure 6 : Filtrage des harmoniques
(schéma unifilaire ; une seule phase est présentée)

L'annexe 2 présente le spectre du courant (on prend en considération les 5 premières harmoniques) alimentant le four à courant alternatif dans l'aciérie. On rappelle que le taux de distorsion harmonique se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{neff}^2}}{I_{1eff}} = \frac{\sqrt{I_{eff}^2 - I_{1eff}^2}}{I_{1eff}}$$

B.1- Calculer le THD% du courant absorbé par le four.

B.2- Sachant que la valeur efficace du courant fondamentale $I_f = 47.5$ kA, calculer la valeur efficace du courant de ligne I_{eff}.

Le rôle du filtre LC est de court-circuité l'harmonique désiré et de fournir l'énergie réactive au réseau, l'installation comporte trois filtres pour l'harmonique 2, 3 et 4, on s'intéresse dans cette partie à éliminer l'harmonique d'ordre 3, l'énergie réactive que doit fournir le filtre est égale à $Q = 44.5$ MVAR.

B.3- En vue de l'harmonique d'ordre 3, l'impédance équivalente est nulle, exprimer ω en fonction de L et C.

B.4- Montrer en vue du fondamental, la cellule LC est équivalente à un condensateur $C_{éq}$.

B.5- Sachant que la tension entre phase est de 30 kV, $f = 50\ Hz$ et le couplage du filtre est en étoile, calculer la valeur de $C_{éq}$ pour fournir l'énergie réactive désirée.

B.6- Trouver les valeurs de L et C.

La compensation de l'énergie réactive est faite d'une manière active, en alimentant un ensemble de bobine par des interrupteurs commandés, l'architecture de l'interrupteur utilisé est un IGBT avec une diode en antiparallèle, présenté par la figure suivante :

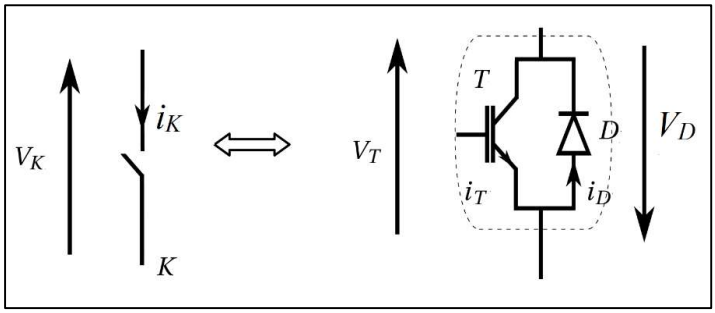


Figure 7 : l'interrupteur du compensateur actif
« IGBT en antiparallèle avec une diode »

B.7- Rappeler les trois règles d'interconnexion des sources.

B.8- Tracer dans le document de réponse 1 la caractéristique statique de la diode (V_D, i_D), de l'IGBT (V_T, i_T) et de l'ensemble de l'interrupteur (V_K, i_K).

Partie C : RÉGULATION DE LA POSITION DES ÉLECTRODES :

Pour respecter l'exigence ''**EP1.4 Minimiser la consommation de l'énergie électrique**'' on doit asservir la position des électrodes par rapport à la ferraille, on commande une servovalve, pour assurer le mouvement du Mat qui fixe les électrodes :

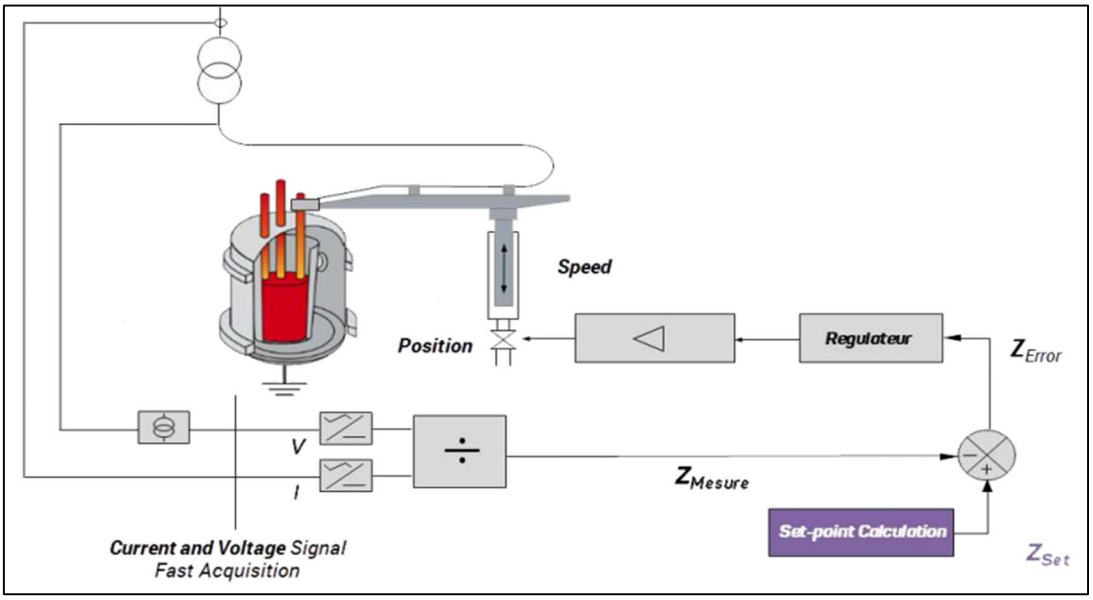


Figure 8 : Boucle de régulation du four à arc

Afin de simplifier le modèle du système, le schéma bloc de cette régulation est présenté par la figure suivante :

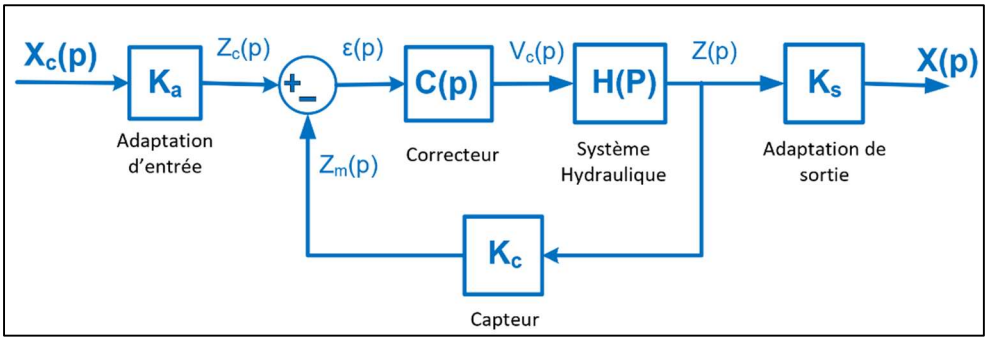


Figure 9 : Schéma de bloc de la boucle de l'asservissement

Où $K_a = 10^{-2}\ \Omega/m$; $K_s = 10^2\ m/\Omega$; $K_c = 20$; Avec :

$X_c(p)$: est la position de consigne des électrodes.

$Z_c(p)$: est l'impédance de consigne.

$Z_m(p)$: est l'impédance mesurée.

$V_c(p)$: est la tension de consigne pour la commande de la servovalve.

$Z(p)$: est l'impédance de ligne.

$X(p)$: est la position des électrodes.

Le système hydraulique est présenté par la forme canonique d'un système de 2ème ordre :

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

Avec $K = 0.5\ \Omega/V$; $m = 0.85$; $\omega_n = 100\ rad/s$.

« Afin de simplifier l'étude on prend l'impédance le paramètre à asservir au lieu de la position des électrodes »

On prend $C(p) = 1$ (sans l'effet du correcteur) :

C.1. Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte $H_{BO}(p) = Z_m(p)/\varepsilon(p)$.

C.2. Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(p) = Z(p)/Z_c(p)$, mettre sous la forme canonique et donner l'expression de ses paramètres (K_{BF}, m_{BF} et ω_{nBF}).

C.3. Calculer l'erreur statique ε_s (échelon unitaire) et l'erreur de traînage ε_t (rampe unitaire).

C.4. D'après le diagramme de Bode présenté dans l'annexe 2, donner la marge de phase.

On prend maintenant $C(p) = \mathrm{K_i}\ (1 + \frac{1}{\mathrm{T_i p}})$:

C.5. On prend $\mathrm{K_i} = 1$ et $\mathrm{T_i} = 100\ s$; tracer le diagramme asymptotique de Bode de ce correcteur dans le document de réponse N°2.

C.6. Donner la nouvelle valeur de l'erreur statique.

C.7. Tracer le diagramme asymptotique de Bode du système corrigé dans le document de réponse N°3.

C.8. Quel est l'effet de ce correcteur sur les performances du système (Stabilité, rapidité et précision).

La dynamique de la ferraille pendant la phase de fusion nécessite une grande stabilité du système. Dans le but d'avoir « une marge de phase =60° » on prend ce type de correcteur $C(p) = K_b\ (1 + a\tau p)\ /(1 + \tau p)$ (Pour avoir l'effet de ce correcteur, la valeur de phase maximale du correcteur doit se coïncide avec la pulsation de coupure à 0db du système non-corrigé) d'après les équations caractéristiques du correcteur présentées dans l'annexe 2 :

C.9. Calculer la valeur de φ_M du correcteur pour satisfaire la marge de phase désirée.

C.10. Calculer le paramètre « a » du correcteur.

C.11. Calculer la constante de temps du correcteur τ.

C.12. Calculer le gain K_b du correcteur (pour assurer $|C(\omega_m)H_{BO}(\omega_m)| = 1$).

Partie D : LA SUPERVISION ET LE CONTRÔLE DU FOUR À ARC :

Le contrôle et la supervision est réalisé avec un poste de travail (sur un ordinateur dédié) à l'aide d'une application logicielle basée sur l'automate programmable pour le contrôle des électrodes du fours à arc, l'automate programmable qui contrôle les électrodes communique avec un l'automate programmable principale du four à arc via un Bus de terrain, la communication de la mesure est faite via le dispositif « DIRIS », la figure suivante montre le schéma de communication des électrodes :

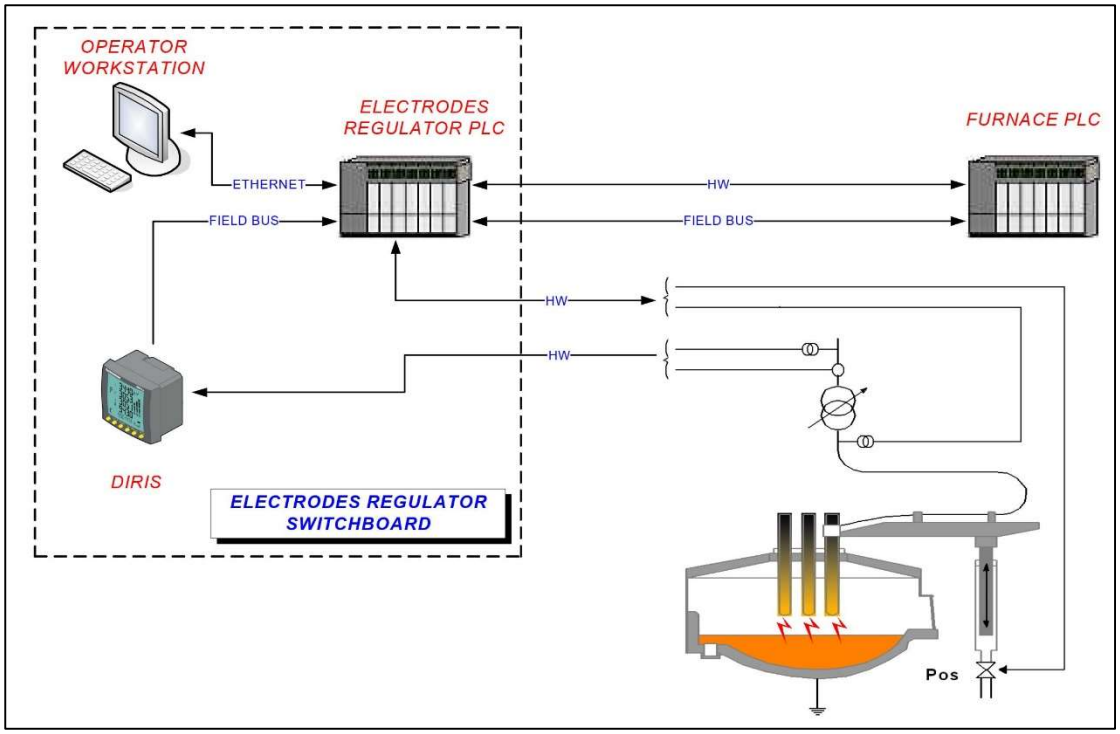


Figure 10 : Interface des régulateurs d'électrodes

D.1. Quelle topologie utilisée pour assurer la communication dans ce réseau ?

D.2. Quel est le niveau de communication entre le poste de travail et le régulateur des électrodes ?

D.3. Préciser l'avantage d'une transmission parallèle par rapport à la transmission série.

D.4. Donner deux équipements d'interconnections des réseaux locaux industriels.

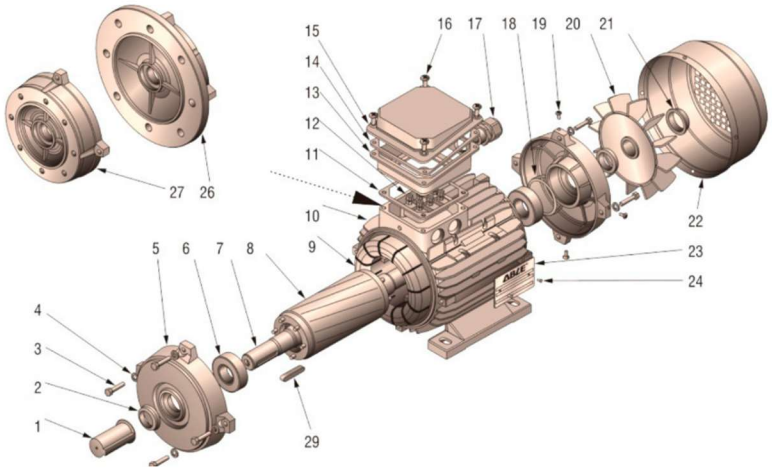
Fin de l'énoncé

Annexe 1 :

Moteur asynchrone triphasé

ATEC FRANCE

DONNÉES TECHNIQUES



2 pôles - 3000 tr/min - 230/400 V

Hauteur d'axe	Puissance kW	Vitesse tr/min	Rendement %	Facteur de P. COS φ	Intensité (400 V) A	Tstart Tn	Tmax Tn	Ist In	Poids Kg
63 A 2	0,18	2715	65	0,80	0,50	3	3,2	5	4
63 B 2	0 25	2715	68	0,81	0,66	3	3,3	5	4,5
63 C 2	0,37	2715	70	0,81	0,65	2,2	2,7	6	5
71 A 2	0,37	2690	70	0,81	0,94	2,8	3	5	6
71 B 2	0,55	2715	73	0,82	1,33	3,3	3,5	5	6,5
80 A 2	0,75	2900	80,7	0,83	1,6	1,8	3,5	5,5	9,5
80 B 2	1,1	2910	82,7	0,83	2,3	2,6	3,5	7,5	10,5
90 S 2	1,5	2920	84,2	0,83	3,1	2,6	3,5	7,1	15
90 L 2	2,2	2915	95,9	0,85	4,3	2	3	7	19
100 L 2	3	2910	87,1	0,88	5,6	2	3,2	8,6	25
112 M 2	4	2920	88,1	0,88	7,4	1,8	2,9	8	34
132 SA 2	5,5	2920	89,2	0,88	10	2,1	2,5	7,5	49,5
132 SB 2	7,5	2925	90,1	0,88	14	2	3,5	7,3	55

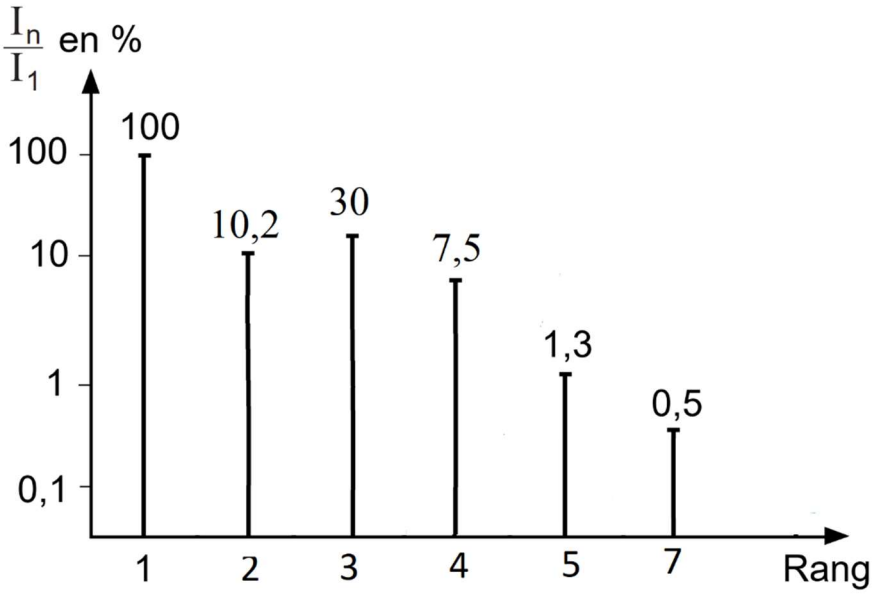
2 pôles - 3000 tr/min - 400/690 V

Hauteur d'axe	Puissance kW	Vitesse tr/min	Rendement %	Facteur de P. COS φ	Intensité (400 V) A	Tstart Tn	Tmax Tn	Ist In	Poids Kg
100 L 2	3	2895	87,1	0,88	5,6	2	3,2	8,6	25
112 M 2	4	2905	88,1	0,88	7,4	1,8	2,9	8	34
132 SA 2	5,5	2930	89,2	0,88	10	2,1	2,5	7,5	49,5
132 SB 2	7,5	2930	90,1	0,88	14	2	3,5	7,3	55
160 MA 2	11	2945	91,2	0,90	19	2,3	2,6	7,3	99
160 MB 2	15	2945	91,9	0,91	26	1,9	2,3	7	108
160 L 2	19	2940	92,4	0,89	32	1,6	2,5	7	118

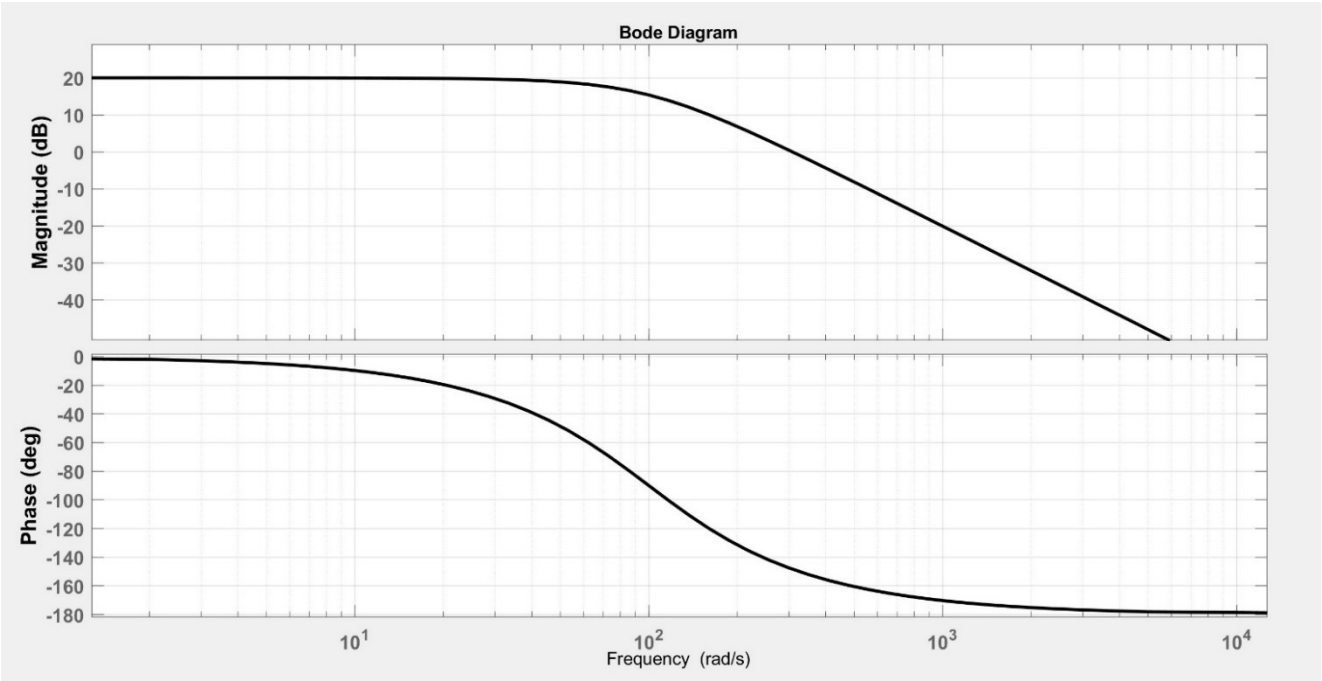
FICHE TECHNIQUE | www.atecfrance.fr |

Annexe 2 :

Spectre du courant alimentant un four à courant alternatif :



Les asymptotes du diagramme de Bode de La FTBO du système non corrigé :



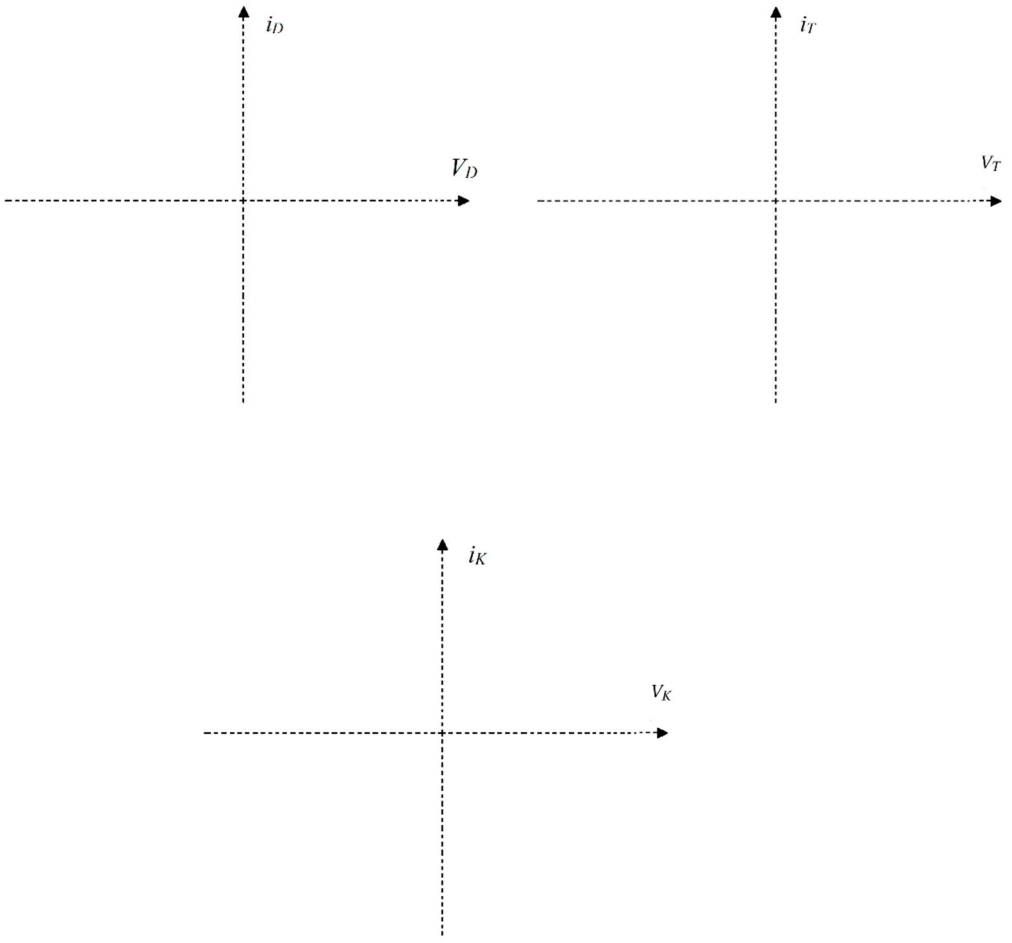
Caractéristiques du correcteur : $C(p)=K_c\frac{1+a\tau p}{1+\tau p}$

Phase maximale apportée φ_M	Pulsation de φ_M	Gain à la pulsation ω_M
$\varphi_M = \arcsin\frac{a-1}{a+1} \quad \Leftrightarrow \quad a = \frac{1+\sin\varphi_M}{1-\sin\varphi_M}$	$\omega_M = \frac{1}{\tau\sqrt{a}}$	$\lvert C(\omega_M)\rvert = Kc\sqrt{a}$

Ne rien écrire dans ce cadre

Document réponse N°1

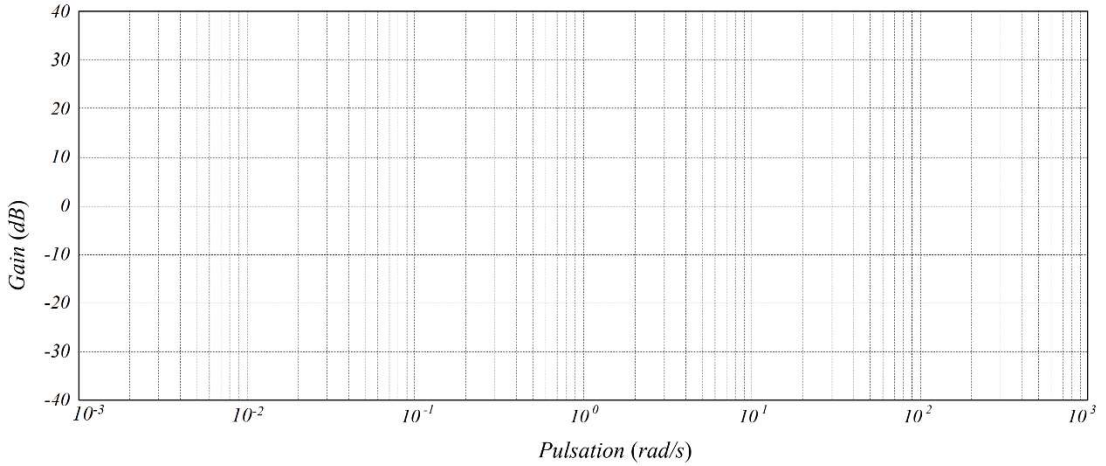
Question B.8 :

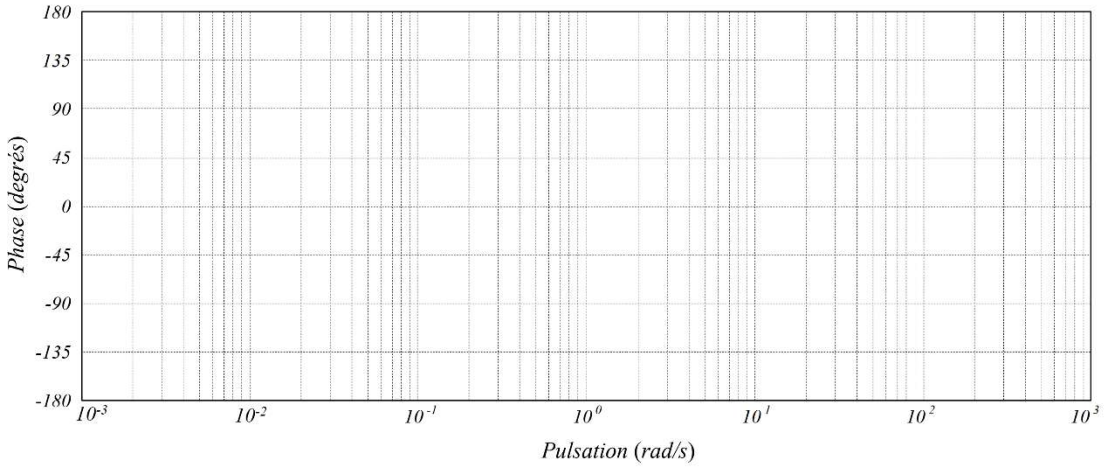


Ne rien écrire dans ce cadre

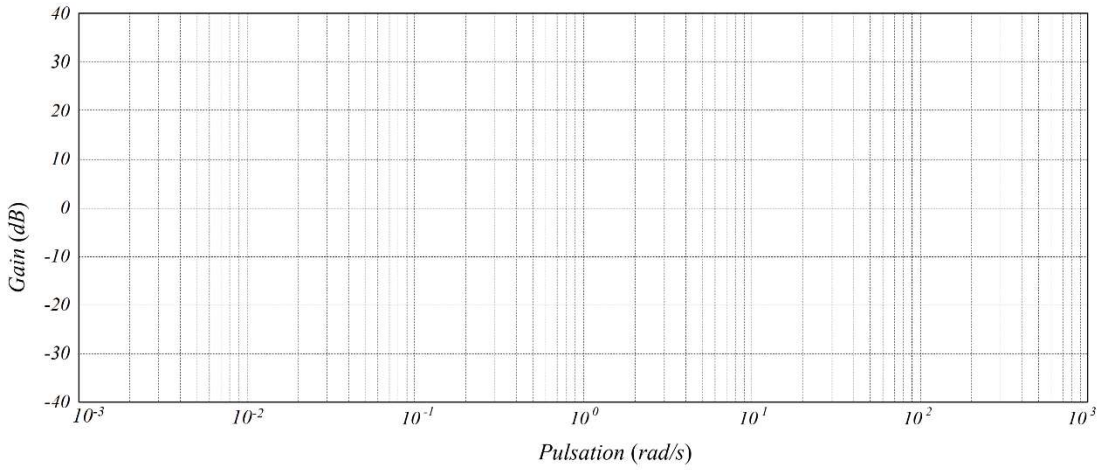
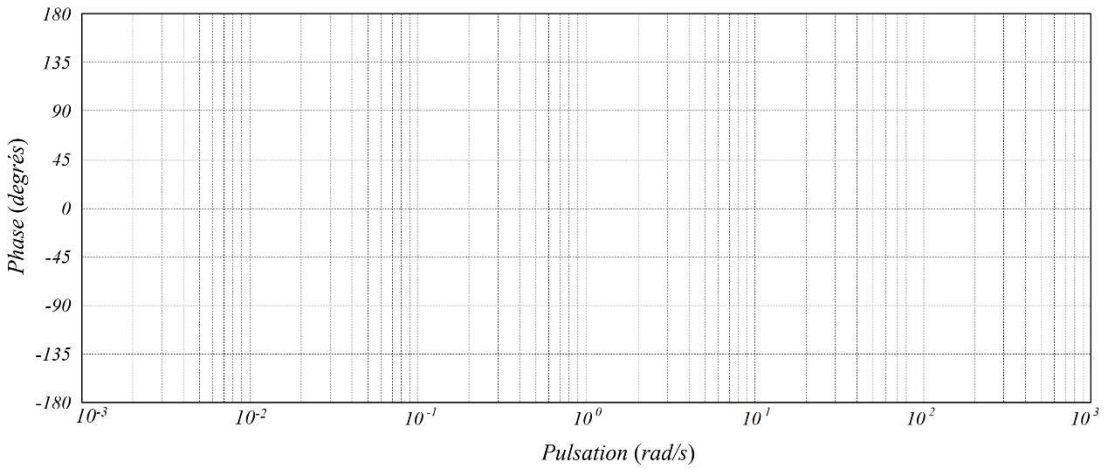
Document réponse N°2

Question C.5 :





Ne rien écrire dans ce cadre

Document réponse N°3

Question C.7 :