



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE,
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Concours externe BAC + 3 du CAPET

Cafep-Capet

Section : Sciences industrielles de l'ingénieur

Option : ingénierie électrique

- 1) Exemple de sujet pour la première épreuve d'admissibilité
- 2) Attendus de l'épreuve
- 3) Extrait de l'arrêté du 17 avril 2025

Les épreuves du concours externe du Capet et Cafep-Capet BAC+ 3 sont déterminées dans [l'arrêté du 17 avril 2025 fixant les modalités d'organisation du concours externe du certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement technique](#), publié au Journal Officiel du 19 avril 2025, qui fixe les modalités d'organisation du concours et décrit le schéma des épreuves.

1) Exemple de sujet pour la première épreuve d'admissibilité

CAPET BAC + 3 Sujet 0

Sommaire

	Page
Sommaire	2
Présentation du support	3
Partie A (à traiter obligatoirement)	4
Partie B (à traiter obligatoirement)	5
Partie C (à traiter obligatoirement)	8
Partie D (choix 1)	13
Partie E (choix 2)	16

Les parties A, B et C sont à traiter obligatoirement par tous les candidats.

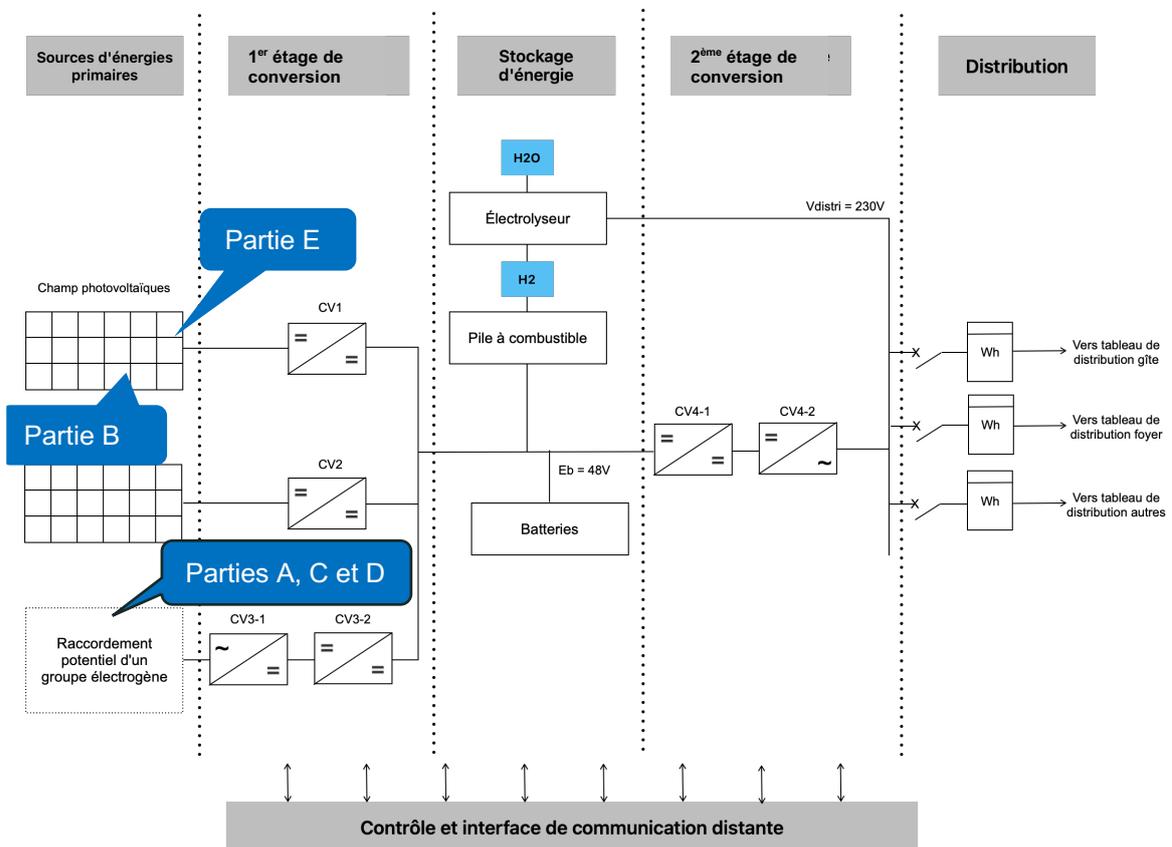
Les candidats devront choisir de traiter la partie D (choix 1) ou la partie E (choix 2).

Réseau d'électrification dans un site isolé à l'île de la Réunion

Coupé du monde au cœur du parc national de La Réunion, situé dans un cirque au relief très escarpé, possédant un foncier restreint, le cirque de la nouvelle est classé au patrimoine mondial de l'Unesco.

Les 310 foyers et 13 gîtes équipés, il y a une vingtaine d'années, de panneaux photovoltaïques, se tournent désormais vers des groupes électrogènes.

Les différentes parties de l'épreuve portent sur l'alimentation en énergie électrique de ce site isolé dont le synoptique de l'installation est donné sur la figure ci-dessous.



Les parties proposées sont toutes indépendantes et exploitent une partie de l'installation présentée ci-dessus.

Les parties A, C et D (choix 1) propose des problématiques autour du groupe électrogène et plus précisément de la génératrice synchrone.

La partie B a pour objet la caractérisation d'une chaîne de mesure.

La partie E (choix 2) s'intéresse à la transmission des informations sur un bus I2C d'un capteur de courant et de tension.

Partie A (à traiter obligatoirement)

Évaluer les performances d'une structure de conversion de puissance

Le réseau d'électrification est équipé d'une génératrice synchrone. Pour alimenter le système de régulation de l'excitation de celle-ci, il est possible d'utiliser l'énergie provenant d'un groupe électrogène. Pour répondre à ce besoin, le réseau d'électrification comprend un système de conversion de puissance électrique dont le premier étage (CV3-1 dans la figure de présentation du support) est réalisé en associant un transformateur et un pont redresseur monophasé de type PD2. Le schéma détaillé de cet étage est présenté figure A1.

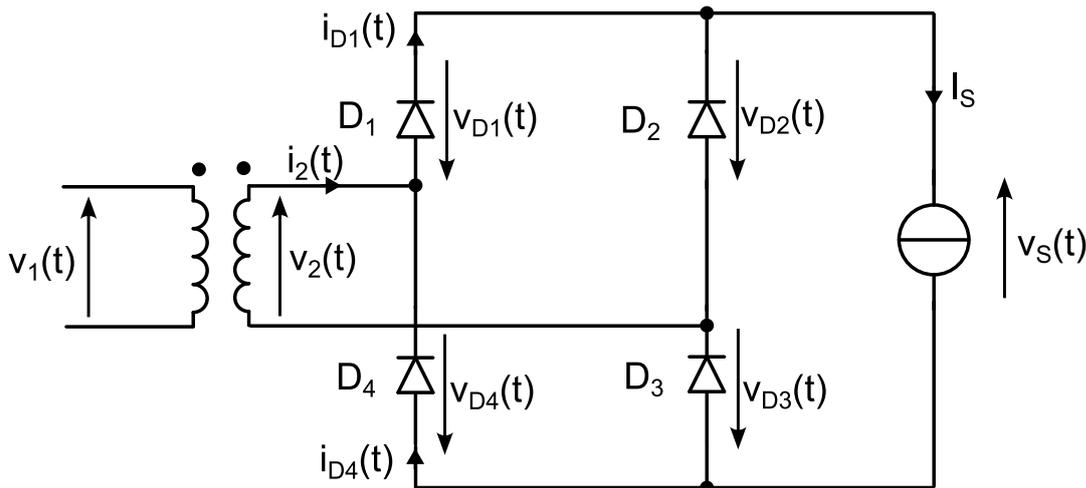


Figure A1 : Association transformateur – redresseur monophasé PD2

Hypothèses :

- les diodes sont supposées idéales. D₁ et D₂ sont à cathodes communes, celle qui voit le plus haut potentiel à son anode conduit. D₃ et D₄ sont à anodes communes, celle qui voit le plus bas potentiel à sa cathode conduit ;
- la charge est modélisée par une source de courant continu telle que $I_S = 10 \text{ A}$;
- la tension $v_1(t)$ au primaire du transformateur est sinusoïdale, de période T et de valeur efficace $V_{1\text{eff}} = 230 \text{ V}$;
- la tension $v_2(t)$ au secondaire du transformateur est sinusoïdale, de période T et de valeur efficace $V_{2\text{eff}}$. Elle s'écrit donc : $v_2(t) = \sqrt{2} \cdot V_{2\text{eff}} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$.

Cahier des charges partiel :

- le facteur de puissance de l'installation f_p doit être au moins égal à 0,9 ;
- les diodes sélectionnées doivent être adaptées aux niveaux de courant et de tension imposés.

Objectif : Valider la structure de redressement proposée afin de respecter les contraintes du cahier des charges.

Question A1

Indiquer sur le document réponse DRA1 les noms des diodes (D₁ à D₄) qui conduisent le courant lors de chaque intervalle de temps.

Question A2 | Donner la valeur de la tension $v_{D1}(t)$ lorsque la diode D_1 est passante. En étendant ce résultat aux 4 diodes et en vous appuyant sur la loi des mailles, compléter le document DRA1 en donnant pour chaque intervalle de temps la valeur de $v_S(t)$ en fonction de $v_2(t)$.

Question A3 | Compléter le document réponse DRA1 en traçant l'allure de $v_S(t)$.

La valeur moyenne notée \bar{x} d'un signal $x(t)$ périodique de période T_1 peut se calculer en utilisant l'expression :

$$\bar{x} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x(t) \cdot dt$$

Question A4 | Donner la période T_S de $v_S(t)$ en fonction de T la période de $v_2(t)$ puis calculer la valeur moyenne de $v_S(t)$ notée \bar{v}_S en fonction de $V_{2\text{eff}}$.

Question A5 | Donner la relation entre $V_{1\text{eff}}$, $V_{2\text{eff}}$ et m le rapport de transformation du transformateur. En déduire la valeur de m pour que la valeur de \bar{v}_S soit égale à 24 V puis la valeur de $V_{2\text{eff}}$.

Le document réponse DRA2 montre l'allure temporelle des courants $i_{D1}(t)$ et $i_{D4}(t)$.

Question A6 | Donner la relation existante entre $i_{D1}(t)$, $i_{D4}(t)$ et $i_2(t)$. Compléter alors le document réponse DRA2 en représentant l'allure temporelle du courant $i_2(t)$.

La valeur efficace notée X_{eff} d'un signal $x(t)$ périodique de période T_1 peut se calculer en utilisant l'expression :

$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x^2(t) \cdot dt}$$

Question A7 | Calculer la valeur efficace de $i_2(t)$ notée $I_{2\text{eff}}$ en fonction de I_S .

La puissance active consommée par la charge s'exprime $P = \bar{v}_S \cdot I_S$.

Question A8 | Rappeler l'expression de la puissance apparente S consommée au secondaire du transformateur. Montrer alors que le cahier des charges pour le facteur de puissance f_p est bien satisfait.

Question A9 | Donner la relation liant les tensions $v_{D1}(t)$, $v_{D2}(t)$ et $v_2(t)$. Compléter alors le document réponse DRA1 en traçant l'allure de $v_{D1}(t)$.

Question A10 | Indiquer les calibres maximaux en courant et tension des diodes à choisir avec un coefficient de sécurité de 20 %.

Partie B (à traiter obligatoirement)

Caractériser les performances d'une chaîne d'acquisition

Un capteur est utilisé pour fournir une mesure de l'irradiance solaire au système de contrôle de l'installation (figure B1). La chaîne d'acquisition utilise le courant fourni par une cellule photovoltaïque comme grandeur physique de référence pour déterminer l'irradiance. Le schéma fonctionnel figure B1 illustre le cheminement de l'information « Irradiance », notée I_{rad} , et les différentes transformations qu'elle subit au sein de la chaîne d'acquisition.

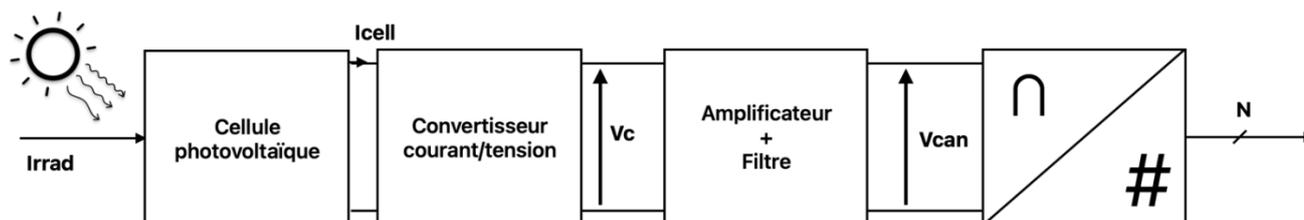


Figure B1 : Chaîne d'acquisition de l'irradiance solaire

D'après le cahier des charges, la chaîne d'acquisition doit permettre une mesure de l'irradiance entre 200 W/m^2 et 1000 W/m^2 . La résolution de la chaîne d'acquisition doit être inférieure à $1,5 \text{ W/m}^2$.

La caractéristique courant-tension de la cellule est représentée pour différentes valeurs de I_{rad} (W/m^2) sur la figure B2.

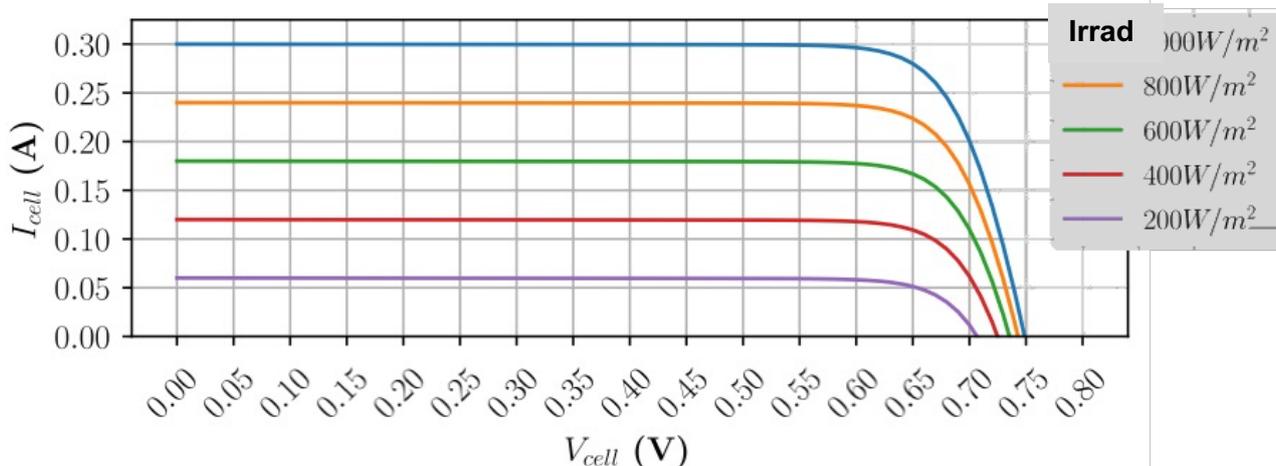


Figure B2 : Caractéristiques courant-tension d'une cellule

Objectif : Valider les performances des différents étages de la chaîne de mesure permettant de respecter le cahier des charges.

Étude du premier étage

Le convertisseur courant/tension est réalisé grâce à une résistance de shunt notée R_1 d'une valeur de 1Ω .

Question B1

Exprimer le gain entre l'irradiance et le courant d'une cellule. Montrer que $V_c = 0,0003 \times I_{\text{rad}}$. Évaluer la valeur de V_c , notée $V_{c_{\text{max}}}$, correspondant à l'irradiance maximale du cahier des charges.

Étude du deuxième étage

Le montage à amplificateur linéaire intégré (ALI ou AOP) présenté à la figure B3 est utilisé pour amplifier le signal V_c . Pour l'étude de ce montage, les grandeurs seront considérées comme continues et l'ALI supposé idéal et alimenté de façon symétrique.

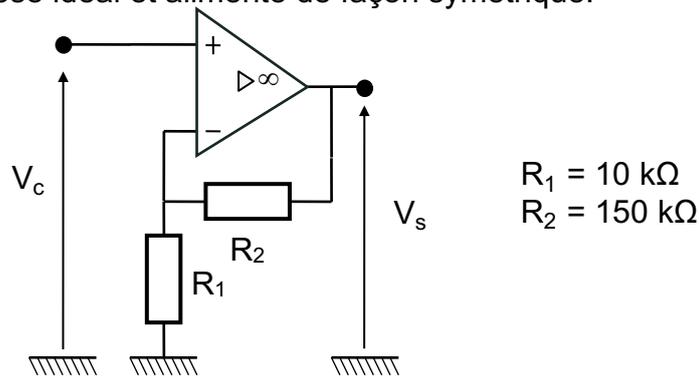


Figure B3 : Montage amplificateur

- Question B2** | Donner l'expression du gain en tension $A_v = \frac{V_s}{V_c}$ du montage amplificateur.
- Question B3** | En déduire l'expression de V_s en fonction de R_1 , R_2 et Irrad. Calculer la valeur de V_s , notée V_{Smax} , correspondant à l'irradiance maximale du cahier des charges.

En réalité, l'information peut être affectée par des interférences électromagnétiques, telles que les parasites à 50 Hz ou les signaux de commutation générés par des équipements voisins. Pour améliorer la qualité du signal avant sa conversion analogique-numérique, un filtre d'ordre 1 (figure B4), est mis en œuvre. Soit V_{in} et V_{out} , les tensions, considérées comme sinusoïdales, en entrée et en sortie de ce montage. L'ALI est supposé parfait.

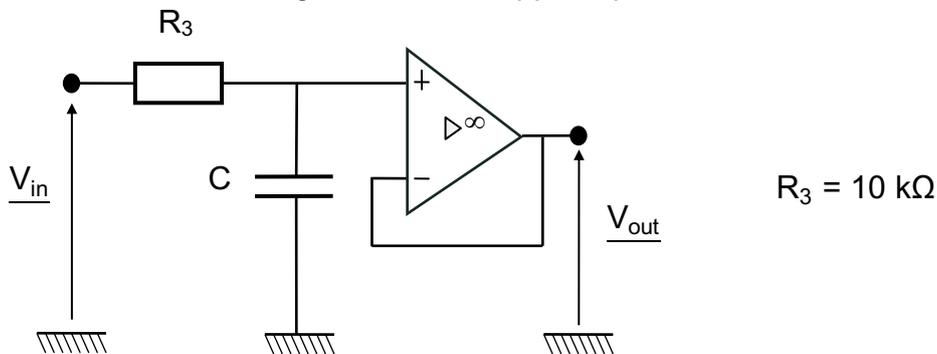


Figure B4 : Filtre d'ordre 1

- Question B4** | Montrer que la fonction de transfert de ce filtre est donnée par l'expression suivante : $H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1+j\omega \cdot R_3 \cdot C}$.
- Question B5** | Préciser la nature du filtre ainsi que son ordre. Justifier votre réponse.
- Question B6** | Exprimer la fréquence de coupure f_c en fonction de R_3 et C . Déterminer la valeur de C pour obtenir $f_c \approx 10$ Hz.

Étude du dernier étage

L'obtention du mot numérique, noté N , image de la tension V_s est réalisé par un convertisseur analogique numérique (CAN) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- résolution : $n = 10$ bits ;
- conversion : unipolaire ;
- tension pleine échelle : 5 V ;
- code : binaire naturel.

Question B7 | À partir des résultats de la question B3 ainsi que des caractéristiques du CAN, conclure sur le choix de la valeur du gain en tension A_v .

Question B8 | Déterminer le pas de conversion en mV (quantum) du CAN.

Question B9 | Donner l'expression de N , le mot numérique en sortie du CAN, en fonction de I_{rrad} .

Question B10 | Dédire des résultats précédents la plus petite variation d'irradiance détectable. Conclure vis-à-vis du cahier des charges.

Partie C (à traiter obligatoirement)

Paramétrer un système de régulation

Les tensions triphasées de sortie de la génératrice synchrone connectée au site ne sont pas intrinsèquement stables, elles dépendent des fluctuations de la charge connectée, de la vitesse de rotation de la machine et d'éventuelles perturbations. Afin de corriger ce problème et de maintenir la valeur efficace des tensions à 230 V avec une marge de $\pm 10\%$, un système de régulation est mis en œuvre et présenté à la figure C1 pour une phase, le système étant par ailleurs équilibré.

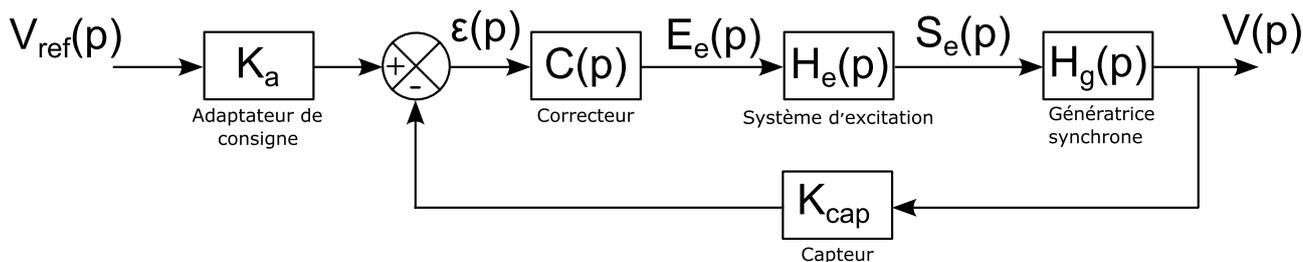


Figure C1 : Système de régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone

Objectif : Paramétrer un système de régulation afin de satisfaire les exigences de performances du cahier des charges.

Identification des paramètres du système

Question C1 | Exprimer le signal d'erreur $\varepsilon(p)$ en fonction de $V_{\text{ref}}(p)$, $V(p)$, K_{cap} et K_a .
En déduire la relation entre K_a et K_{cap} pour que le signal d'erreur soit nul lorsque la tension $V(p)$ et la tension de référence $V_{\text{ref}}(p)$ sont égales.

L'équation différentielle régissant le fonctionnement du système d'excitation est :

$$\tau_e \frac{ds_e(t)}{dt} + s_e(t) = K_e \cdot e_e(t)$$

L'équation différentielle régissant le fonctionnement de la génératrice synchrone est :

$$\tau_g \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = K_g \cdot s_e(t)$$

Question C2 | Les conditions de Heaviside étant satisfaites, exprimer les fonctions de transfert $H_e(p) = \frac{S_e(p)}{E_e(p)}$ et $H_g(p) = \frac{V(p)}{S_e(p)}$ régissant respectivement le fonctionnement du système d'excitation et de la génératrice synchrone.

Le document réponse DRC1 montre la réponse du système d'excitation à un échelon de tension $e_e(t) = 10 \text{ V}$.

Question C3 | À partir du document réponse DRC1, déterminer les valeurs numériques des constantes K_e et τ_e .

Le document réponse DRC2 montre le schéma-bloc du système dont la structure est modifiée pour présenter un retour unitaire.

Question C4 | Compléter le document réponse DRC2 en y incluant les expressions littérales des fonctions de transfert précédemment déterminées en fonction de la variable de Laplace p et des constantes du système.

Étude du système non corrigé

Question C5 | Calculer l'expression littérale de la fonction de transfert en boucle ouverte $H_{BO}(p)$ du système en prenant $C(p) = K_P$.

Le document réponse DRC3 présente le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte $H_{BO}(p)$ pour un correcteur proportionnel $C(p) = K_P = 1$.

Question C6 | À l'aide du document réponse DRC3, déterminer la marge de phase et la marge de gain du système. En déduire si le système ainsi réalisé est stable. Justifier.

Question C7 | Montrer que la fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(p)$ s'exprime :

$$H_{BF}(p) = \frac{V(p)}{V_{ref}(p)} = \frac{\frac{K}{1+K}}{1 + \frac{\tau_e + \tau_g}{1+K} p + \frac{\tau_e \cdot \tau_g}{1+K} p^2}$$

Avec $K = K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K$

Validation du cahier des charges

Pour un fonctionnement correct du système le cahier des charges propose les exigences suivantes :

- une marge de phase d'au moins 45° ;
- une erreur statique limitée à 4 V.

Question C8 | À l'aide du document réponse DRC3, donner le gain en décibel qu'il est possible d'ajouter au système pour obtenir une marge de phase de 45° . Calculer ensuite le gain $K_{P_{max}}$ correspondant.

Le théorème de la valeur finale permet d'exprimer l'erreur statique par :

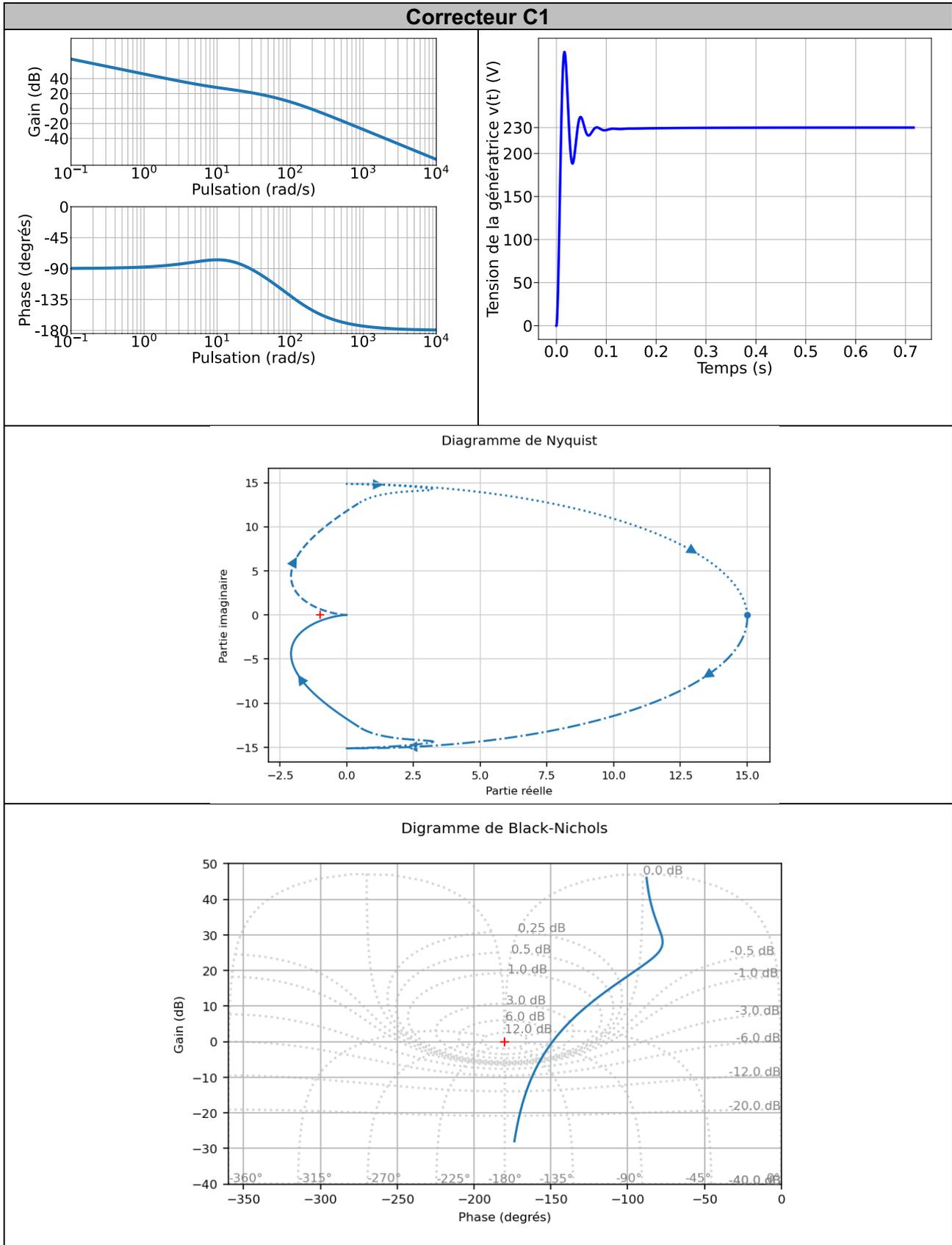
$$\varepsilon_S = \lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \varepsilon(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot (1 - H_{BF}(p)) \cdot V_{ref}(p)$$

avec $V_{ref}(p)$ un échelon d'amplitude 230 V.

Question C9 | Calculer l'expression littérale de l'erreur statique pour le système de régulation de tension de la génératrice synchrone. En déduire la valeur minimale de K_P notée $K_{P_{min}}$ permettant de satisfaire le cahier des charges sachant que le produit $K_{cap} \cdot K_e \cdot K_g = 0,25$.

Question C10

En utilisant les questions C8 et C9, justifier qu'il n'est pas possible de totalement satisfaire le cahier des charges avec un correcteur proportionnel. Choisir alors un correcteur amélioré parmi les deux proposés figure C2 pour répondre à toutes les exigences.



Correcteur C2

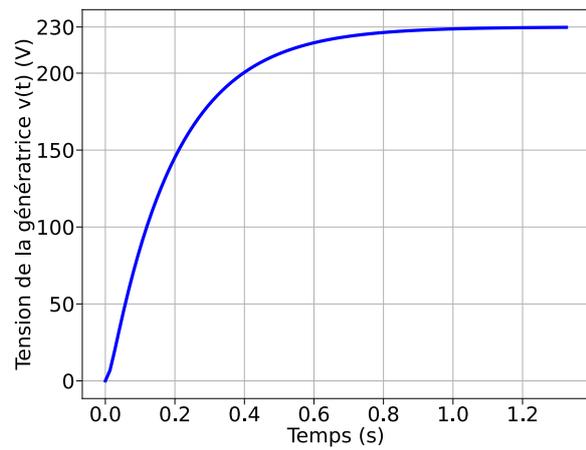
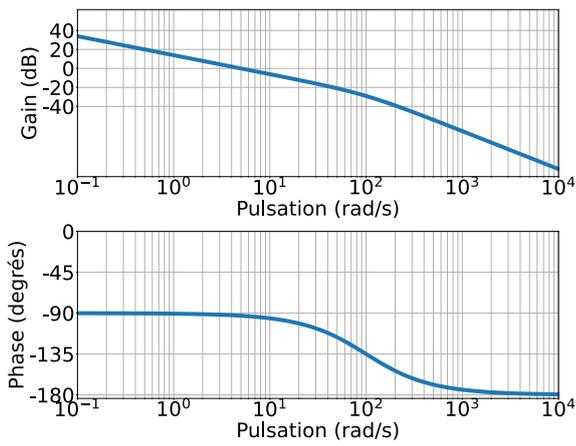


Diagramme de Nyquist

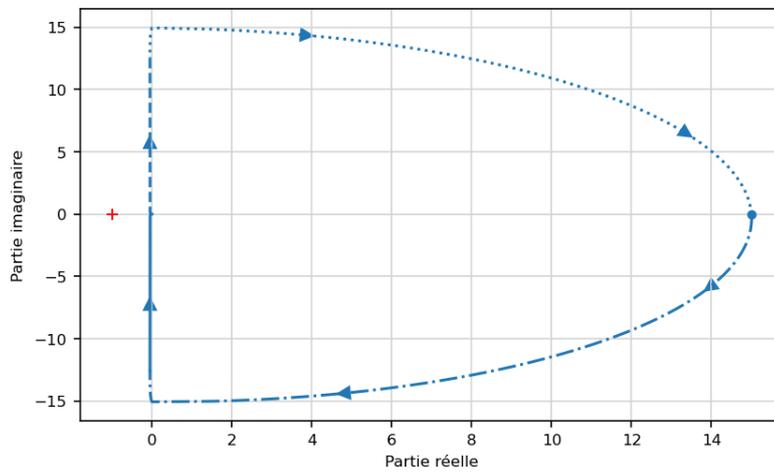


Diagramme de Black-Nichols

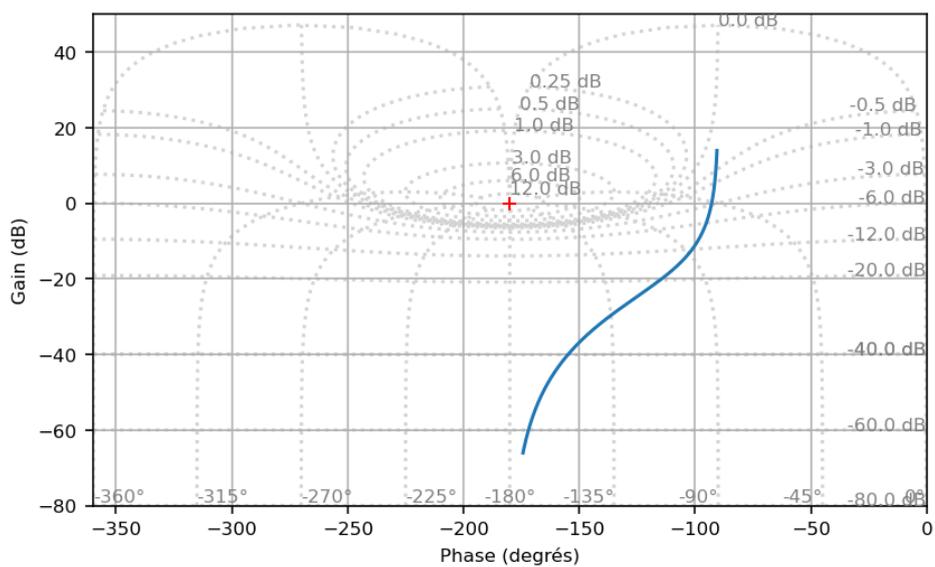


Figure C2 : Réponses fréquentielles (boucle ouverte) et temporelles (boucle fermée)

Modéliser et caractériser une génératrice synchrone

La continuité de la distribution électrique du site isolé étudié a nécessité de mettre en œuvre un groupe électrogène présenté à la figure D1.

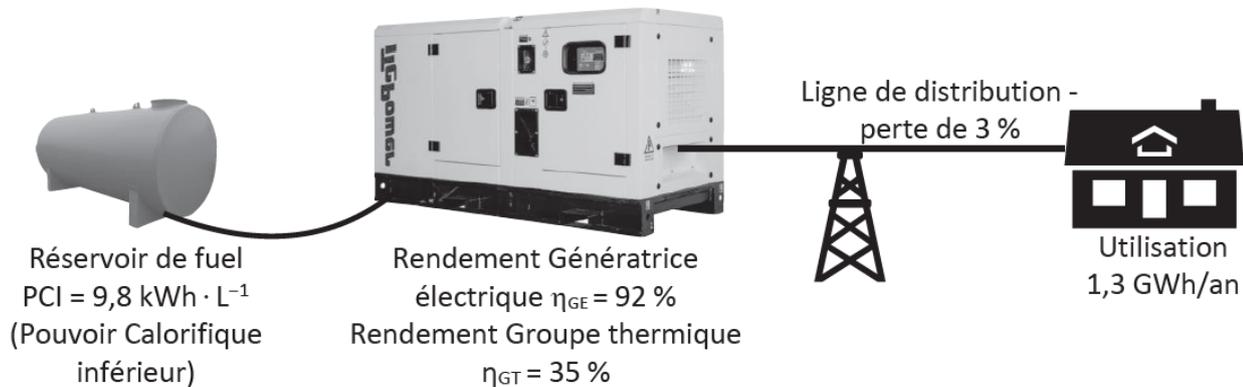


Figure D1 : Synoptique de l'installation du groupe électrogène.

La génératrice connectée au réseau d'électrification est entraînée par un moteur thermique qui impose une fréquence de rotation constante, notée N , de 3000 tr/min. La génératrice est de type synchrone à excitation indépendante. Le réseau de distribution est de type triphasé, avec des tensions de valeur efficace entre phase de 400 V et de fréquence de 50 Hz.

Objectif : Valider la valeur du rendement. Déterminer les paramètres du modèle de la machine synchrone.

Hypothèses :

- les enroulements du stator sont couplés en étoile ;
- le rotor est alimenté par un courant continu constant ;
- les pertes rotoriques sont négligées ;
- le circuit magnétique n'est pas saturé.

Évaluation du rendement

Question D1 | Calculer le nombre de pôles de la génératrice.

Le document réponse DRD1 représente la plaque à bornes de la génératrice synchrone triphasée. Celle-ci comporte six bornes (U1, V1, W1, U2, V2, W2) auxquelles sont reliées les entrées et les sorties des trois enroulements. Les phases disponibles en entrée du réseau de distribution sont notées Ph1, Ph2 et Ph3.

Question D2 | Compléter le câblage du moteur représenté sur le document DRD1 afin de réaliser le couplage choisi par le constructeur.

Notations et données :

- V, I, E : valeurs efficaces des grandeurs complexes $\underline{V}, \underline{E}$, et \underline{I} ;
- S : puissance apparente de la génératrice synchrone ;
- φ : déphasage de la tension du réseau $v(t)$ sur le courant débité $i(t)$;
- δ : déphasage entre la tension $e(t)$ et de la tension $v(t)$;
- R : résistance statorique par phase d'une valeur de $0,14 \Omega$;
- Ω : vitesse de rotation de la génératrice synchrone en rds^{-1} , considérée constante ;
- K : la constante de fem ($E = K \cdot \Omega$) d'une valeur de $1,1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rd}^{-1}$.

Point de fonctionnement nominal :

- $S = 63 \text{ kV} \cdot \text{A}$;
- $V = 230 \text{ V}$;
- $\cos \varphi = 0,8$;

Point de fonctionnement à vide :

- $V = 230 \text{ V}$;
- pertes évaluées à 3200 W .

Question D3

Pour le point de fonctionnement nominal, déterminer :

- le courant nominal ;
- la puissance utile ;
- la puissance absorbée ;
- le rendement de la machine hors excitation.

Comparer à la valeur du rendement donnée à la figure D1.

Modélisation de la génératrice

La figure D2 présente le schéma électrique du modèle équivalent par phase de la génératrice synchrone.

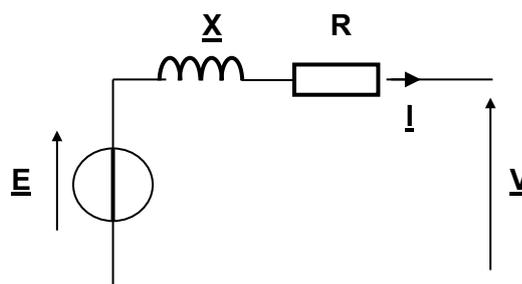


Figure D2 : Schéma électrique par phase de la génératrice synchrone

Question D4

Indiquer précisément ce que représente E , R et X sur le schéma électrique.

Question D5

Donner l'expression de \underline{V} en fonction de \underline{E} , R , X et \underline{I} .

La résistance R sera négligée pour la suite de l'étude.

Le document réponse DRD2 présente le diagramme de Fresnel partiel des grandeurs mises en jeu en prenant comme origine des phases la tension simple \underline{V} .

Question D6 | Donner la nature de la charge (inductive, capacitive ou résistive) en interprétant le signe et la valeur de φ représenté sur le document réponse DRD2.

Question D7 | Pour le point de fonctionnement nominal, compléter sur le document réponse DRD2, le diagramme vectoriel des différentes grandeurs mises en jeux.

Question D8 | Exprimer la relation liant E , V , I , δ et φ . Expliquer sous quelle condition sur δ on obtient l'expression suivante : $V = E - X \cdot I \cdot \sin(\varphi)$

Question D9 | Calculer la valeur de X et en déduire la valeur de l'inductance cyclique de la génératrice.

Question D10 | Justifier l'hypothèse qui a conduit à négliger la résistance. Conclure

Évaluer les performances d'un réseau de communication

Afin d'extraire la puissance maximale d'un panneau photovoltaïque, un modulateur de puissance à suivi de point de puissance maximal (MPPT) est utilisé. Le fonctionnement de ce modulateur repose sur la mesure de la puissance électrique.

L'étude porte sur un capteur de courant et de tension continu de type I2C afin de déterminer la puissance électrique.

Objectif : Analyser et caractériser la trame transmise sur le bus I2C. Vérifier que les exigences sur la fréquence de mesure sont satisfaites.

Structure du bus I2C

La liaison capteur - modulateur de puissance est représentée sur la figure E1 et est réalisée par un bus I2C cadencé à 100 kHz. La liaison I2C est constituée des « lignes » SDA (Serial DATA – signal de données) et SCL (Serial CLOCK – signal d'horloge). Le modulateur de puissance étant le maître (Device 2), il génère donc le signal d'horloge. Pour la ligne SCL, l'étage de sortie du modulateur se résume à un transistor en commutation (noté T sur la figure), tandis que l'étage d'entrée du capteur (Device 1) est assimilable à un suiveur (impédance d'entrée infinie).

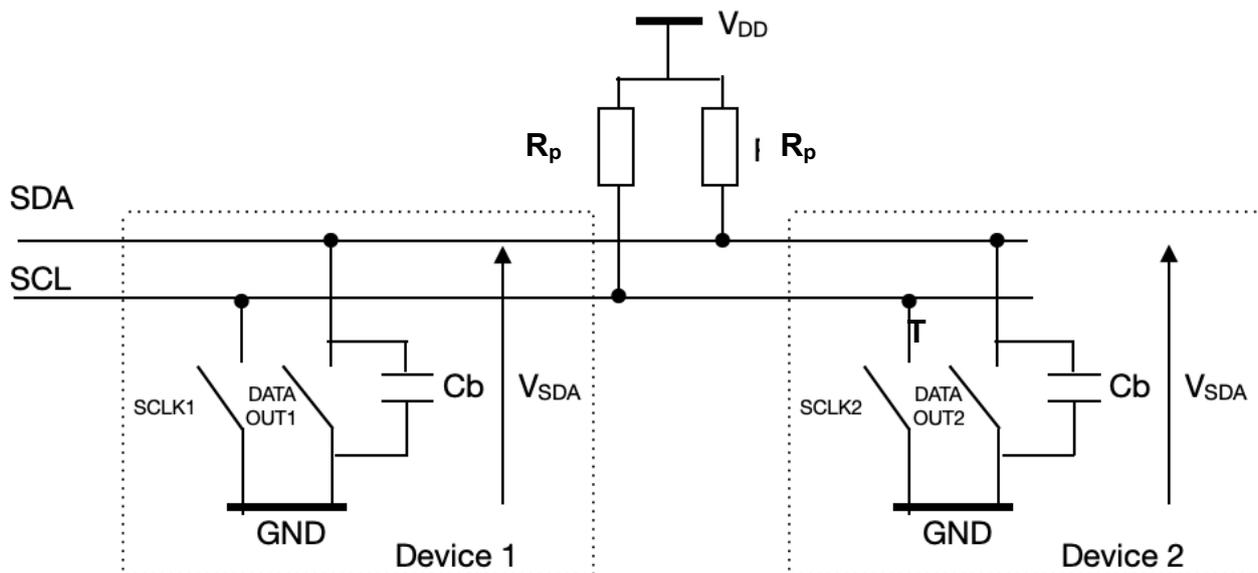


Figure E1 : Structure du bus I2C

Question E1

Pour ce protocole de communication préciser :

- le type de transmission : série ou parallèle ;
- la nature de la liaison : synchrone ou asynchrone ;
- le mode de transmission : simplex, half duplex ou full duplex.

Question E2

Déterminer la valeur de la tension de la ligne SCL notée V_{SCL} , lorsque le transistor T est idéalement passant, puis bloqué. En déduire le rôle de la résistance R_p .

Les changements d'état du bus I2C ne sont pas instantanés. En effet, la présence de condensateurs sur le bus I2C limite ces transitions. On considère le schéma figure E1. Initialement la tension V_{SDA} est nulle. On ouvre l'interrupteur T (transistor bloqué).

Question E3 | Montrer que l'évolution de V_{SDA} est donnée par l'expression suivante :

$$V_{SDA}(t) = V_{DD} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{2R_p C_b}}).$$

Deux domaines de tension de V_{SDA} sont définis pour l'interprétation des données sur le bus :

- Si $V_{SDA} \leq 0,3 \times V_{DD}$, le bus présente un état logique « 0 » ;
- Si $V_{SDA} \geq 0,7 \times V_{DD}$, le bus présente un état logique « 1 ».

On donne $R_p \cdot C_b = 12 \mu s$.

Question E4 | Déterminer le temps de changement de niveau : transition du niveau bas (état logique « 0 ») au niveau haut (état logique « 1 ») du signal SDA.

Question E5 | Indiquer comment évoluera cette durée si on branche un dispositif Device 3. Conclure sur la fréquence de travail du bus I2C.

Interprétation d'une trame

Le modulateur de puissance doit disposer des mesures de courant et de tension en moins de 5ms pour le bon fonctionnement du MPPT.

Les deux mesures, courant et tension, délivrées par le capteur mis en œuvre présentent respectivement les adresses hexadécimales 0x53 et 0x1D. Pour accéder à la mesure du courant, le modulateur de puissance envoie une seule demande contenant l'adresse de la mesure du courant du capteur ainsi que l'adresse du premier registre à lire (2 registres sont dédiés à la mesure du courant : 0x34 pour l'octet de poids faible et 0x35 pour l'octet de poids fort). Le principe pour la mesure de tension est identique.

En retour, le capteur envoie sur le bus I2C les octets des registres successifs de sa mémoire, en partant du premier registre demandé, et jusqu'à l'acquittement (Acknowledge) du modulateur de puissance.

En concaténant ces deux octets, on obtient un mot de 16 bits. Les dix bits de droite de ce mot correspondent à une mesure du courant, codée en binaire naturel. Quant aux 6 bits de gauche, ils sont fixés à l'état logique un.

Un enregistrement de plusieurs trames capturées sur le bus I2C est donné sur la figure E2.

La lecture des bits se fait à chaque front montant du signal d'horloge (SCL) sur le signal de données (SDA) : « 1 » à l'état haut et « 0 » à l'état bas. Le premier bit est lu en $t = 0$ et vaut « 0 ». La suite est partiellement complétée dans le tableau présenté sur le document réponse DRE1.

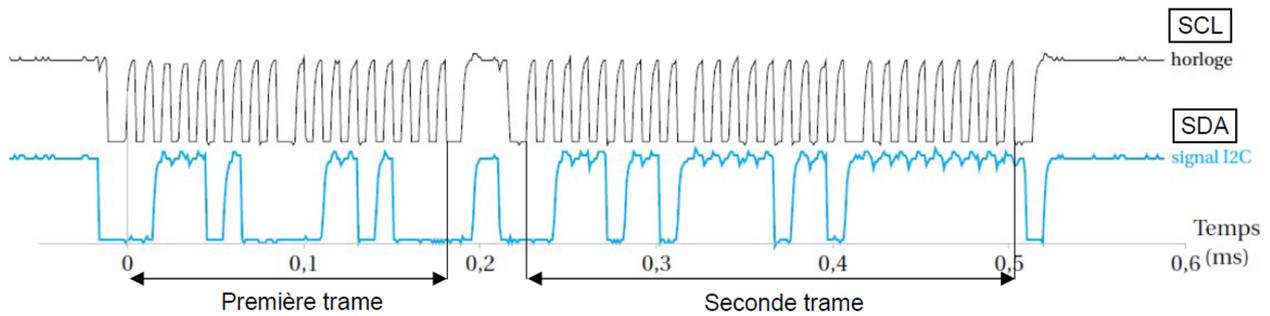


Figure E2 : Réponse du capteur à une demande du modulateur de puissance

Question E6 | Compléter le déchiffrement de la première trame (requête du modulateur de puissance) sur le document réponse DRE1. Identifier la mesure associée à cet échange (courant ou tension) lors de la première trame.

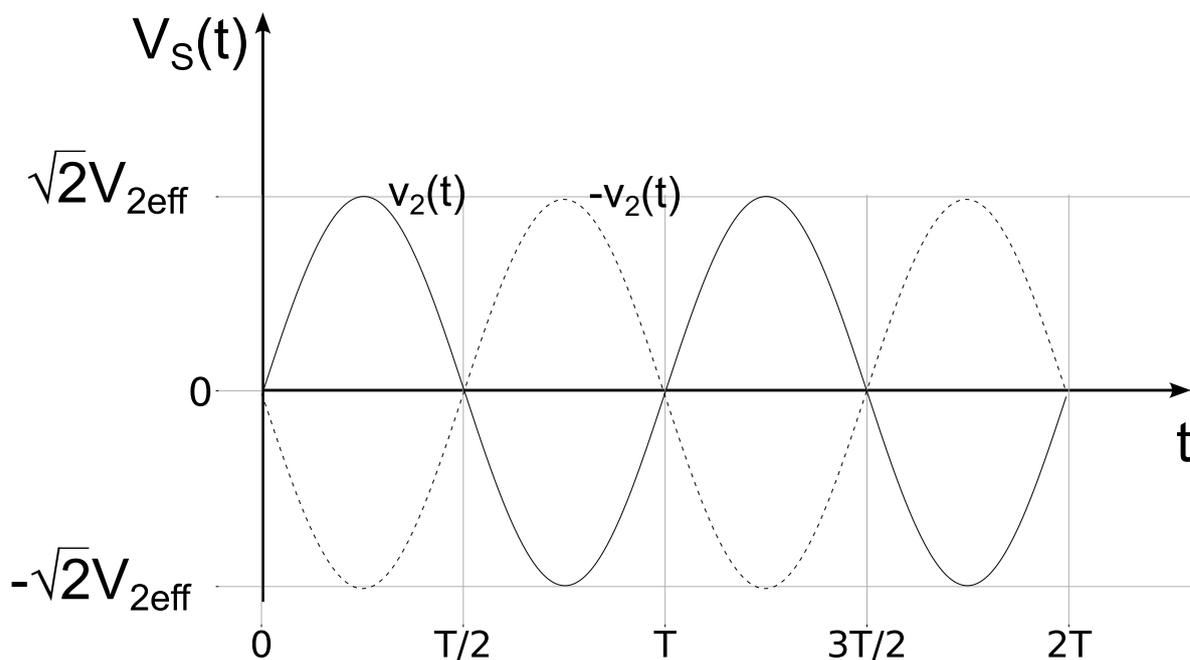
Question E7 | Déchiffrer la seconde trame (voir document réponse DRE1) renvoyée par le capteur à l'aide du tableau ci-dessous.

Le facteur d'échelle pour la mesure de courant est $S_I = 3,9 \text{ mA/LSB}$ (chaque variation d'une unité en décimal du mot binaire correspond à une mesure du courant de 3,9 mA).

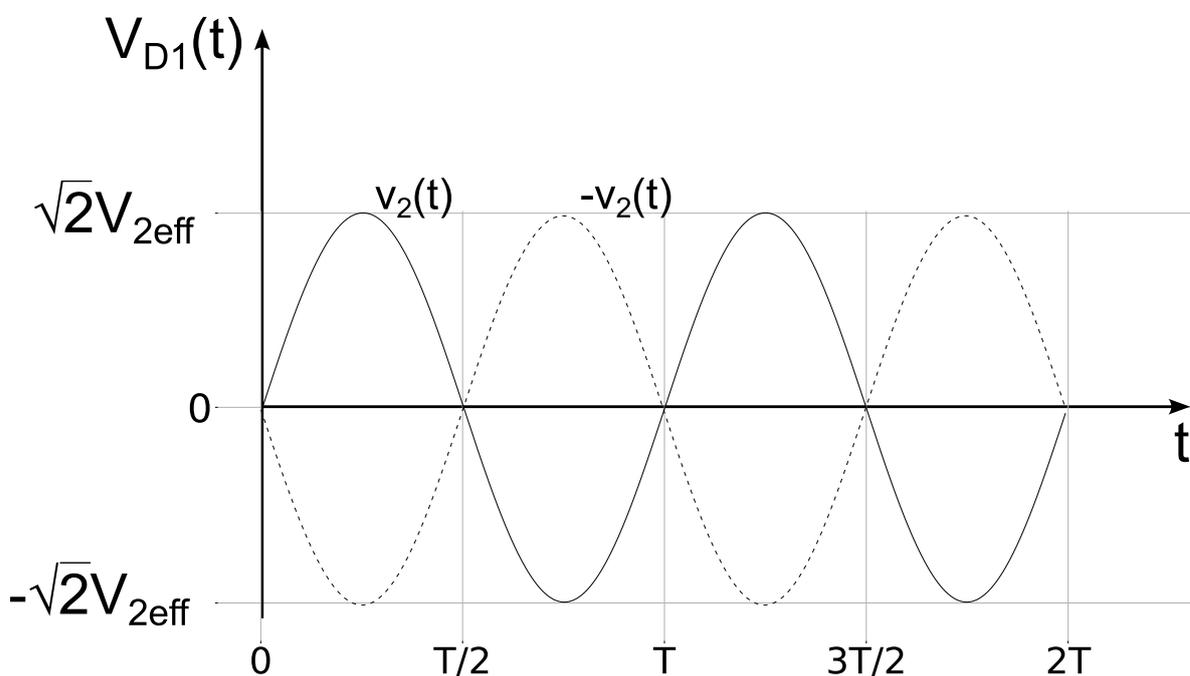
Question E8 | Déterminer en binaire le mot de 16 bits transmis. Sachant que les dix bits de droite de ce mot correspondent à une mesure du courant, codée en binaire naturel, déterminer la valeur décimale correspondante puis la valeur I du courant mesuré.

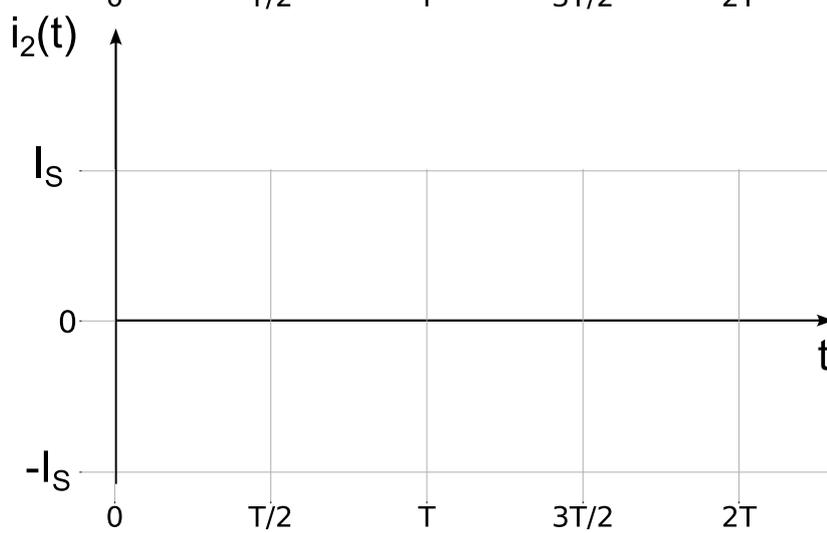
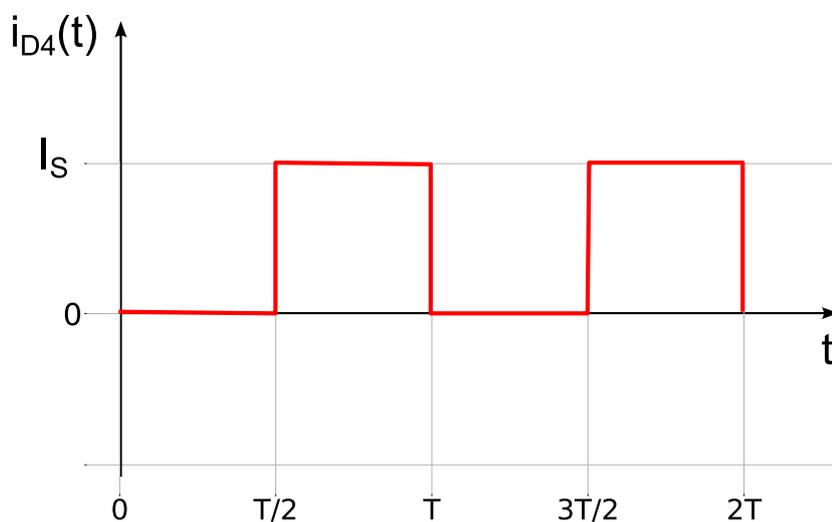
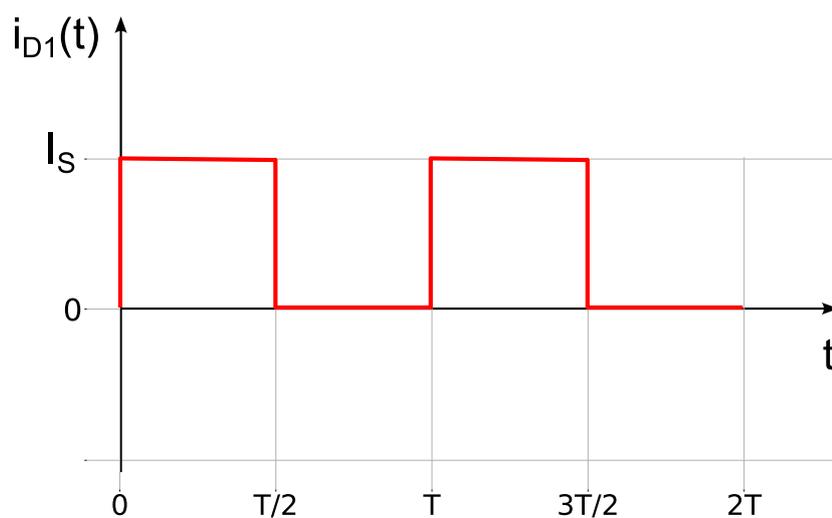
Question E9 | Déterminer la taille (en bits) d'une requête et d'une réponse lorsque modulateur de puissance interroge le capteur sur le bus I2C.

Question E10 | En déduire la durée nécessaire pour effectuer une mesure du courant et de la tension. Vérifier qu'elle est compatible avec les exigences sur la fréquence de mesure.

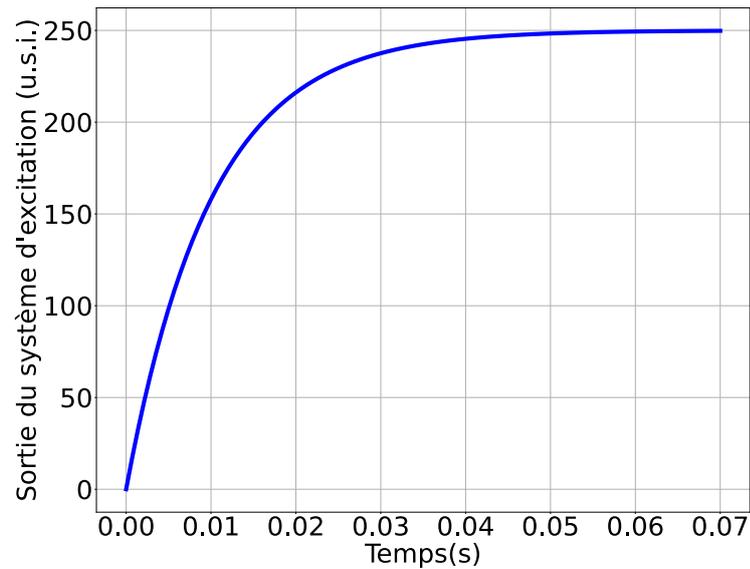


Diodes passantes				
Valeur de $v_s(t)$				

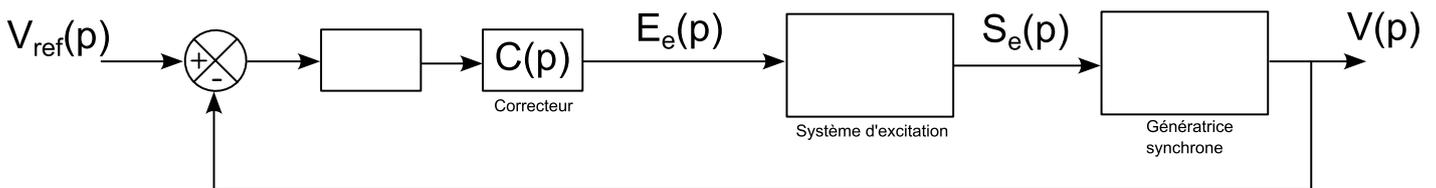




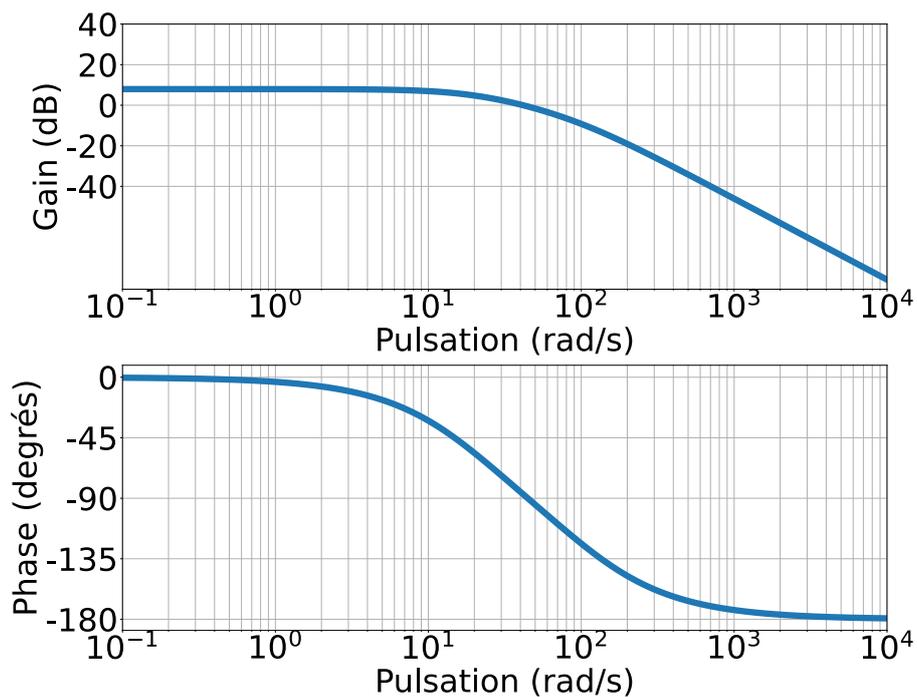
DOCUMENT RÉPONSE DRC1 (Question C3)



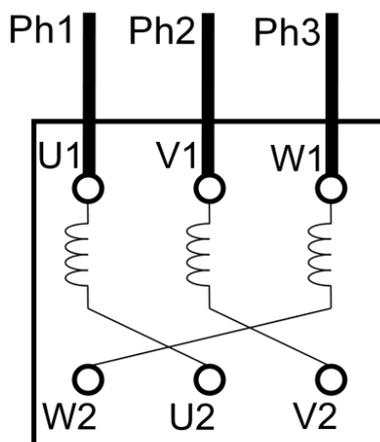
DOCUMENT RÉPONSE DRC2 (Question C4)



DOCUMENT RÉPONSE DRC3 (Questions C6-C8)



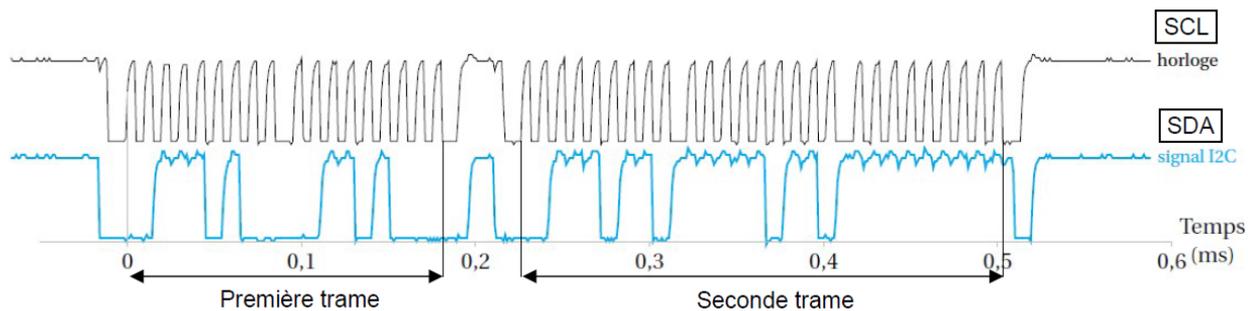
RÉPONSE DRD1 (Question D2)



RÉPONSE DRD2 (Question D6 - D7 - D8)



DOCUMENT RÉPONSE DRE1 (Questions E6 - E7)



Requête : le modulateur de puissance interroge le capteur

0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1						
Adresse							RW	ACK	Data							ACK	

Réponse : le capteur répond au modulateur de puissance

Adresse							RW	ACK	Data							ACK	Data			ACK

2) Attendus de l'épreuve (éléments de corrigé)

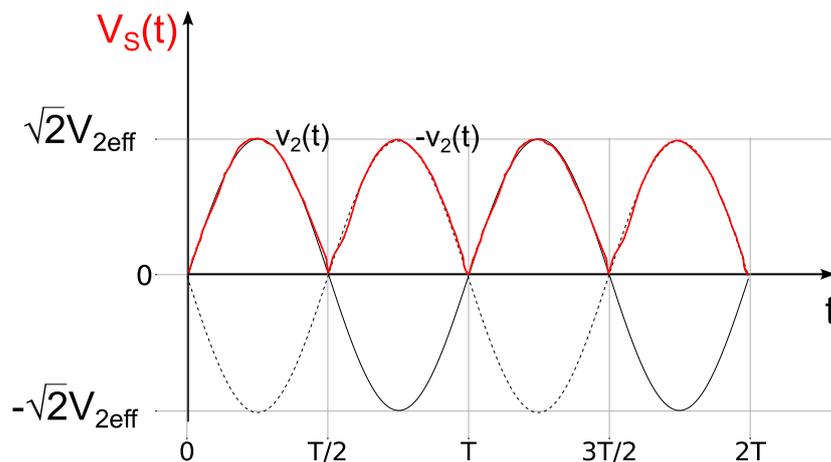
Conseils aux candidats

Il est demandé aux candidats :

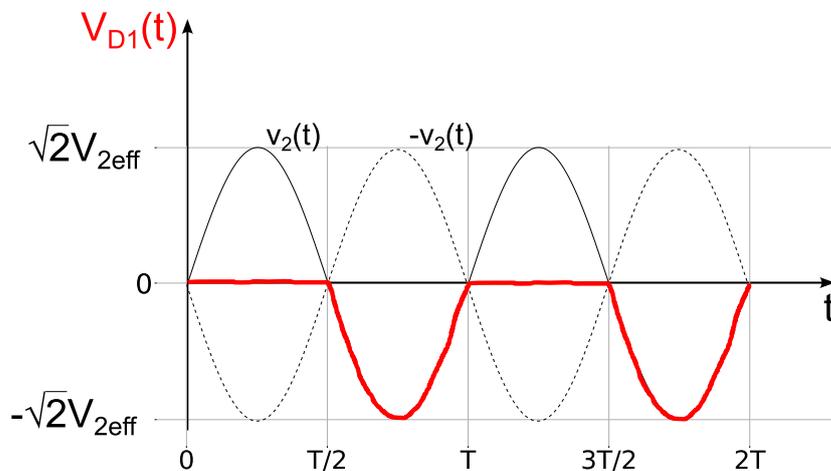
- de rédiger les réponses aux différents exercices sur des feuilles de copie séparées et clairement repérées ;
- de numéroter chaque feuille de copie et indiquer le numéro de la question traitée ;
- de rendre tous les documents réponses, même non complétés ;
- d'utiliser exclusivement les notations indiquées dans le sujet lors de la rédaction des réponses ;
- de justifier clairement les réponses ;
- d'encadrer ou souligner les résultats ;
- de présenter lisiblement les applications numériques, sans omettre les unités, après avoir explicité les expressions littérales des calculs ;
- de formuler les hypothèses nécessaires à la résolution des problèmes posés si celles-ci ne sont pas indiquées dans le sujet.

Partie A (à traiter obligatoirement)

Question A1



Diodes passantes	D_1, D_3	D_2, D_4	D_1, D_3	D_2, D_4
Valeur de $v_S(t)$	$v_2(t)$	$-v_2(t)$	$v_2(t)$	$-v_2(t)$



Question A2 | Lorsque la diode D_1 est passante, étant parfaite la tension à ses bornes est nulle : $\boxed{v_{D1}=0 \text{ V}}$.

Voir Question A1 pour le document réponse.

Question A3 | Voir Question A1

Question A4 | D'après le document réponse, la période de $v_S(t)$ est deux fois plus petite que celle de $v_2(t)$. On a donc :

$$\boxed{T_S = \frac{T}{2}}$$

On calcule ensuite :

$$\bar{v}_S = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} v_S(t) dt = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} v_S(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} v_2(t) dt$$

$$\bar{v}_S = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sqrt{2} V_{2\text{eff}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = \frac{2\sqrt{2} V_{2\text{eff}}}{T} \left[-\frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right]_0^{\frac{T}{2}}$$

$$\bar{v}_S = \frac{2\sqrt{2} V_{2\text{eff}}}{T} \left(\frac{T}{2\pi} - \left(-\frac{T}{2\pi}\right) \right)$$

$$\boxed{\bar{v}_S = \frac{2\sqrt{2} V_{2\text{eff}}}{\pi}}$$

Question A5 | On a directement :

$$\boxed{V_{2\text{eff}} = m V_{1\text{eff}}}$$

On reporte dans l'équation obtenue à la question précédente :

$$\bar{v}_S = \frac{2\sqrt{2} m V_{1\text{eff}}}{\pi} \Rightarrow \boxed{m = \frac{\bar{v}_S \pi}{2\sqrt{2} V_{1\text{eff}}}}$$

Applications numériques :

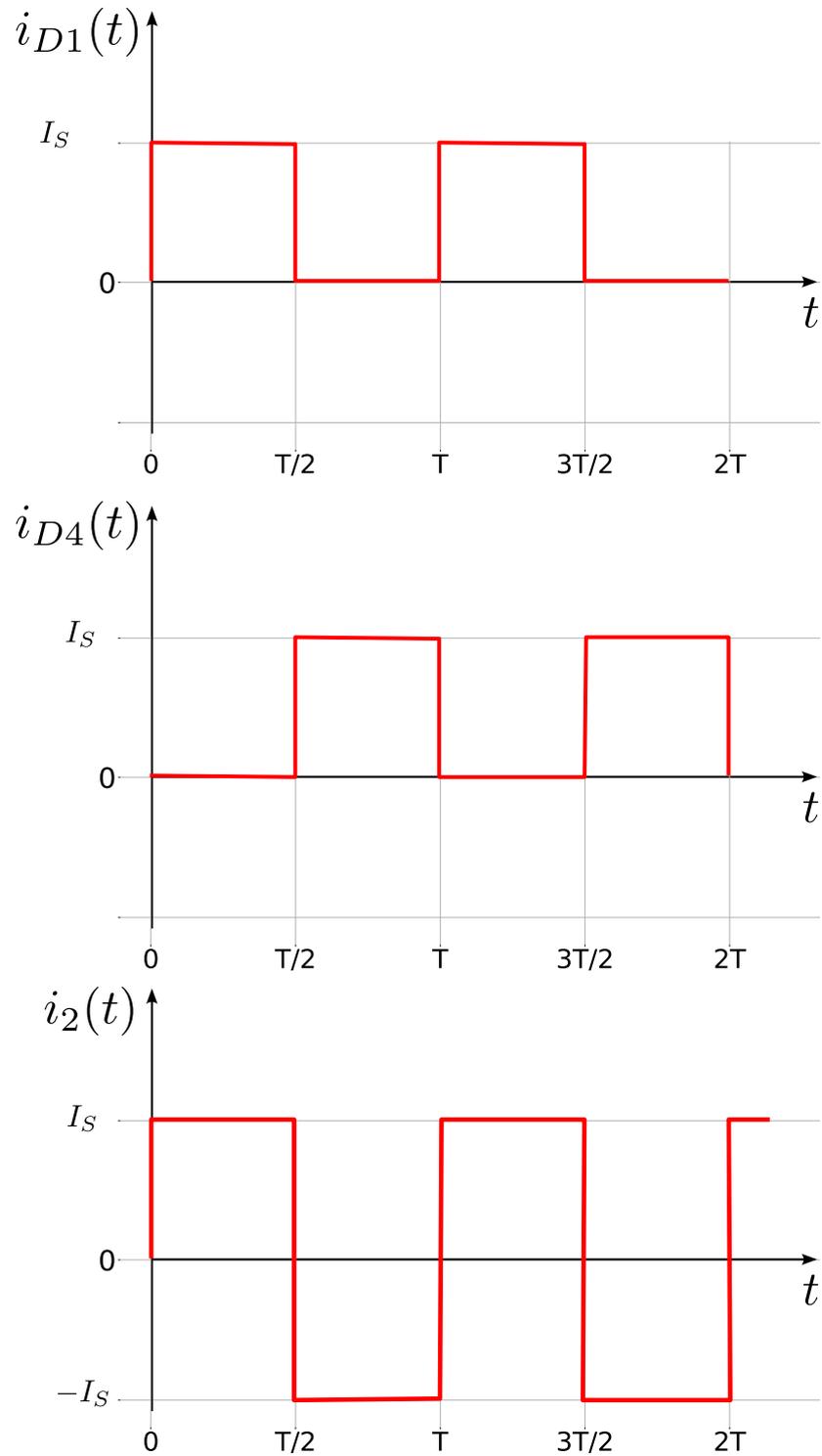
$$m = \frac{24 \cdot \pi}{2\sqrt{2} \cdot 230} = 0,116 \qquad V_{2\text{eff}} = 0,116 \cdot 230 = 26,7 \text{ V}$$

Question A6

En utilisant la loi des nœuds il vient :

$$i_2(t) = i_{D1}(t) - i_{D4}(t)$$

On complète alors le document réponse :



Question A7

On calcule :

$$I_{2\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_2^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{I_S^2}{T} \int_0^T dt}$$

$$I_{2\text{eff}} = I_S$$

Question A8

La puissance apparente s'exprime au secondaire :

$$S = I_{2\text{eff}} \cdot V_{2\text{eff}}$$

On calcule ensuite le facteur de puissance :

$$f_p = \frac{P}{S} = \frac{\overline{v_s} \cdot I_S}{I_{2\text{eff}} \cdot V_{2\text{eff}}} = \frac{\frac{2\sqrt{2}V_{2\text{eff}}}{\pi} \cdot I_S}{I_S \cdot V_{2\text{eff}}}$$

$$f_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9$$

Le cahier des charges imposant un facteur de puissance d'au moins 0,9 est bien satisfait.

Question A9

En utilisant la loi des mailles on obtient :

$$v_2(t) = v_{D1}(t) - v_{D2}(t)$$

Lorsque $v_{D2}(t)$ est nulle alors $v_{D1}(t) = v_2(t)$, sinon c'est $v_{D1}(t)$ qui est nulle.

Voir question A1 pour le document réponse.

Question A10

Le courant traversant D_1 est au maximum de I_S . Avec une sécurité de 20% on choisit donc un calibre :

$$I_{Z1} = 1,2 \cdot I_S = 1,2 \cdot 10 = 12 \text{ A}$$

De même la tension aux bornes de D_1 est en valeur absolue au maximum de $\sqrt{2}V_{2\text{eff}}$ donc en prenant un facteur de sécurité de 20% on choisit un calibre :

$$V_{Z1} = 1,2 \cdot \sqrt{2}V_{2\text{eff}} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 230 = 390 \text{ V}$$

Partie B (à traiter obligatoirement)

Question B1

On relève sur la courbe le gain entre l'irradiance et le courant :

$$I_{\text{cell}} = \frac{0,3}{1000} \times \text{Irrad.}$$

D'après la loi d'Ohm : $V_c = R_1 \times I_{\text{cell}} = 0,0003 \times \text{Irrad}$

Question B2

D'après la règle du pont diviseur : $V_- = \frac{R_2}{R_2+R_3} \cdot V_s$.

De plus l'ALI fonctionne en régime linéaire et est parfait :

$$V_- = V_+ = V_c. \text{ On en déduit : } A_v = \frac{V_s}{V_c} = \frac{R_2+R_3}{R_2}$$

Question B3

D'après les questions précédentes, on a :

$$V_s = \frac{R_2+R_3}{2} \cdot V_c = \frac{R_2+R_3}{R_2} \cdot 0,0003 \times \text{Irrad.}$$

$$\text{A.N. } V_{S\text{max}} = \frac{10+150}{10} \cdot 0,0003 \times 1000 = 4,8 \text{ V}$$

Question B4

Montrer que la fonction de transfert de ce filtre est donnée par

$$\text{l'expression suivante : } \underline{H(j\omega)} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{1+j\omega \cdot R_4 \cdot C}$$

$$\text{D'après la règle du pont diviseur : } \underline{V_+} = \frac{Z_C}{R_4+Z_C} \cdot \underline{V_{\text{in}}} = \frac{1}{R_4+\frac{1}{jC\omega}} \cdot \underline{V_{\text{in}}}$$

De plus l'ALI fonctionne en régime linéaire et est parfait :

$$\underline{V_-} = \underline{V_+} = \underline{V_{\text{out}}}. \text{ On en déduit : } \underline{H(j\omega)} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{1+j\omega \cdot R_4 \cdot C}$$

Question B5

Pour les basses fréquences : $\omega \rightarrow 0$, $j\omega \cdot R_4 \cdot C \rightarrow 0$ donc : $\underline{H(j\omega)} \rightarrow 1$.

Les signaux sinusoïdaux ne sont pas affectés par le filtre.

Pour les hautes fréquences : $\omega \rightarrow \infty$, $j\omega \cdot R_4 \cdot C \rightarrow \infty$ donc : $\underline{H(j\omega)} \rightarrow 0$.

Les signaux sinusoïdaux ne « passent pas », le filtre atténue les hautes fréquences.

Ce filtre est donc bien de type passe-bas. D'autre part, le polynôme en $j\omega$ est d'ordre 1 (un seul condensateur), ce qui correspond à de l'ordre 1.

Question B6

La fréquence de coupure f_c est donnée par (forme canonique d'ordre 1) :

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot R_4 \cdot C}$$

On en déduit la valeur de C :

$$C \approx \frac{1}{2\pi \cdot R_4 \cdot f_c} = 1,59 \mu F.$$

Question B7

D'après la question B3, la tension maximale que doit convertir le CAN est de 4,8V ce qui est juste inférieur à la tension de pleine échelle du CAN choisit. La valeur du gain en tension A_v semble tout à fait pertinente.

Question B8

Par définition le quantum q est donné par :

$$q = \frac{PE}{2^n} = \frac{5}{1024} \approx 4,88 mV.$$

Question B9

Pour un CAN, le mot de sortie en décimal peut être obtenu à partir de l'expression suivante :

$$N_{(10)} = \frac{V_{CAN}}{q}.$$

Ce qui donne dans notre cas en utilisant les résultats précédents :

$$N_{(10)} = \frac{\frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot 0,0003 \times Irrad}{q}.$$

Question B10

On cherche la variation d'irradiance lorsque le mot de sortie varie d'une valeur binaire, par exemple le passage de $N_{(10)} = 0$ à $N_{(10)} = 1$.

D'après la relation précédente : $N_{(10)} = \frac{\frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot 0,0003 \times Irrad}{q} = 1$, soit :

$$Irrad = \frac{q}{\frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot 0,0003}$$

A.N.

$$Irrad = \frac{q}{\frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot 0,0003} \approx 1,017 W/m^2$$

Cette valeur est inférieure à la résolution exigée de 1,5 W/m², le cahier des charges est bien respecté.

Partie C (à traiter obligatoirement)

Question C1

$$\varepsilon(p) = K_a \cdot V_{\text{ref}}(p) - K_{\text{cap}}(p) \cdot V(p)$$

Lorsque $V(p) = V_{\text{ref}}(p)$ alors on doit avoir :

$$\varepsilon(p) = (K_a - K_{\text{cap}}) \cdot V(p) = 0$$

Il faut donc nécessairement avoir : $K_a = K_{\text{cap}}$

Question C2

Par application de la transformée de Laplace il vient :

$$\tau_e \cdot p \cdot S_e(p) + S_e(p) = K_e \cdot E_e(p)$$

$$\tau_g \cdot p \cdot V(p) + V(p) = K_g \cdot S_e(p)$$

On en déduit les fonctions de transfert :

$$\frac{S_e(p)}{E_e(p)} = \frac{K_e}{1 + \tau_e \cdot p}$$

$$\frac{V(p)}{S_e(p)} = \frac{K_g}{1 + \tau_g \cdot p}$$

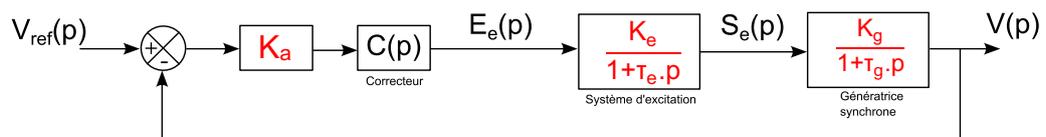
Question C3

À partir du document réponse DRC1, on détermine graphiquement :

$$K_e = 25$$

$$\tau_e = 0,01 \text{ s}$$

Question C4



Question C5

La fonction de transfert en boucle ouverte s'exprime :

$$H_{\text{BO}}(p) = K_{\text{cap}} \cdot K_p \cdot \frac{K_e}{1 + \tau_e \cdot p} \cdot \frac{K_g}{1 + \tau_g \cdot p}$$

Question C6

La marge de gain est infinie.
La marge de phase prise à la pulsation de 40 rad/s environ est de 90°.
Les marges sont positives, le système est stable.

Question C7

Avec le système à retour unitaire, la fonction de transfert en boucle

fermée s'exprime :

$$H_{BF}(p) = \frac{H_{BO}(p)}{1+H_{BO}(p)} = \frac{\frac{K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g}{(1+T_e \cdot p) \cdot (1+T_g \cdot p)}}{1 + \frac{K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g}{(1+T_e \cdot p) \cdot (1+T_g \cdot p)}}$$

$$H_{BF}(p) = \frac{K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g}{K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g + (1+T_e \cdot p) \cdot (1+T_g \cdot p)}$$

$$H_{BF}(p) = \frac{\frac{K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g}{1+K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g}}{1 + \frac{T_e + T_g}{1+K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g} p + \frac{T_e \cdot T_g}{1+K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g} p^2}$$

$$H_{BF}(p) = \frac{\frac{K}{1+K}}{1 + \frac{T_e + T_g}{1+K} p + \frac{T_e \cdot T_g}{1+K} p^2}$$

Avec $K = K_{cap} \cdot K_P \cdot K_e \cdot K_g$

Question C8

À l'aide du document réponse, on estime que l'on peut ajouter un gain de 10 dB environ.

Cela correspond à un gain $K_{P_{max}} = 10^{10/20} \approx 3,16$

Question C9

$$\varepsilon_S = \lim_{t \rightarrow +\infty} \varepsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \varepsilon(p) = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot (1 - H_{BF}(p)) \cdot V_{ref}(p)$$

$$\varepsilon_S = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \left(1 - \frac{\frac{K}{1+K}}{1 + \frac{T_e + T_g}{1+K} p + \frac{T_e \cdot T_g}{1+K} p^2} \right) \cdot \frac{V_{ref}}{p}$$

$$\varepsilon_S = \left(1 - \frac{K}{1+K} \right) \cdot V_{ref} = \frac{V_{ref}}{1+K}$$

On veut numériquement : $4 \cdot (1+K) = 4 + K_P = 230$

$$K_{P_{min}} = 226$$

Question C10

Pour respecter le critère de marge de phase on peut ajouter au maximum un gain de 3,16 alors qu'il faut 226 pour respecter le critère de précision. Ces deux valeurs sont incompatibles. On choisit le correcteur C2.

Partie D (choix 1)

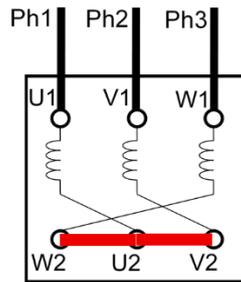
Question D1

Pour une machine synchrone on a : $N_s = \frac{60 \cdot f}{p} = 3000 \text{ tr/mn}$.

On en déduit donc le nombre de paire de pôles : $p = \frac{60 \cdot f}{N_s} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1$, soit deux pôles pour cette machine synchrone.

Question D2

Compléter le câblage du moteur représenté sur le document DRD1 afin de réaliser le couplage choisi par le constructeur.



Question D3

Pour le point de fonctionnement nominal, la valeur de la puissance apparente nous permet de déterminer I (pas forcément indispensable):

$$S = 3 \cdot V \cdot I, \text{ soit } I = \frac{S}{3 \cdot V} = \frac{63000}{3 \cdot 230} = 91,3 \text{ A}$$

On en déduit la puissance utile (électrique) :

$$P_U = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi) = S \cdot \cos(\varphi) = 50,4 \text{ kW}$$

Puis la puissance absorbée (mécanique) à partir des pertes :

$$P_a = P_U + P_J + P_{fm} = 50,4 \text{ kW} + 3 \cdot R \cdot I^2 + 3200 \text{ W} = 54,85 \text{ kW}$$

On en déduit enfin le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{50,4}{54,85} = 0,9189 \text{ soit environ } 92\% \text{ conforme à la figure D1}$$

Question D4

E représente la valeur efficace de la fem induite par le champ magnétique rotorique ;

R représente la résistance d'un enroulement statorique ;

X , la réactance synchrone, représente les pertes de flux magnétique ainsi que la réaction magnétique d'induit.

Question D5

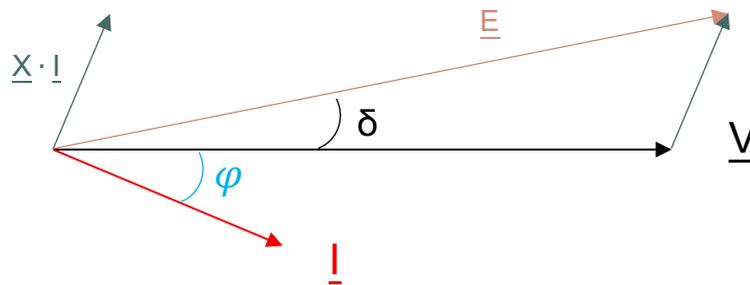
D'après la loi des mailles :

$$\underline{V} = \underline{E} - \underline{X} \cdot \underline{I} - \underline{R} \cdot \underline{I}$$

Question D6

Charge inductive car φ est positif (le courant est en retard par rapport à la tension).

Question D7 | Pour le point de fonctionnement nominal, compléter sur le document réponse DRD2, le diagramme vectoriel des différentes grandeurs mises en jeux.



Question D8 | En projetant \underline{E} et $\underline{X \cdot I}$ sur l'axe des origines on obtient la relation suivante : $E \cdot \cos(\delta) = V + X \cdot I \cdot \sin(\varphi)$

Pour un angle faible (proche de 0) on a $\cos(\delta) \approx 1$ d'où l'expression finale suivante : $V = E - X \cdot I \cdot \sin(\varphi)$

Question D9 | Pour le point de fonctionnement nominal on a :

$$E = K \cdot \Omega = 1,1 \times 3000 \times \frac{2\pi}{60} = 345,6V.$$

On en déduit X à partir de la relation précédente :

$$X = \frac{E - V}{I \cdot \sin(\varphi)} = \frac{345,6 - 230}{91,3 \cdot \sin(\arccos(0,8))} = 2,11 \Omega. \text{ Soit } L = \frac{X}{2\pi f} = 6,7mH$$

Question D10 | On constate que $X = 2,11 \Omega \gg R = 0,05 \Omega$, ce qui justifie l'hypothèse de négliger R .

Partie E (choix 2)

Question E1

Pour ce protocole de communication :

- le type de transmission : série ;
- la nature de la liaison : synchrone ;
- le mode de transmission : half duplex.

Question E2

T passant : $V_{SCL} = 0$ (GND) ;

T bloqué : $V_{SCL} = V_{DD} - R_p \cdot I$, soit un niveau de tension proche de V_{DD} ;

Les résistances R_p sont des résistances de tirages qui permettent d'imposer un potentiel lorsque le transistor est ouvert et éviter de disposer d'un potentiel flottant sur la ligne.

Question E3

D'après la loi des mailles on a : $V_{DD} = V_{SDA}(t) + R_p \cdot i(t)$

De plus $i(t) = 2C_b \frac{dV_{SDA}(t)}{dt}$ (2 condensateurs en parallèles)

On en déduit : $V_{DD} = V_{SDA}(t) + R_p \cdot 2C_b \frac{dV_{SDA}(t)}{dt}$.

Cette équation différentielle d'ordre 1 peut être résolue avec la connaissance de la condition initiale : $V_{SDA}(0) = 0$:

$$V_{SDA}(t) = V_{DD} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{2R_p C_b}}\right).$$

Question E4

Soit t_1 tel que $V_{SDA}(t_1) = 0,3 \times V_{DD}$ d'après la question précédente :

$$V_{SDA}(t_1) = V_{DD} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{2R_p C_b}}\right) = 0,3 \times V_{DD} \text{ d'où}$$

$$\left(1 - e^{-\frac{t_1}{2R_p C_b}}\right) = 0,3 \text{ donc } t_1 = -2R_p \cdot C_b \cdot \ln(0,7) = 8,56 \text{ ns.}$$

Soit t_2 tel que $V_{SDA}(t_2) = 0,7 \times V_{DD}$ de la même façon on obtient :

$$t_2 = -2R_p \cdot C_b \cdot \ln(0,3) = 28,9 \text{ ns}$$

On en déduit le temps de montée : $t_2 - t_1 = 20,34 \text{ ns}$

Question E5

Si l'on connecte un troisième device, il y aura 3 condensateurs en parallèle ce qui augmentera la constante de temps et donc augmentera le temps de montée.

Le nombre de device connecté sur le bus est limité.

Pour une fréquence de travail de 100 kHz le temps de montée doit être inférieur à $\frac{1}{2 \cdot 100000} = 5 \mu\text{s}$ ce qui laisse de la marge pour ajouter d'autres devices (128 sur ce type de bus).

Question E6

On relève pour l'adresse : 001101 soit 29 en décimal et 1D en hexadécimal. Cette mesure concerne donc le courant.

0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
Adresse							RW	ACK	Data							ACK	

Question E7 | Déchiffrer la seconde trame (voir document réponse DRE1) renvoyée par le capteur à l'aide du tableau ci-dessous.

0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Adresse							RW	ACK	Data							ACK	Data							ACK				

Question E8 | Les données en binaire naturel renvoyées par le capteur sont donc (premier registre en premier qui correspond au poids faible) : 11111111 11111011 soit 11 11111011 en enlevant les 6 bits de gauche.

Cela correspond à 1019 en décimal.

En utilisant le facteur d'échelle on obtient une valeur de courant mesuré de 3,9741 A.

Question E9 | Chaque demande et réponse de lecture soit du courant ou de la tension nécessite en bits : 8+1+1+8+1 (requête) et 8+1+1+8+1+8+1 (réponse) donc 47 bits.

Au final il faut 94 bits pour obtenir la lecture de la tension et du courant mesuré.

Question E10 | La durée de la mesure du courant et de la tension est donnée par : $94 \text{ bits} \times \text{période d'horloge}$ soit $\frac{94}{100000} = 940 \mu\text{s}$.

Cette durée est bien inférieure à la fréquence de mesure de 5ms.

3) Extrait de l'arrêté du 17 avril 2025

Extrait de l'annexe de l'arrêté du 17 avril 2025 fixant les modalités d'organisation du concours externe du certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement du second degré, publié au Journal Officiel du 19 avril 2025

A. - Epreuves d'admissibilité

1° Première épreuve d'admissibilité.

L'épreuve consiste en l'étude de la modélisation d'un produit.

Elle a pour objectif de vérifier la capacité du candidat à conduire une étude d'un produit pour en caractériser les performances en mobilisant ses connaissances scientifiques et technologiques relevant de l'option du concours.

L'épreuve est constituée de plusieurs parties indépendantes, certaines d'entre elles sont à traiter obligatoirement et d'autres sont au choix du candidat.

Durée : quatre heures.

Coefficient 3.

L'épreuve est notée sur 20. Une note globale égale ou inférieure à 5 est éliminatoire ;