

SESSION 2026

**CAPET**  
**CONCOURS EXTERNE ET CAFEP CORRESPONDANT**  
**ET TROISIEME CONCOURS**

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

**Option : INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE**

**ÉPREUVE ÉCRITE DISCIPLINAIRE**

L'épreuve, spécifique à l'option choisie, porte sur l'étude d'un système, d'un procédé ou d'une organisation. Elle a pour but de vérifier que le candidat est capable, à partir de l'exploitation d'un dossier technique remis par le jury, de conduire une analyse critique de solutions technologiques et de mobiliser ses connaissances scientifiques et technologiques pour élaborer et exploiter les modèles de comportement permettant de quantifier les performances d'un système ou d'un processus lié à la spécialité et définir des solutions technologiques

Durée : 5 heures

*Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.**

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Troisième concours externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E D V	1 4 1 2 E	1 0 1	9 3 1 1

► **Troisième concours externe du CAPET de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E D W	1 4 1 2 E	1 0 1	9 3 1 1

## **Conseils aux candidats**

Il est demandé aux candidats :

- de rédiger les réponses aux différentes parties 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.

## **Organisation du sujet**

Ce sujet se décompose de la façon suivante :

- Énoncé, pages 2 à 20 ;
- Documents techniques DT, pages 21 à 22 ;
- Documents réponses DR (à rendre avec la copie), pages 23 à 28.

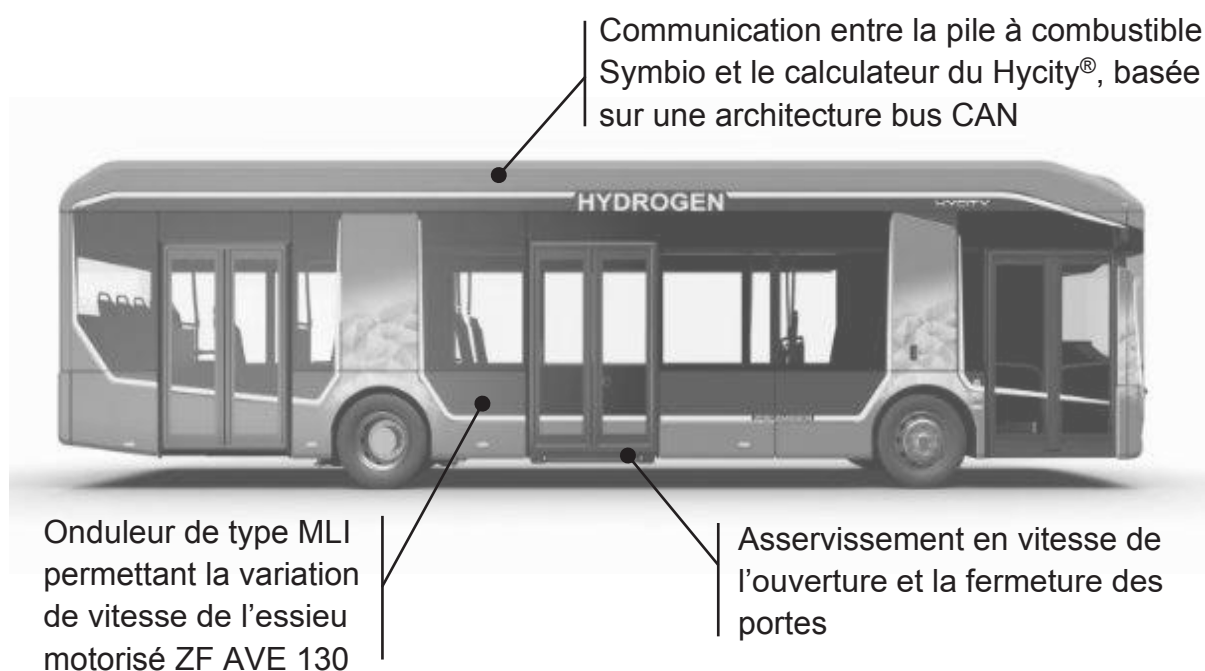


## Présentation du support

### BUS HYDROGÈNE HYCITY®

Hycity® est le dernier né des autobus hydrogène fabriqués par la société Safra. Cet autobus offre aux autorités organisatrices de mobilité une alternative écologique pour évoluer au-delà des énergies fossiles. Hycity® ne produit pas de CO<sub>2</sub> ni de particules fines au roulage, et ne rejette que de l'eau.

Grâce à la technologie hydrogène, ces véhicules contribuent à la neutralité carbone et répondent donc parfaitement à la réglementation française et européenne sur les véhicules propres.



#### Présentation du bus Hycity®

Les parties proposées sont toutes indépendantes et exploitent une partie des constituants du bus Hycity®.

Les parties A, B et C proposent des problématiques autour de l'ouverture et la fermeture des portes du bus.

La partie D s'intéresse au système de transmission entre le calculateur et les différents constituants tels que la pile à combustible.

La partie E a pour objet la recharge de la batterie de secours à partir du réseau via un redresseur triphasé.

## Partie A

### Évaluer les performances d'un actionneur électrique

L'ouverture et la fermeture des portes du bus est assurée par un actionneur à courant continu à excitation constante. Les principales notations utilisées dans cette étude sont données ci-dessous.

Symbole	Grandeur	Unité
$u(t)$	Tension aux bornes de l'induit de l'actionneur	V
$N(t)$	Vitesse de rotation de l'actionneur	tr·min <sup>-1</sup>
$i(t)$	Courant absorbé par l'induit de l'actionneur	A
$\Omega(t)$	Vitesse de rotation de l'actionneur	rad·s <sup>-1</sup>
L	Inductance de l'induit de l'actionneur	mH
R	Résistance de l'induit de l'actionneur	W
$e(t)$	Force contre électromotrice de l'actionneur : $e(t) = K_e \cdot \Omega(t)$	V
$K_e$	Constante de force contre électromotrice	V·s·rad <sup>-1</sup>
$K_c$	Constante de couple ( $K_c = K_e$ )	Nm·A <sup>-1</sup>
$C_P$	Couple de pertes	N·m
$C_U$	Couple utile	N·m
$C_R$	Couple résistant	N·m
$\eta$	Rendement de l'actionneur hors excitation	

**Objectif :** Vérifier que l'actionneur électrique permet d'assurer toutes les phases de fonctionnement de la porte du bus.

#### Détermination des paramètres du modèle de l'actionneur

Le schéma de l'induit de l'actionneur électrique est donné figure A1.

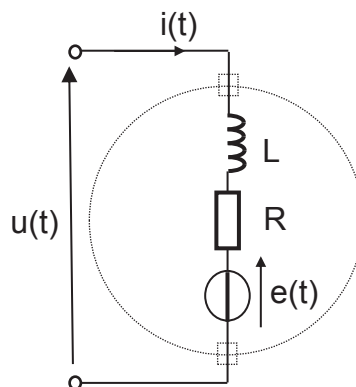


Figure A1 – Schéma électrique de l'induit de la machine à courant continu

**Question A1** | Donner l'équation électrique permettant d'exprimer  $u(t)$  en fonction de  $R$ ,  $L$ ,  $e(t)$  et de  $i(t)$ . Préciser ce que devient cette équation en régime permanent (grandeurs continues).

Un extrait de la documentation constructeur de l'actionneur est donné dans le document technique DTA1.

**Question A2** | À partir des données du document technique DTA1, calculer pour le point de fonctionnement nominal :

- la valeur du courant absorbée par l'induit de l'actionneur, notée  $I_n$  ;
- la vitesse nominale de rotation du moteur exprimée en  $\text{rd}\cdot\text{s}^{-1}$ , notée  $\Omega_n$ .

Lors d'un essai à rotor bloqué sous tension réduite  $U = 3,3 \text{ V}$ , l'évolution du courant absorbé par le moteur  $i(t)$  est régie par une équation différentielle d'ordre 1 à coefficients constants dont la constante de temps est  $\tau = \frac{L}{R}$ . Cette évolution est représentée figure A2.

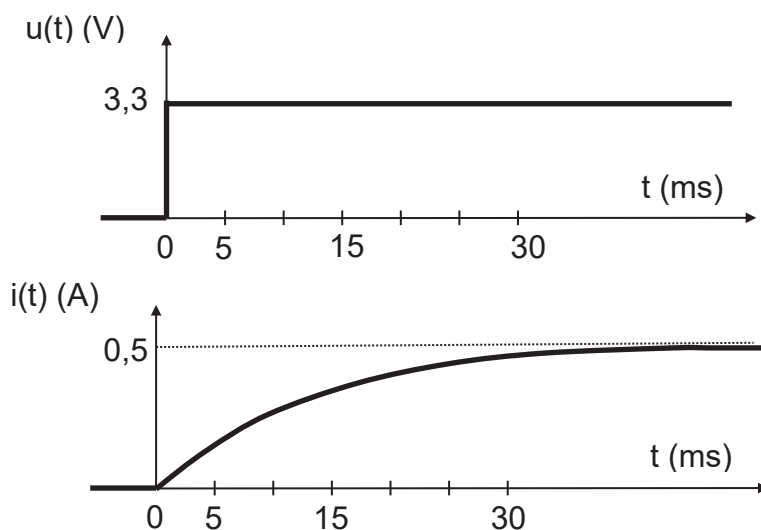


Figure A2 – Évolutions de  $u(t)$  et  $i(t)$  lors d'un essai à rotor bloqué

**Question A3** | Simplifier l'équation obtenue question A1 dans le cadre de l'essai à rotor bloqué lorsque le régime permanent est atteint. En déduire la valeur de  $R$ . Déterminer la valeur du courant absorbé par l'actionneur en régime permanent si cet essai avait été fait sous tension nominale. Justifier alors le choix d'effectuer cet essai sous tension réduite.

**Question A4** | En exploitant la figure A2, déterminer la valeur de l'inductance  $L$ .

Indépendamment des résultats obtenus, pour la suite de l'étude les valeurs numériques suivantes seront retenues :

$$R = 6,6 \Omega ; L = 100 \text{ mH}.$$

**Question A5** | En utilisant le fonctionnement en régime nominal permanent déterminer la valeur de la constante  $K_e$ .

Lors d'un essai à vide, la tension d'alimentation est de  $200 \text{ V}$  et le courant absorbé par l'induit de l'actionneur de  $0,05 \text{ A}$  en régime permanent.

**Tournez la page S.V.P.**

**Question A6** | Déterminer l'expression, puis la valeur numérique de  $C_p$  qui représente le couple de pertes. Cette valeur sera supposée constante par la suite.

### Détermination des points de fonctionnement

La figure A3 représente les différentes puissances mises en jeu dans l'induit de l'actionneur électrique.

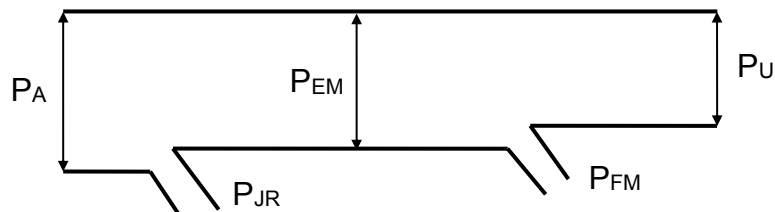


Figure A3 – Schéma d'écoulement des puissances de l'actionneur

Indépendamment des résultats obtenus, pour la suite de l'étude les valeurs numériques suivantes seront retenues :

$$K_e = 1,044 \text{ V}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}; K_c = 1,044 \text{ Nm}\cdot\text{A}^{-1} \text{ et } C_p = 0,052 \text{ Nm}.$$

**Question A7** | En régime nominal, déterminer successivement les expressions puis les valeurs numériques de la puissance active  $P_A$ , des pertes Joule  $P_{JR}$ , de la puissance électro-magnétique  $P_{EM}$ , des pertes fer  $P_{FM}$ , de la puissance utile  $P_U$  et du rendement du moteur  $\eta$ .

**Question A8** | Établir les équations numériques  $C_U = f(N)$  pour  $U = 200 \text{ V}$  et  $U = 150 \text{ V}$ .

Le document réponse DRA1 présente l'évolution de la caractéristique mécanique de l'actionneur  $C_U = f(N)$  pour  $U = 200 \text{ V}$ .

**Question A9** | Tracer l'évolution du couple utile  $C_U$  en fonction de la vitesse de rotation  $N$  sur le document réponse DRA1 pour  $U = 150 \text{ V}$ .

La charge que doit entraîner l'actionneur électrique impose un couple résistant constant quel que soit la vitesse tel que  $C_R = 0,4 \text{ Nm}$ .

**Question A10** | Tracer l'évolution du couple résistant  $C_R$  en fonction de  $N$  sur le document réponse DRA1. Identifier les points de fonctionnement du moteur (couple utile et fréquence de rotation) pour les deux valeurs de tension de commande  $U$  considérées (200 V et 150 V).

L'actionneur électrique doit être capable d'entraîner la charge suivant deux sens de rotation (fonctionnement moteur uniquement). Le document réponse DRA2 présente le plan couple-vitesse de l'actionneur.

**Question A11** | Identifier les grandeurs électriques de commande ( $U$  et  $I$ ) que l'on peut associer aux grandeurs mécaniques ( $C$  et  $\Omega$ ) dans une machine à courant continu puis compléter le document réponse DRA2 en hachurant les quadrants de fonctionnement correspondant aux besoins. Conclure en proposant une structure de variateur de vitesse permettant de répondre aux besoins.

## Partie B

### Qualifier la qualité d'une opération de filtrage

La chaîne de mesure du sous-système permettant d'acquérir la position angulaire de la porte du bus est constituée d'un capteur potentiométrique, d'un conditionneur, d'un amplificateur, d'un filtre et d'un convertisseur analogique numérique comme représenté sur la figure B1.

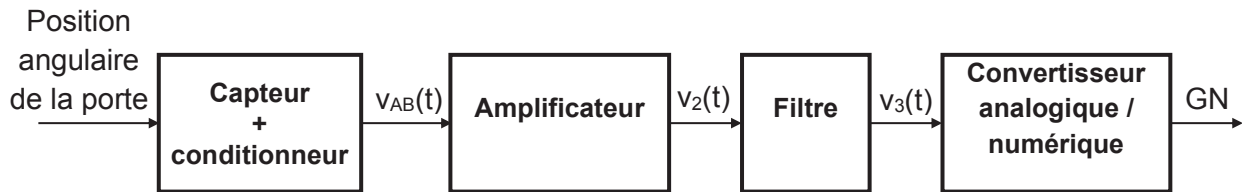


Figure B1 – Chaîne d'acquisition de la mesure de position angulaire

**Objectif :** Valider les performances de la structure de filtrage du signal de mesure de la position angulaire de la porte du bus.

#### Évaluation des besoins du filtre

La mesure du signal fourni par l'ensemble {capteur + conditionneur + amplificateur} permet de mettre en évidence la présence d'un signal perturbateur non désiré (présence des actionneurs électriques près du capteur). La figure B2 donne le spectre du signal  $v_2$ , sachant que  $v_2(t) = V_0 + A \cdot \sin(\omega_2 t)$ .

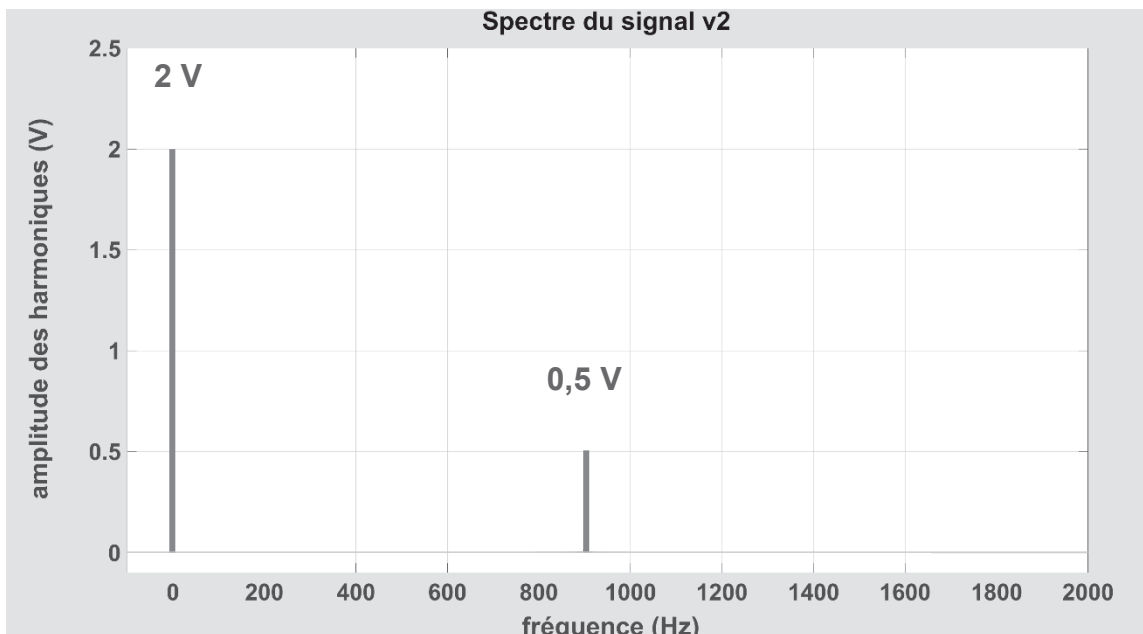


Figure B2 – Spectre du signal  $v_2(t)$

#### Question B1

En exploitant la figure B2, déterminer les valeurs numériques de  $V_0$ ,  $A$  et  $\omega_2$ . Identifier ensuite dans le signal  $v_2(t)$  le signal informatif (proportionnel à la mesure de position angulaire) et le signal perturbateur.

Tournez la page S.V.P.

Le filtre à mettre en place est caractérisé par sa fonction de transfert :  $H_{Fi}(j\omega) = \frac{V_3(j\omega)}{V_2(j\omega)}$  et doit respecter le cahier des charges résumé par le tableau ci-dessous et le gabarit présenté sur le document réponse DRB1.

Facteur d'atténuation du signal perturbateur	> 100
Temps de réponse à 5 %	< 50 ms

**Question B2** | Déterminer la valeur du gain en dB du filtre pour la pulsation  $\omega_2$  afin de respecter la première exigence du cahier des charges. Placer ce point nommé  $P_1$  (pulsation et gain) sur le document réponse DRB1. En déduire l'ordre et le type du filtre à mettre en place pour respecter le cahier des charges.

### Première proposition de filtre

Le constructeur a choisi un filtre passif dont la structure est présentée à la figure B3.

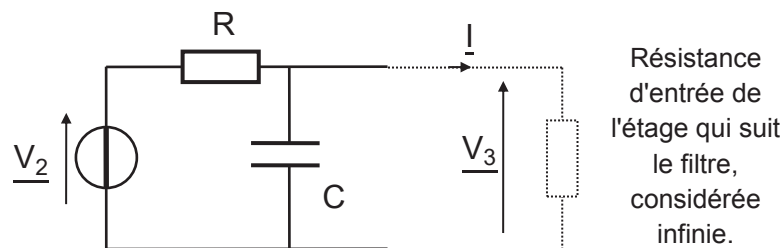


Figure B3 – Schéma électrique du premier filtre retenu

Indépendamment des résultats obtenus, pour la suite de l'étude les valeurs numériques suivantes seront retenues :

$$R = 1\text{k}\Omega \quad , \quad C = 1,8 \mu\text{F} \quad \text{et} \quad |I| = 0 \text{ A.}$$

**Question B3** | Montrer que la fonction de transfert complexe du premier filtre peut s'écrire  $H_{F1}(j\omega) = \frac{1}{1+j\frac{\omega}{\omega_0}}$ . Exprimer  $\omega_0$  en fonction de R et C.

**Question B4** | Sur le document réponse DRB2, tracer le diagramme de Bode asymptotique (courbes de gain et de phase) du filtre étudié puis esquisser le tracé réel.

Le signal  $v_2(t)$  est appliqué à l'entrée du filtre et a pour expression :

$$v_2(t) = v_{21}(t) + v_{22}(t) = 2 + 0,5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 900 \cdot t)$$

**Question B5** | Déterminer à partir du diagramme de Bode les gains G en dB, les modules H et les phases  $\varphi$  associés aux pulsations des signaux  $v_{21}(t)$  et  $v_{22}(t)$ . Compléter le tableau du document réponse DRB3.

**Question B6** | Déterminer l'expression du signal  $v_3(t)$  en sortie du filtre ainsi qu'une estimation du temps de réponse à 5 % du filtre. Conclure alors sur la capacité du filtre à valider le cahier des charges.

### Seconde proposition de filtre

Afin de répondre pleinement aux exigences du cahier des charges la structure du filtre retenue est constituée de deux filtres mis en cascade comme présenté sur la figure B4.

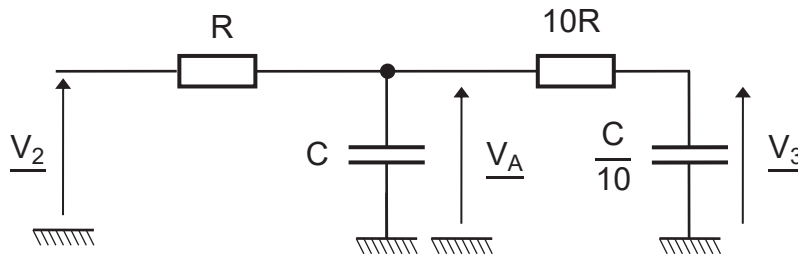


Figure B4 – Schéma électrique du second filtre retenu

**Question B7** | Exprimer  $V_3$  en fonction de  $V_A$ ,  $R$  et  $C$  puis montrer que  $V_A$  peut s'exprimer sous la forme :  $V_A(j\omega) = \frac{10 \cdot V_2(j\omega) + V_3(j\omega)}{11 + 10 \cdot R \cdot C \cdot j\omega}$ .

**Question B8** | À partir des résultats de la question précédente, exprimer la fonction de transfert  $H_{F2}(j\omega)$  du second filtre sous la forme :

$$H_{F2}(j\omega) = \frac{V_3}{V_2} = \frac{1}{1 + 2 \cdot m \cdot \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right) + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Exprimer la pulsation propre  $\omega_0$  et le paramètre  $m$  en fonction de  $R$  et  $C$ .

La valeur de  $R$  est égale à  $1 \text{ k}\Omega$  avec une tolérance de  $\pm 5 \%$ . Le document technique DTB1 présente les valeurs normalisées d'un condensateur.

**Question B9** | A l'aide du document technique DTB1, proposer une valeur pour  $C$  dans la série E12 permettant de satisfaire le gabarit du document réponse DRB1. Le condensateur choisi étant de tolérance J, calculer les valeurs minimale et maximale de la pulsation propre  $\omega_0$ .

**Question B10** | À partir de la détermination de  $m$ , justifier si la réponse indicielle de ce filtre présente ou non des oscillations.

Suite à l'application en entrée du filtre du signal  $v_2(t) = v_{21}(t) + v_{22}(t) = 2 + 0,5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 900 \cdot t)$ , le signal  $v_3(t)$  en sortie du filtre présente alors l'allure de la figure B5.

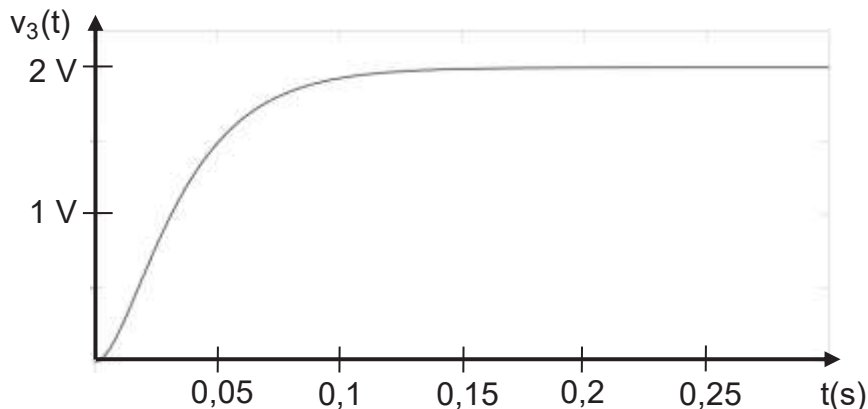


Figure B5 – Évolution du signal  $v_3(t)$

Tournez la page S.V.P.

**Question B11** | Relever le temps de réponse à 5 % de ce nouveau filtre et conclure sur la capacité de celui-ci à répondre à l'exigence de rapidité du cahier des charges. Proposer si besoin une modification du filtre.

## Partie C

### Contrôler les performances du système d'ouverture des portes du bus

La chaîne d'énergie permettant l'ouverture et la fermeture des portes du bus est composée d'un hacheur alimentant une machine à courant continu, d'un réducteur et d'un système de transformation de mouvement de type pignon-crémaillère.

Afin de maîtriser la vitesse d'ouverture et de fermeture des portes, ces constituants sont inclus dans une boucle de rétroaction comprenant un adaptateur de consigne, un comparateur, un correcteur et un capteur de vitesse. Cet ensemble est représenté par la figure C1.

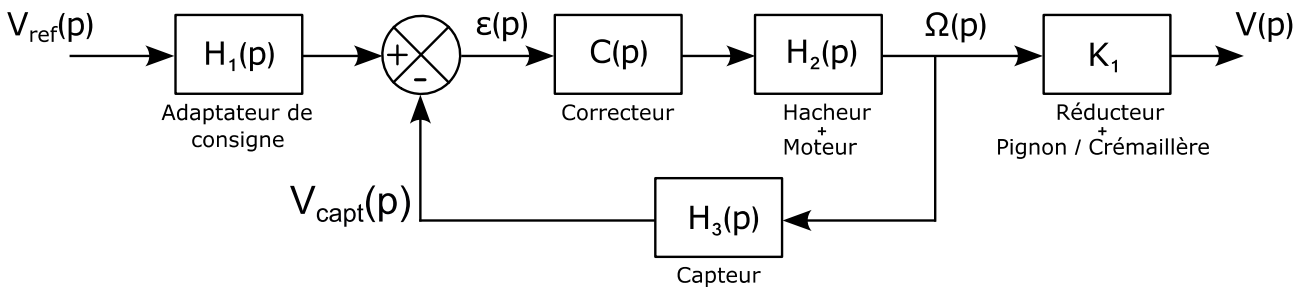


Figure C1 – Schéma-bloc de la boucle d'asservissement de vitesse

**Objectif :** Identifier les composants du système puis paramétrer un correcteur afin de répondre aux exigences de performances du cahier des charges.

#### Identification des fonctions de transferts

L'équation différentielle régissant le fonctionnement du capteur de vitesse est :

$$V_{\text{capt}}(t) + \tau_{\text{capt}} \frac{dv_{\text{capt}}(t)}{dt} - K_{\text{capt}} \cdot \omega(t) = 0$$

Le réducteur est un engrenage simple dont le pignon d'entrée possède  $Z_1 = 10$  dents et le pignon de sortie qui engrène à la crémaillère possède un diamètre primitif  $d = 0,1$  m et  $Z_2 = 50$  dents.

#### Question C1

En considérant les conditions de Heaviside satisfaites, déterminer à partir de l'équation différentielle fournie la fonction de transfert  $H_3(p) = \frac{V_{\text{capt}}(p)}{\Omega(p)}$  avec  $V_{\text{capt}}(p)$  et  $\Omega(p)$  les transformées de Laplace respectives de  $v_{\text{capt}}(t)$  et  $\omega(t)$ .

Le document technique DTC1 présente un extrait de la documentation constructeur du capteur de vitesse.

#### Question C2

À l'aide du document technique DTC1, déterminer la constante de temps du capteur  $\tau_{\text{capt}}$  en secondes ainsi que le gain du capteur en  $V \cdot s \cdot \text{rad}^{-1}$ .

Tournez la page S.V.P.

**Question C3** | Calculer l'expression littérale puis la valeur numérique du coefficient  $K_1$  en  $\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ .

**Question C4** | Exprimer le signal  $\varepsilon(p)$  en fonction de  $K_1$ ,  $H_1(p)$ ,  $H_3(p)$ ,  $V(p)$  et  $V_{\text{ref}}(p)$ . Sachant que pour assurer un fonctionnement correct du système ce signal doit être nul lorsque  $V(p) = V_{\text{ref}}(p)$  en déduire l'expression de  $H_1(p)$ . Exprimer finalement  $H_1(p)$  en fonction de  $p$  variable de Laplace et des différentes constantes du système.

Suite à un essai indiciel effectué sur l'ensemble {moteur + hacheur}, les résultats présentés sur le document réponse DRC1 sont obtenus.

**Question C5** | En s'appuyant sur l'essai indiciel du document réponse DRC1, proposer, en le justifiant, un ordre pour la fonction de transfert  $H_2(p)$ . À l'aide de constructions graphiques sur le document réponse DRC1, exprimer  $H_2(p)$  sous forme canonique en précisant la valeur de ses paramètres caractéristiques.

### Étude de la stabilité du système

Le cahier des charges impose au système une bonne stabilité et définit ainsi des marges telles que :

Marge de gain	$> 10 \text{ dB}$
Marge de phase	$> 45^\circ$

Le document réponse DRC2 présente le diagramme de Bode de la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système pour un correcteur proportionnel  $C(p) = K_C = 1$ .

**Question C6** | Sur le document réponse DRC2, tracer la marge de phase du système (considérer que le gain est nul pour  $\omega = 1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et donner sa valeur. Donner la marge de gain puis préciser si le cahier des charges est respecté.

**Question C7** | Toujours en s'appuyant sur le document réponse DRC2, déterminer la valeur du gain du correcteur  $K_{C_{\text{lim}}}$  permettant de se placer à la limite du critère portant sur la marge de phase.

### Étude des performances du système

Le cahier des charges impose au système les critères ci-dessous :

Dépassement	Nul
Erreur statique	$< 5 \%$
Temps de réponse à 5 %	$< 0,2 \text{ s}$

Quelles que soient les valeurs déterminées précédemment, on considérera désormais :

$$C(p) = K_C \quad H_2(p) = \frac{K_m}{1 + T_m \cdot p} \quad \text{avec } K_m = 2,88 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \text{ et } T_m = 0,2 \text{ s}$$

$$H_3(p) = \frac{K_{\text{capt}}}{1 + T_{\text{capt}} \cdot p} \quad \text{avec } K_{\text{capt}} = 0,35 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1} \text{ et } T_{\text{capt}} = 0,01 \text{ s}$$

**Question C8**

Montrer que la fonction de transfert en boucle fermée  $H_{BF}(p) = \frac{V(p)}{V_{\text{ref}}(p)}$  s'exprime :

$$H_{BF}(p) = \frac{\frac{K_{\text{capt}} K_C K_m}{1 + K_{\text{capt}} K_C K_m}}{1 + \frac{T_{\text{capt}} + T_m}{1 + K_{\text{capt}} K_C K_m} p + \frac{T_{\text{capt}} T_m}{1 + K_{\text{capt}} K_C K_m} p^2}$$

**Question C9**

Déterminer l'expression de la pulsation propre  $\omega_0$  et du paramètre d'amortissement  $m$  du système en fonction de  $K_C$ . Sachant qu'un dépassement apparaît pour toutes les valeurs du paramètre d'amortissement inférieures à 1, en déduire la valeur maximale de  $K_C$  permettant de satisfaire le cahier des charges.

La figure C2 montre l'évolution du temps de réponse à 5 % réduit en fonction du coefficient d'amortissement.

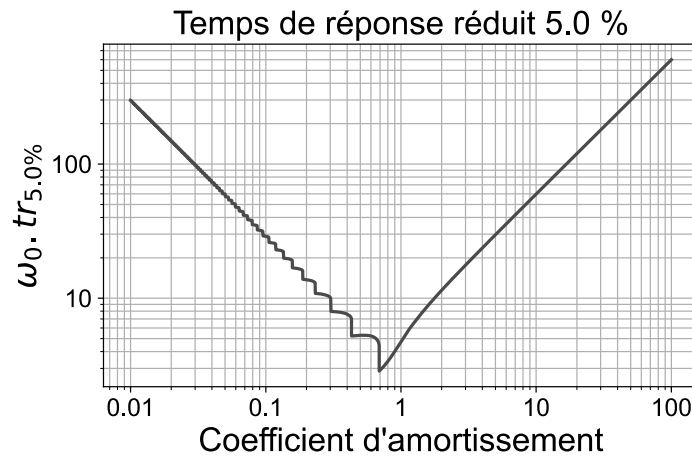


Figure C2 – Évolution du temps de réponse réduit à 5 %

**Question C10**

Déterminer, en utilisant la figure C2, la valeur du temps de réponse à 5 % du système dans le cas où  $K_C = 4,5$ . Conclure alors vis-à-vis du cahier des charges en termes de rapidité.

**Question C11**

Afin de satisfaire tous les critères du cahier des charges simultanément, trois correcteurs sont finalement envisagés. En vous appuyant sur les relevés présentés sur la figure C3, choisir un correcteur, en justifiant la réponse, parmi les trois proposés.

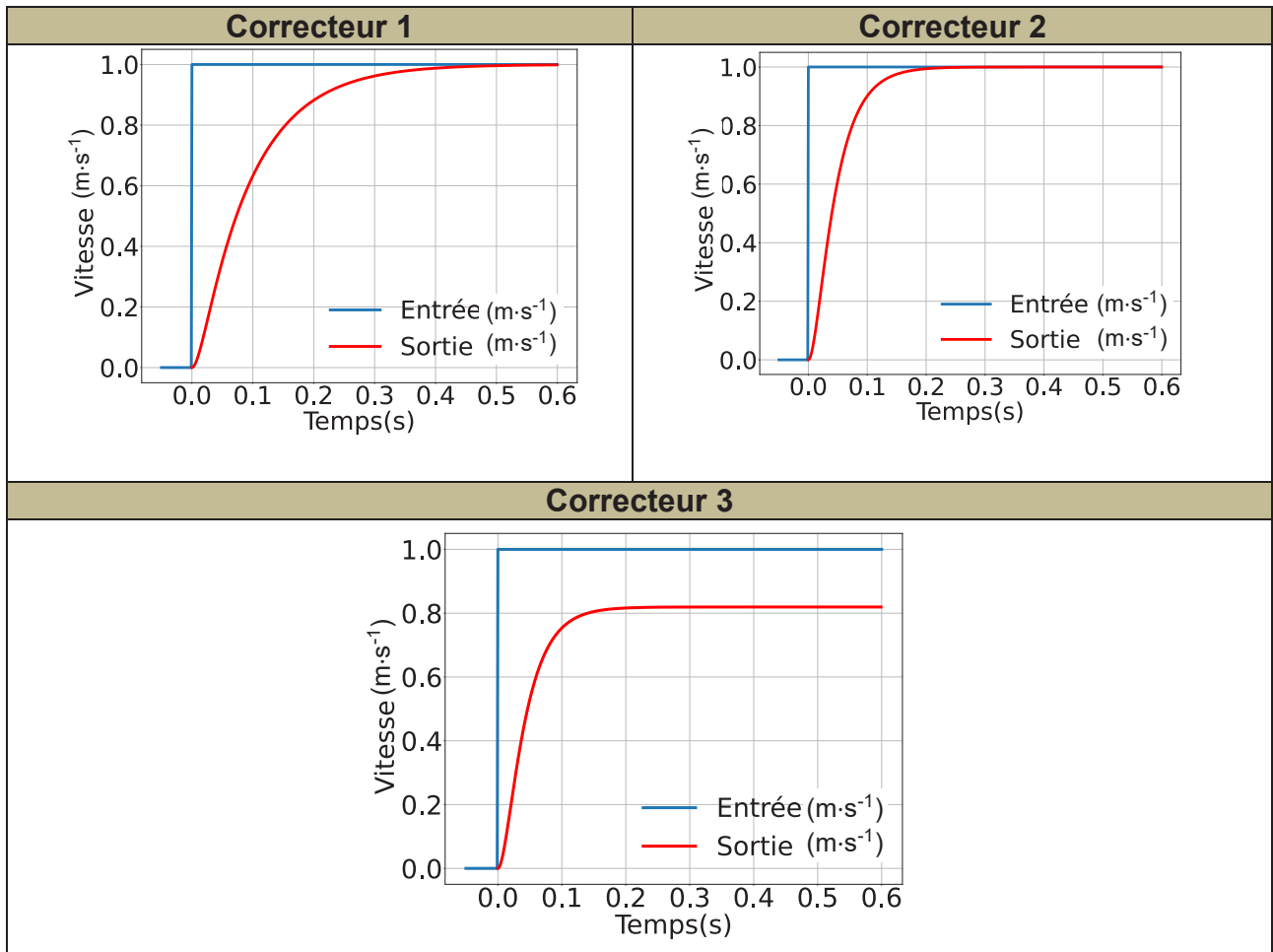


Figure C3 – Propositions de correcteurs

## Vérifier la fiabilité d'une transmission de données

La communication entre la pile à combustible et le calculateur du bus Hycity® est basée sur une architecture de type bus CAN. Cette communication permet notamment de confier au calculateur la régulation de la température de la pile à partir de la mesure effectuée au préalable.

### Structure du bus CAN

Le bus CAN (Controller Area Network) est un bus série de terrain car il doit fonctionner dans un environnement limité et sévère (milieu industriel, atelier, voiture...) permettant la transmission asynchrone de données numériques. Il s'agit d'un bus multiplexé.

Les particularités de ce bus sont :

- un bus producteur/consommateur où tous les participants ont les mêmes droits ;
- les nœuds (hôtes) de ce bus ne sont pas adressés ; seuls les messages transmis possèdent un identificateur ; chaque nœud scrute en permanence le bus et décide selon l'identificateur si le message lui est destiné ou pas ;
- une fiabilité élevée des mécanismes de protection du protocole.

Les éléments communiquent par l'intermédiaire du bus CAN composé d'un support de transmission et d'unités de contrôle électroniques (ECU) qui sont les stations du réseau (nœuds CAN). La figure D1 présente l'interconnexion de ces composants.

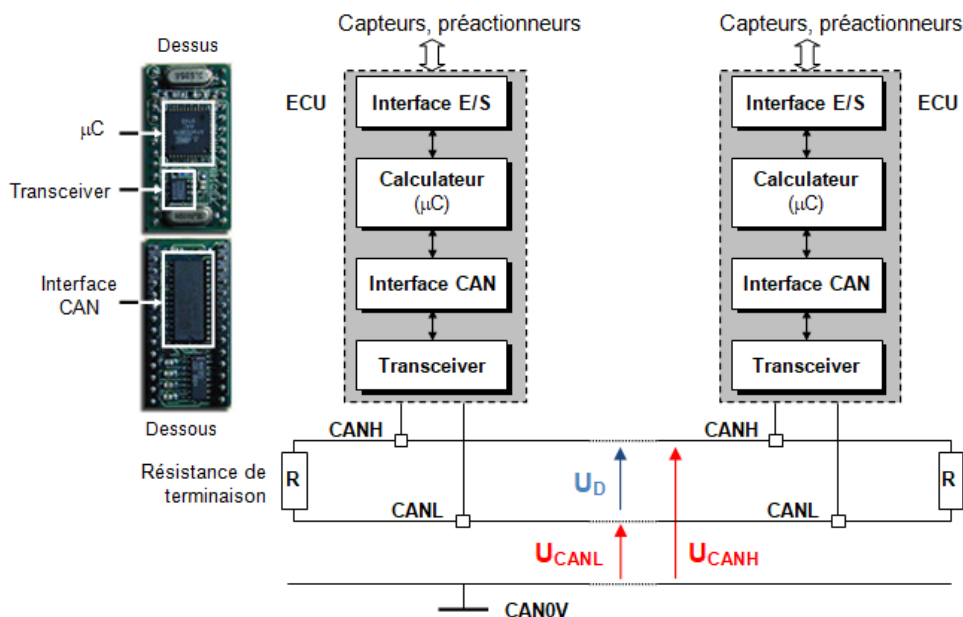


Figure D1 – Structure du bus CAN

**Objectif :** Interpréter les données transmises sur le bus CAN et vérifier leur fiabilité.

### Question D1

Pour le protocole de communication CAN préciser :

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

Dans sa version CAN High Speed, la couche physique comporte deux signaux CAN\_L et CAN\_H construits de façon symétrique, on parle alors de mode différentiel. Dès lors, c'est la différence de tension  $U_D$  entre les deux conducteurs du bus qui est prise en compte pour l'interprétation des données (bits) sur le bus :  $U_D = U_{CANH} - U_{CANL}$ .

**Question D2** | Expliquer comment la couche physique permet l'élimination des perturbations électromagnétiques.

Deux domaines de tension de  $U_D$  sont définis pour l'interprétation des données sur le bus : l'état de bus caractérisé par un niveau récessif ou un niveau dominant (on parle de codage NRZ) :

- si  $U_D \leq 0,5 \text{ V}$ , le bus présente un état récessif (état logique « 1 ») ;
- si  $U_D \geq 0,9 \text{ V}$ , on assiste à un état dominant (état logique « 0 »).

**Question D3** | Compléter le document réponse DRD1 en y représentant les évolutions de :

- $U_D$  sur le premier chronogramme ;
- l'état logique correspondant (codage NRZ) sur le deuxième chronogramme.

La figure D2 présente la structure des trames du bus CAN mis en œuvre dans le système étudié.

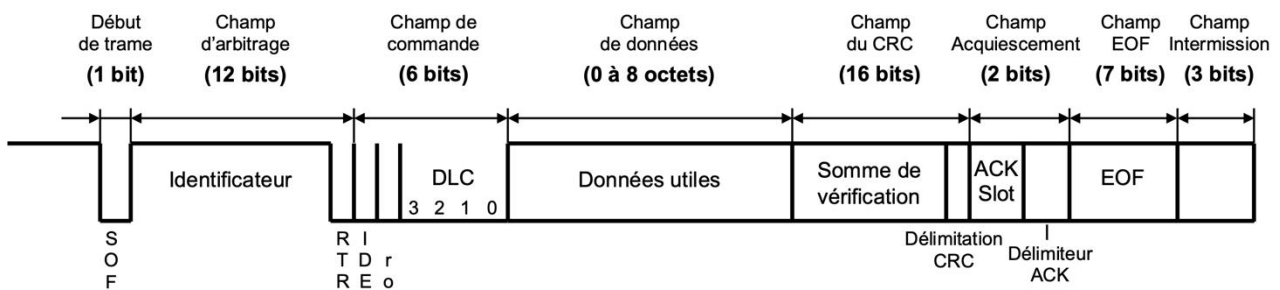


Figure D2 – Trame du bus CAN

**Question D4** | À partir de la structure de la trame CAN, donner :

- la taille en bits de l'en-tête et du terminateur ;
- la taille maximale en bits d'une trame CAN ;
- l'efficacité maximale de la transmission notée  $E_f$  et définie comme le rapport du nombre de bits utiles sur le nombre de bits total.

### Interprétation d'une trame

Lors de la mise au point du système de communication entre la pile et le calculateur, un test de procédure d'urgence est effectué : la pile envoie un message d'urgence concernant un défaut grave, comme une surchauffe, aux autres équipements.

Pour valider la procédure, le message doit être envoyé en moins de 1 ms et présenter le bon code d'urgence.

Dans le cas d'un message d'urgence, 8 octets de données doivent être transmis.

Le document réponse DRD1 représente les trames échangées lors du test.

**Question D5** | À partir de la trame présentée sur le document réponse DRD1, déterminer la durée d'un bit ainsi que le débit binaire. En déduire la durée de la trame sachant que celle-ci est constituée de 111 bits. Conclure alors quant à l'exigence sur la durée de transmission.

Le champ de l'identificateur contient 11 bits. Le constructeur réserve les 4 premiers bits de poids forts aux fonctions et les 7 autres bits pour l'adresse du nœud.

**Question D6** | Donner le code de la fonction de la trame CAN présentée sur le document réponse DRD1 ainsi que l'adresse du nœud concerné.

Le constructeur précise également que dans le cas d'un message d'urgence, l'identificateur admet une valeur en hexadécimal comprise entre  $81_{(16)}$  et  $FF_{(16)}$ .

**Question D7** | Donner la valeur de l'identificateur transmis en hexadécimal et vérifier qu'il s'agit bien d'un message d'urgence.

Le principe d'arbitrage consiste, pour les stations émettant simultanément sur le bus, à comparer bit à bit l'identificateur de leur message avec celui des messages concurrents. En cas de conflit (émissions simultanées), l'état « 0 » (dominant) écrase l'état « 1 » (récessif). Lors de l'arbitrage bit à bit, dès qu'une station émettrice se trouve en état récessif et détecte un état dominant, elle perd la compétition et arrête d'émettre.

Le document réponse DRD2 présente un tableau qui contient sur 11 bits les identifiants des messages capturés lors d'échanges sur le bus.

L'identifiant du message Climatisation en hexadécimal est  $110_{(16)}$

**Question D8** | Compléter le tableau du document réponse DRD2 avec les 11 bits correspondant au message "Climatisation" puis entourer en rouge le bit à partir duquel le message "Climatisation" remporte la compétition. Proposer alors un identifiant en hexadécimal pour le message "Pile" qui doit être de niveau de priorité supérieur à ceux déjà présentés sur le document réponse DRD2.

Les descriptions des alertes sont les suivantes :

- alerte température pile : la température de la partie solide de la pile ne doit pas dépasser  $85\text{ °C}$  ;
- alerte écart température pile vs température gaz : l'écart entre la température des gaz en entrée de la pile et celle de la pile doit être inférieure à  $10\text{ °C}$  ;
- alerte écart température gaz entrée vs eau sortie : l'écart entre les températures des gaz en entrée et de l'eau en sortie de la pile doit être inférieur à  $6\text{ °C}$  ;

**Tournez la page S.V.P.**

Les structures du champ de données du message pile est constituée de 4 octets est la suivante :

Désignation du signal	Bits	Position
Température pile en °C	8	1
Température gaz en entrée pile en °C	8	2
Température eau en sortie pile en °C	8	3
Non utilisé (NU)	3	4.2 à 4.0
Alerte écart température gaz entrée vs eau sortie	1	4.3
Alerte écart température pile vs température gaz	1	4.4
Alerte température pile	1	4.5
Consigne pompe refroidissement	1	4.6
État pompe refroidissement	1	4.7

L'encodage des données de température est en complément à 2, sur 8 bits.

Le signal CAN\_H capturé lors d'un échange de données entre la pile et le calculateur a fourni le chronogramme dont un extrait (champs DLC et Data) a été retranscrit à la figure D3.

0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
DLC				Data																								NU						

Figure D3 – Trame de données du message "Pile" capturé sur le bus CAN

Le document technique DTD1 présente le principe du bit de stuffing.

**Question D9** | Identifier, à partir de la figure D3, la localisation et le nombre de bit de stuffing à ajouter à la trame d'origine.

**Question D10** | Par lecture de la trame de la figure D3, déterminer :

- les températures : des gaz en entrée de la pile, de la pile elle-même et de l'eau en sortie de la pile ;
- la valeur du 4<sup>ème</sup> octet de données en hexadécimal en justifiant l'état des différents bits le composant au vu des températures relevées.

**Question D11** | Pour programmer le calculateur, on souhaite accéder directement à l'état de l'alerte température pile à partir d'une variable Datafield de type long int. Proposer une fonction en pseudo-langage qui renvoie la valeur 1 en cas d'alerte et 0 sinon.

## Partie E

### Évaluer les performances d'un système de redressement de tension

Afin d'anticiper une éventuelle défaillance, le bus est équipé d'une batterie de secours qui doit être rechargée périodiquement. Pour cela, le constructeur a choisi d'exploiter l'énergie disponible sur le réseau d'alimentation triphasé. Il faut donc utiliser un dispositif de conversion pour alimenter la batterie en continu.

**Objectif :** Dimensionner une partie du dispositif de conversion de puissance en respectant les exigences de performance du cahier des charges.

Le cahier des charges partiel du système de redressement est le suivant :

Forme de l'énergie en entrée (primaire)	Sinusoïdale triphasée 230/400 V – 50 Hz
Forme de l'énergie en sortie	Continue 600 V
Facteur de puissance secondaire	$> 0,9$

Une première solution est représentée figure E1. Il s'agit de l'association d'un transformateur triphasé (seul le secondaire est représenté) et d'un pont redresseur à diodes de type P3. Pour simplifier l'étude, la charge est supposée fortement inductive et est donc modélisée par une source de courant.

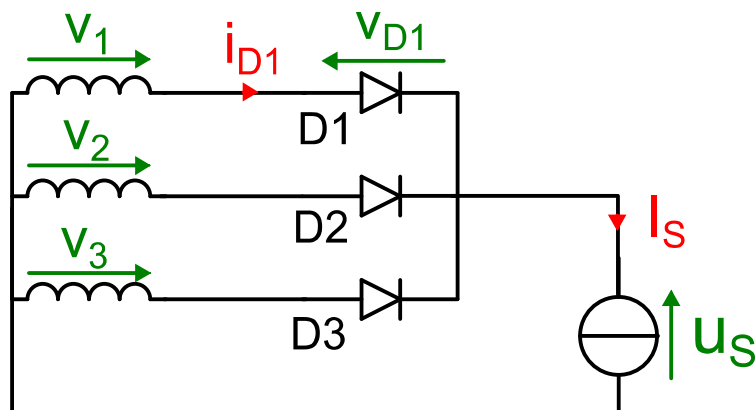


Figure E1 – Association transformateur triphasé / Pont redresseur P3

Dans ce montage, les diodes sont à cathodes communes et sont supposées parfaites. Le fonctionnement est alors décrit comme celui d'un commutateur "plus positif", c'est-à-dire que la diode voyant le plus haut potentiel à son anode est à l'état passant, les autres sont bloquées.

**Question E1** | À l'aide de la figure E1 et des indications ci-dessus, compléter les 3 premières lignes du document réponse DRE1 en y indiquant par des 1 les intervalles durant lesquels les diodes conduisent le courant et par des 0 les intervalles durant lesquels elles ne conduisent pas.

**Question E2** | Dans le cas général, établir la relation liant  $v_1$ ,  $v_{D1}$  et  $u_s$ . Simplifier cette relation dans le cas où la diode  $D_1$  est à l'état passant.

Tournez la page S.V.P.

**Question E3**

En utilisant les résultats de la question précédente, compléter le document réponse DRE1 en représentant l'allure de la tension  $u_S$  au cours du temps.

L'expression temporelle de la tension  $v_1$  est  $v_1(t) = \sqrt{2} V_{\text{eff}} \cdot \cos(\omega_1 t) = \sqrt{2} V_{\text{eff}} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T_1}\right)$  avec  $\omega_1 = 100\pi \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$  la pulsation,  $T_1$  la période et  $V_{\text{eff}}$  la valeur efficace.

La valeur moyenne notée  $\bar{x}$  d'une grandeur périodiquement variable  $x(t)$  de période  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  peut se calculer en utilisant la formule suivante :

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt$$

**Question E4**

Donner la période  $T_S$  de la tension  $u_S$  en fonction de  $T_1$  la période de la tension  $v_1$ . Montrer alors que la valeur moyenne de la tension  $u_S$  notée  $\overline{u_S}$  s'exprime :

$$\overline{u_S} = \frac{3\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi} V_{\text{eff}}$$

La charge étant fortement inductive, le courant  $I_S$  est supposé constant.

**Question E5**

Compléter le document réponse DRE1 en représentant l'allure du courant  $i_{D1}$  traversant la diode D1 et le premier enroulement au secondaire du transformateur.

**Question E6**

En utilisant le tracé précédent, déterminer, en fonction de  $I_S$ , la valeur efficace du courant  $i_{D1}$  notée  $I_{D1\text{eff}}$  et définie par la relation :

$$I_{D1\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_{-\frac{T_1}{2}}^{\frac{T_1}{2}} i_{D1}^2 \cdot dt}$$

Des mesures supplémentaires ont permis de déterminer que la tension inverse maximale aux bornes de chaque diode est de 630 V tandis que le courant moyen dans la charge est  $I_S = 10 \text{ A}$ .

Le document technique DTE1 présente plusieurs références de diodes de puissance.

**Question E7**

À l'aide du document technique DTE1, sélectionner une référence de diode utilisable dans le montage redresseur en prenant un coefficient de sécurité de 50 %.

**Question E8** | Donner l'expression de la puissance apparente au secondaire du transformateur en fonction de  $V_{\text{eff}}$  et  $I_{D1\text{eff}}$ .

Le transformateur et les diodes étant supposés parfaits, la puissance active est uniquement consommée par la charge. Cette puissance s'exprime alors par :  $P_A = \overline{u_S} \cdot I_S$ .

**Question E9** | Rappeler la définition du facteur de puissance  $f_P$  au secondaire du transformateur puis calculer sa valeur. Conclure alors vis-à-vis du cahier des charges pour le critère portant sur le facteur de puissance.

Pour répondre au problème précédent, il est possible de mettre en place une deuxième solution comprenant un pont redresseur parallèle double (PD3) tel que représenté sur la figure E2.

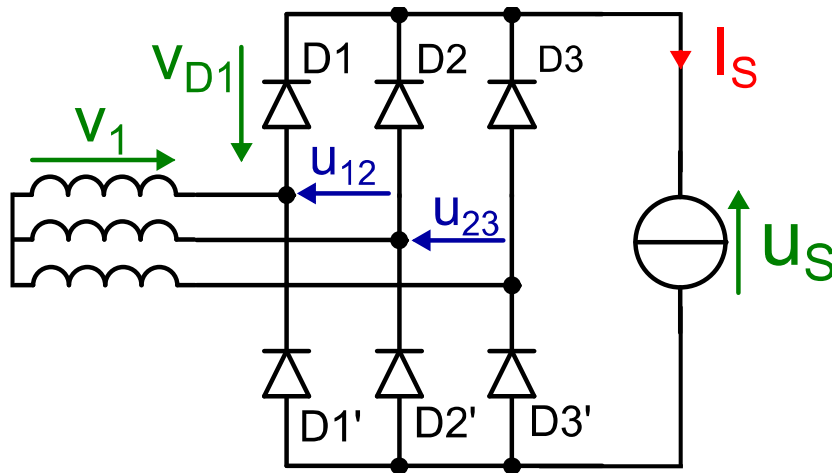


Figure E2 – Association transformateur triphasé / Pont redresseur PD3

Dans ce cas, le facteur de puissance s'exprime  $f_P = \frac{2}{\pi} \sqrt{q} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)$  avec  $q$  le nombre de phases. La tension moyenne aux bornes de la charge est  $\overline{u_S} = 0,95 U_M$  avec  $U_M$  l'amplitude des tensions composées au secondaire du transformateur.

**Question E10** | Vérifier qu'avec ce montage le critère portant sur le facteur de puissance est bien satisfait.

**Question E11** | En assimilant la tension aux bornes de la charge à sa valeur moyenne, calculer le rapport de transformation  $m$  du transformateur couplé en étoile au primaire et au secondaire pour assurer une recharge correcte de la batterie.

## DOCUMENT TECHNIQUE DTA1

Un extrait de la documentation constructeur de l'actionneur, pour un fonctionnement en régime nominal, est donné ci-dessous.



Tension nominale de l'induit : $U_n$	200 V
Puissance absorbée nominale de l'induit : $P_{an}$	100 W
Vitesse de rotation nominale : $N_n$	1800 tr·min <sup>-1</sup>

## DOCUMENT TECHNIQUE DTB1

Les valeurs normalisées des condensateurs de la série E12 sont données dans le tableau ci-dessous.

Capacité	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82
----------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Les tolérances de la valeur d'un condensateur de valeurs supérieures à 10 pF sont les suivantes :

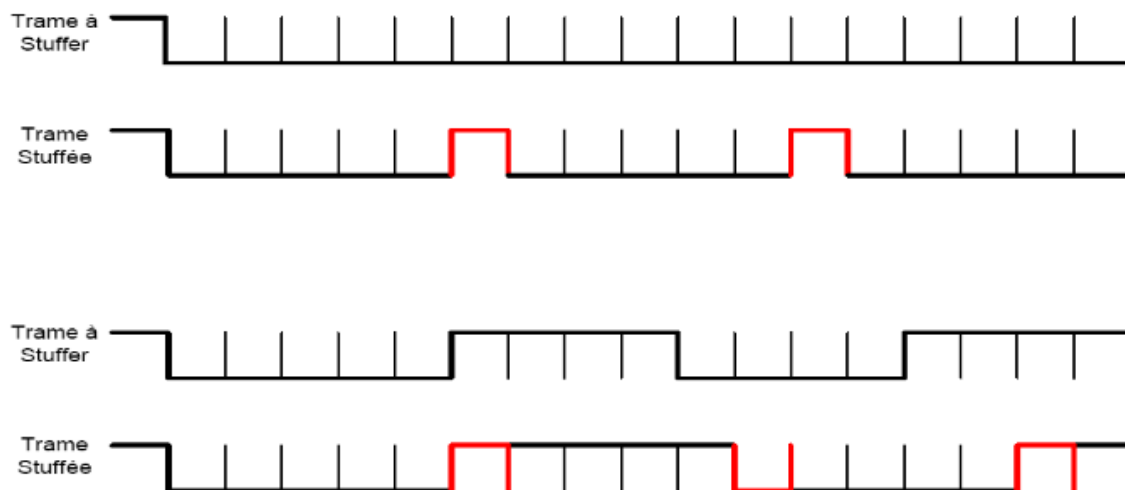
Lettre	F	G	H	J	K	M
Tolérance	1 %	2 %	2,5 %	5 %	10 %	20 %

## DOCUMENT TECHNIQUE DTC1

Caractéristiques du capteur de vitesse		
Paramètre	Valeur	Unité
Classe d'isolation	B	
Protection EN 60529	IP 56	
Puissance	1,2	W
Tension à vide	36,65	V (à 1000 tr·min <sup>-1</sup> )
Temps de réponse à 5%	0,03	s
Couple	1,5	N·cm
Moment d'inertie	0,05	kg·cm <sup>2</sup>

## DOCUMENT TECHNIQUE DTD1

La technique du bit de Stuffing consiste à insérer dans la transmission des données un bit de valeur opposée lorsque l'on détecte cinq bits consécutifs de valeurs identiques dans les données à transmettre. La figure ci-dessous présente deux exemples d'insertion de bit de Stuffing.



## DOCUMENT TECHNIQUE DTE1

Référence de la diode	Valeurs maximales admissibles (à 25°C)	
FFSPF1065A	$V_{RRM}$	650 V
	$I_F$	10 A
	$I_M$	28 A
	$I_R$	200 $\mu$ A
	$P_{tot}$	38 W
DSEI 12-10A	$V_{RRM}$	1000 V
	$I_F$	12 A
	$I_M$	75 A
	$I_R$	250 $\mu$ A
	$P_{tot}$	78 W
HER505	$V_{RRM}$	400 V
	$I_F$	5 A
	$I_M$	150 A
	$I_R$	200 $\mu$ A
	$P_{tot}$	25 W

$V_{RRM}$  : Tension répétitive inverse maximale admissible.

$I_F$  : Courant continu équivalent admissible en direct.

$I_M$  : Courant impulsionnel maximal admissible.

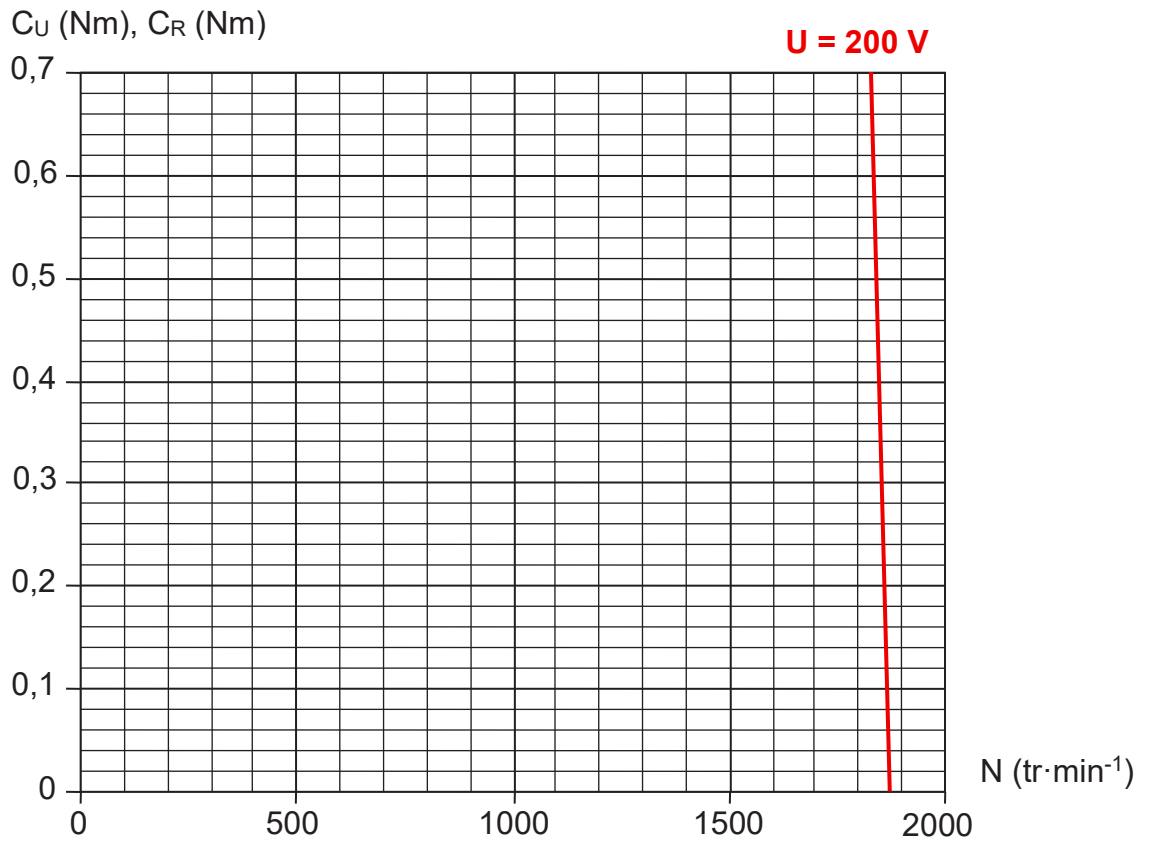
$I_R$  : Courant inverse maximal admissible.

$P_{tot}$  : Puissance dissipée.

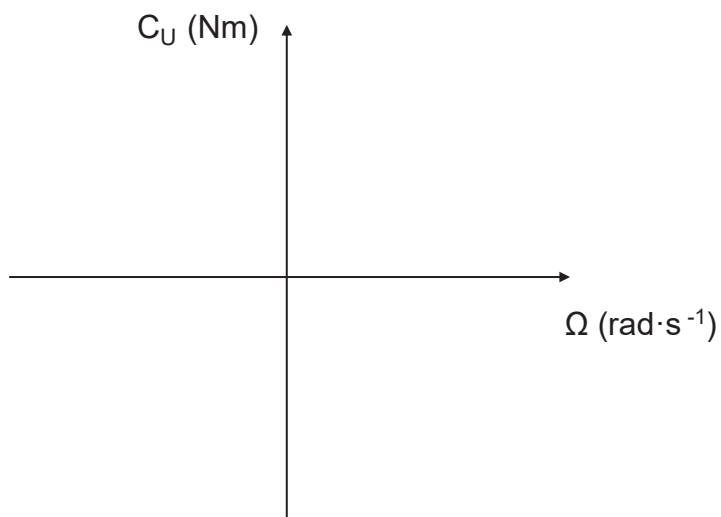


NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

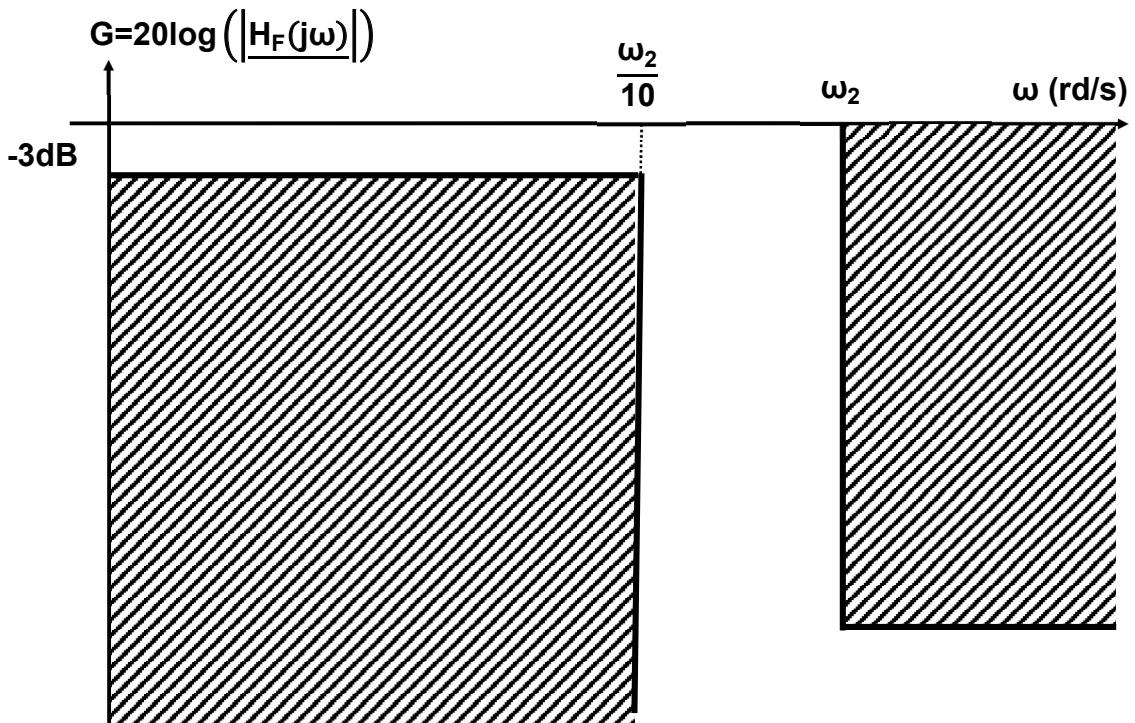
DOCUMENT RÉPONSE DRA1 (Questions A9 et A10)



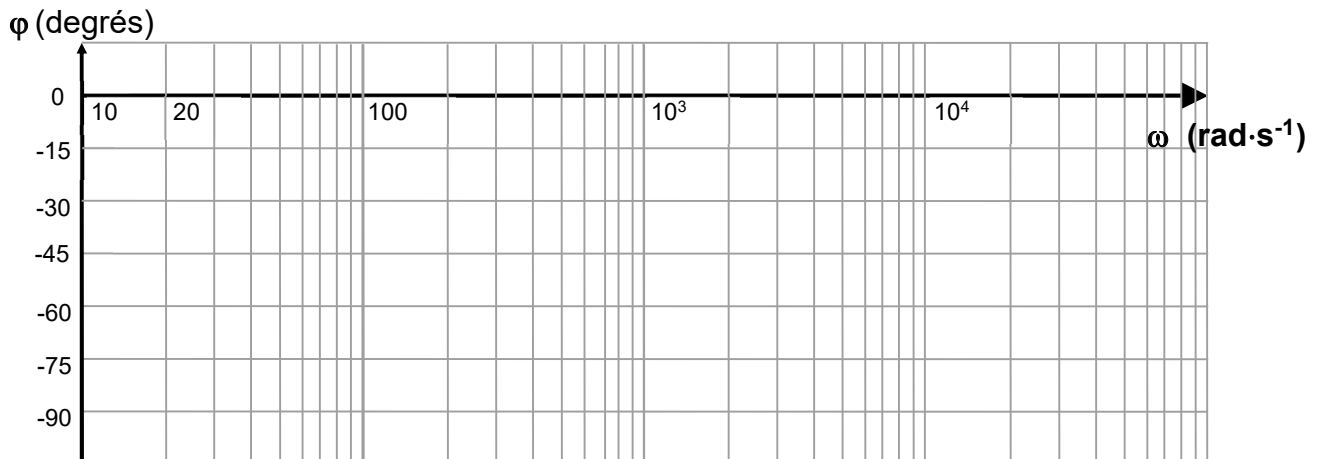
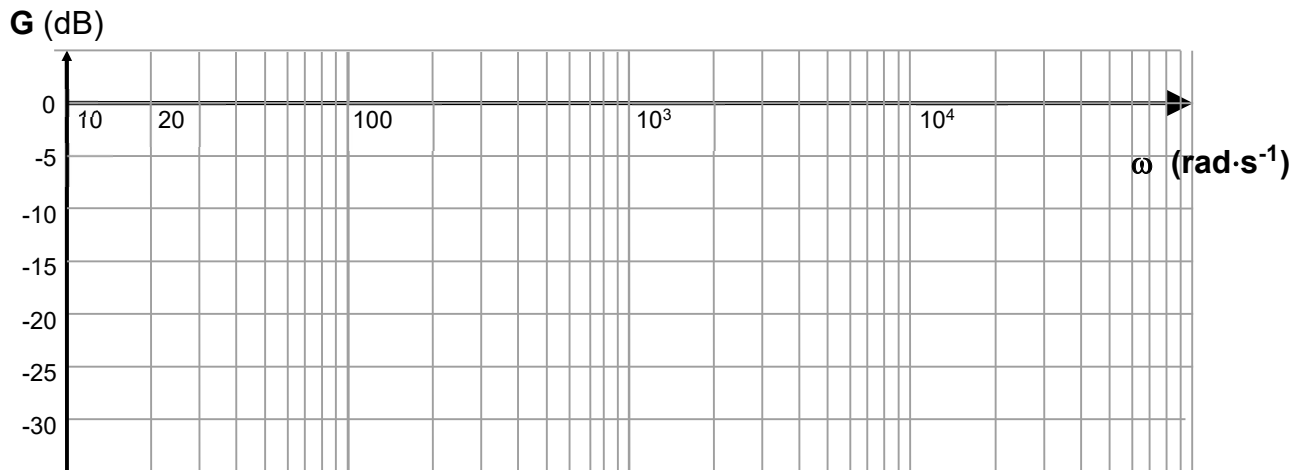
DOCUMENT RÉPONSE DRA2 (Question A11)



DOCUMENT RÉPONSE DRB1 (Questions B2 et B9)



DOCUMENT RÉPONSE DRB2 (Question B4)

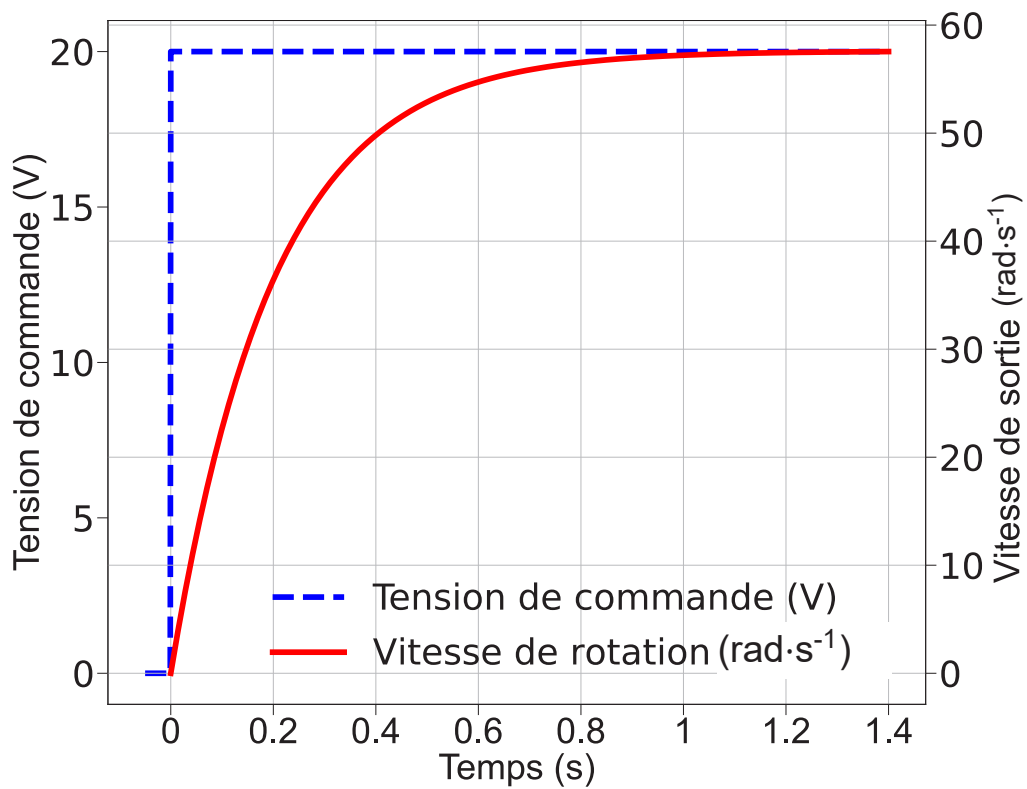


Tournez la page S.V.P.

**DOCUMENT RÉPONSE DRB3 (Question B5)**

	$v_{21}(t)$	$v_{22}(t)$
	$\omega_1 =$	$\omega_2 =$
<b>G</b>		
<b>H</b>		
$\phi$		

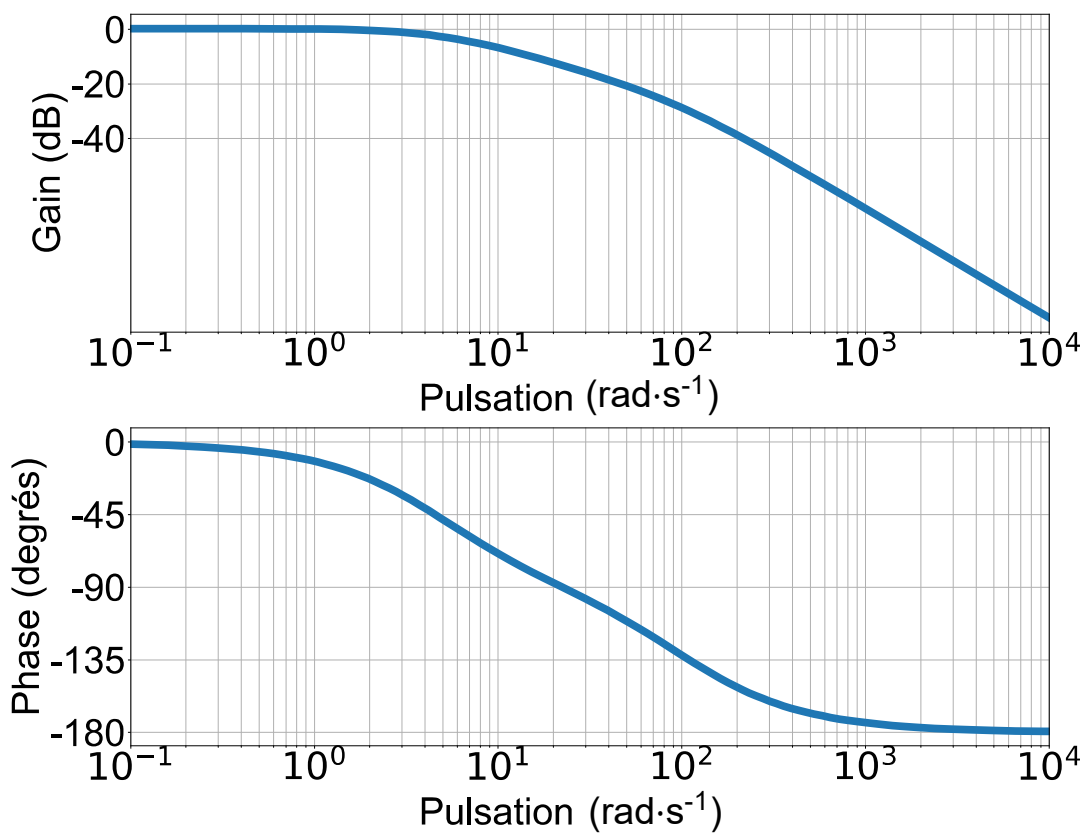
**DOCUMENT RÉPONSE DRC1 (Question C5)**



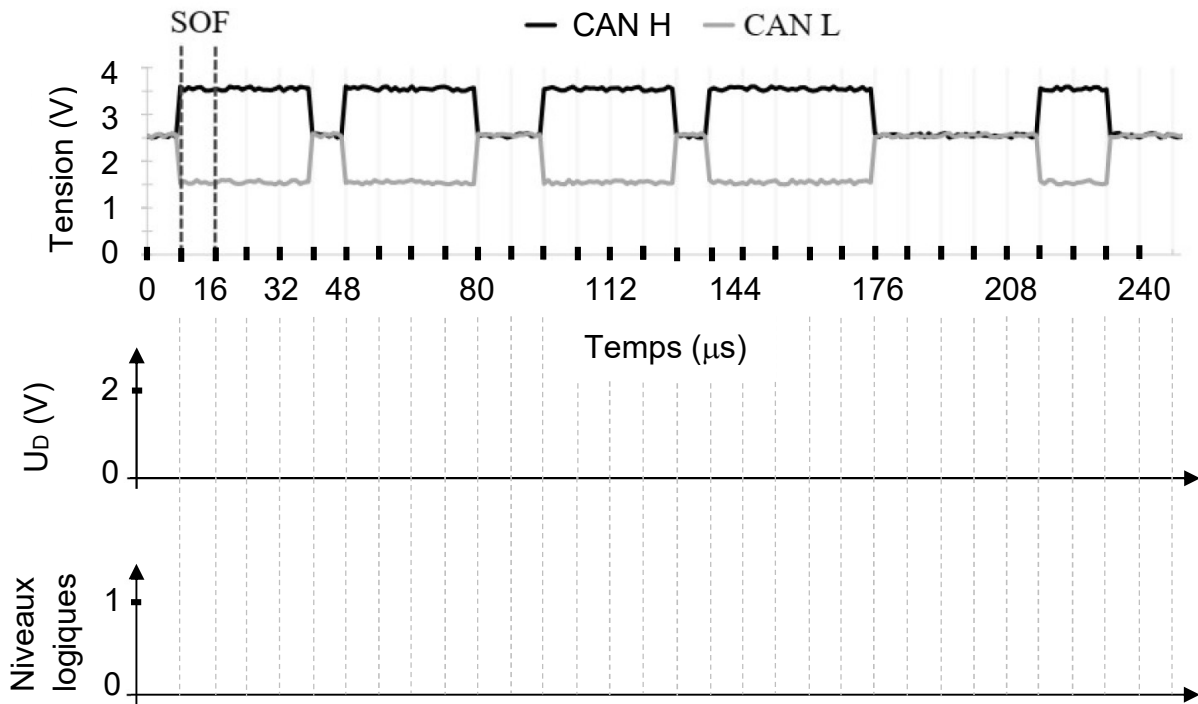


NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE DRC2 (Questions C6 et C7)

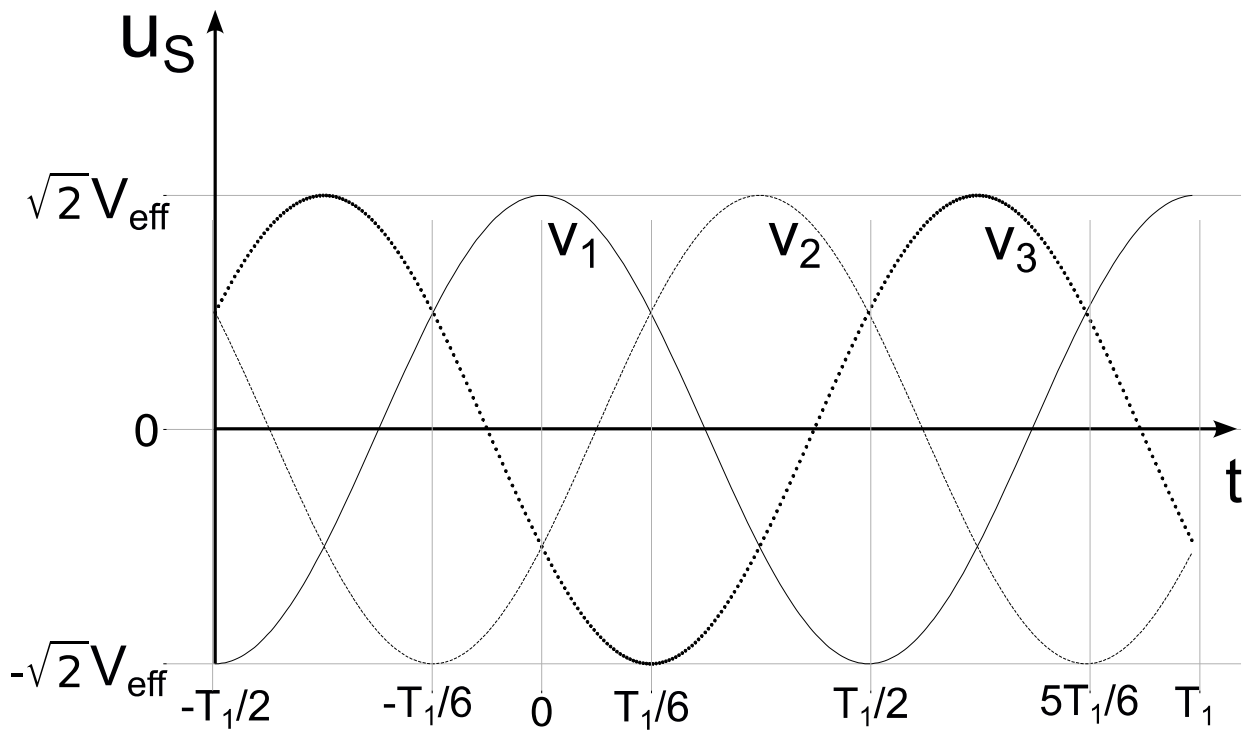


## DOCUMENT RÉPONSE DRD1 (Questions D3, D5 et D6)



## DOCUMENT RÉPONSE DRD2 (Question D8)

	a <sub>10</sub>	a <sub>9</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
Porte 2	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
Porte 1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
Climatisation											



D1					
D2					
D3					

