

# BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE

S e s s i o n 2 0 1 0

## PHYSIQUE APPLIQUÉE

Série : Sciences et technologies industrielles

Spécialité : Génie électrotechnique

Durée de l'épreuve : 4 heures

coefficient : 7

L'emploi de toutes les calculatrices programmables alphanumérique ou à écran graphique est autorisé à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante (circulaire n°99-186 du 16-11-1999).

Le sujet comporte 9 pages numérotées de 1 à 9

Les parties A, B, C, D, E, F et G sont indépendantes

Les documents-réponses pages 8 et 9 sont à rendre avec la copie.

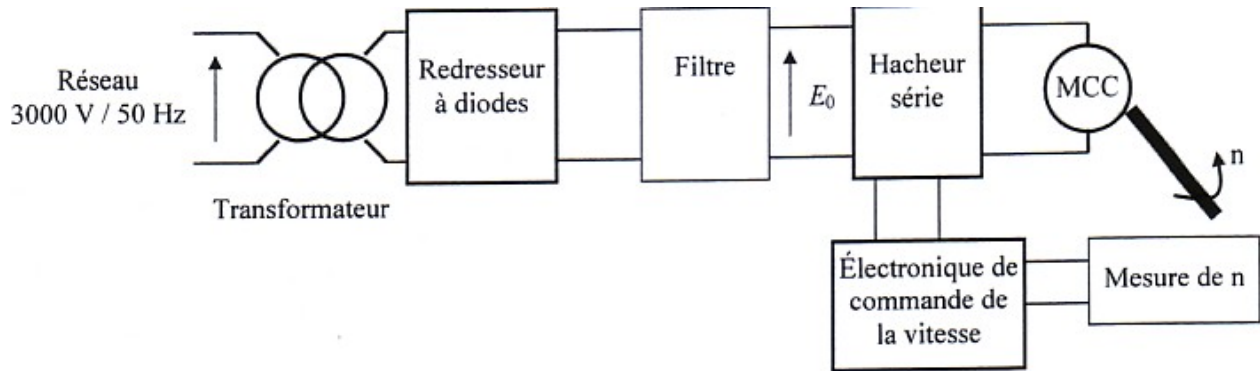
**Il est rappelé aux candidats que la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements, entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.**

On s'intéresse à l'étude de la motorisation d'une remontée mécanique par téléphérique, ainsi qu'à sa commande. Le téléphérique est entraîné par un moteur à courant continu à excitation série.

La tension continue permettant d'alimenter le moteur est obtenue à partir d'une tension monophasée (HTA) du réseau (3000 V ; 50 Hz), d'un transformateur, d'un redresseur et d'un hacheur.

Ce système est intégré dans une boucle de régulation de la vitesse qui comporte, en outre, un capteur de vitesse du moteur et une commande électronique du rapport cyclique du hacheur.

Le schéma général (simplifié) du système est représenté ci-après :



### **A. Étude de la consommation d'énergie et de son coût**

On suppose que l'installation fonctionne environ huit heures par jour. La puissance moyenne consommée au cours d'une journée d'exploitation (quelle que soit la journée) est de 350 kW. En outre, on suppose que le prix de l'énergie électrique consommée est de 73,6 euros par MWh pendant les jours de semaine, et 47,4 euros par MWh le dimanche.

A.1) Déterminer l'énergie consommée  $W_j$  (en MWh) en une journée de fonctionnement.

A.2) En déduire le coût  $C$  de l'énergie électrique consommée en une semaine d'exploitation.

### **B. Étude du transformateur**

En entrée de l'installation, on trouve un transformateur. On étudie ce transformateur seul et fonctionnant en régime sinusoïdal. Sa plaque signalétique comporte les indications suivantes :  
3000 V / 920 V ; 50 Hz ; 750 kVA

B. 1) Déterminer les valeurs efficaces nominales  $I_{1n}$  et  $I_{2n}$ , des intensités des courants primaire et secondaire.

B. 2) Lors d'un essai à vide, on a relevé les valeurs suivantes :

Valeurs efficaces des tensions primaire et secondaire :  $U_{1N} = 3,0 \text{ kV}$   $U_{2v} = 920 \text{ V}$ .

Valeur efficace de l'intensité du courant primaire :  $I_{1v} = 12 \text{ A}$ .

Puissance consommée au primaire :  $P_{1v} = 3,5 \text{ kW}$ .

B. 2) a. Déterminer le rapport de transformation  $m$ .

B. 2) b. Donner la valeur efficace  $I_{2v}$  de l'intensité à vide au secondaire.

B. 2) c. Calculer le facteur de puissance à vide  $k_{1v}$  au primaire du transformateur.

B.3) Un essai en court-circuit a donné les résultats suivants :

Valeur efficace de la tension primaire :  $U_{1cc} = 130 \text{ V}$ .

Puissance consommée au primaire :  $P_{1cc} = 9,0 \text{ kW}$ .

Valeurs efficaces des intensités des courants primaire et secondaire :  $I_{1cc} = 250 \text{ A}$  ;  $I_{2cc} = 815 \text{ A}$ .

Calculer, à partir des mesures de l'essai en court-circuit, les valeurs de la résistance équivalente  $R_s$ , puis de la réactance équivalente  $X_s$  du modèle du transformateur vu du secondaire.

B.4) Essai en charge sous tension primaire nominale.

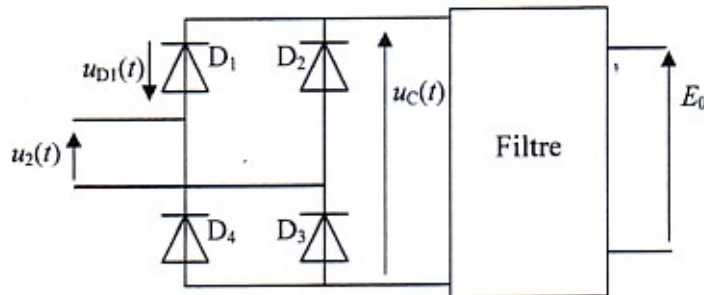
B. 4) a . Calculer alors la chute de tension  $\Delta U_2$  au secondaire de ce transformateur pour une charge nominale de facteur de puissance 0,8 (inductif), à partir de la relation :

$$\Delta U_2 = R_s \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2 + X_s \cdot I_2 \cdot \sin\phi_2$$

B. 4) b. Montrer dans ces conditions que la tension secondaire a pour valeur efficace :  $U_2 \approx 890 \text{ V}$ .

### C. Étude du redresseur

Un redresseur en pont de Graëtz à 4 diodes est alimenté par la tension sinusoïdale  $u_2(t)$  provenant du secondaire du transformateur. Il fournit une tension quasi continue  $E_0 = 800 \text{ V}$  par l'intermédiaire d'un filtre (que l'on n'étudiera pas ici). Les diodes sont supposées parfaites.



Hypothèses :

1/ le pont fonctionne en conduction ininterrompue ;

2/ la tension d'entrée s'écrit :  $u_2(t) = 1260 \sin 314t$  (exprimée en V) ;

3/  $E_0 = \langle u_C \rangle$ .

C.1) Calculer la valeur efficace  $U_2$  de la tension  $u_2(t)$ .

C.2) Exprimer, sans aucune justification, la valeur moyenne  $\langle u_C \rangle$  en fonction de  $\hat{U}_2$  valeur maximale de  $u_2(t)$ .

C.3) Retrouver alors approximativement la valeur de  $E_0$ .

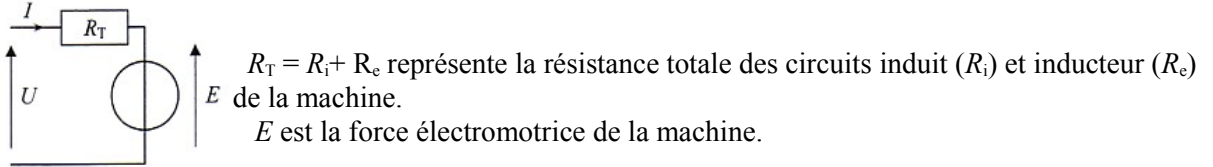
C.4) Compléter les formes d'ondes des signaux  $u_C(t)$  et  $u_{D1}(t)$  sur le document réponse n°1 page 8/9, ainsi que les intervalles de conduction des diodes.

## D. Étude du moteur à courant continu

La plaque signalétique du moteur à excitation série donne les valeurs suivantes :

$$U_N = 760 \text{ V} ; I_N = 680 \text{ A} ; R_T = 46,2 \text{ m}\Omega$$
$$n_N = 1125 \text{ tr.min}^{-1} ; P_N = 480 \text{ kW}$$

Modèle équivalent du moteur en régime permanent :



D. 1) En annexe A page 7/9 figure la caractéristique à vide  $E = f(I_e)$  de la machine donnée par le constructeur pour **une fréquence de rotation n maintenue constante** à  $1125 \text{ tr.min}^{-1}$ .  $I_e$  est l'intensité du courant circulant dans le circuit d'excitation (l'inducteur).

Sur le document, la courbe  $E = f(I_e)$  n'est linéaire que pour une intensité  $I_e$  inférieure à  $700 \text{ A}$ .

D. 1) a. Comment s'appelle le phénomène qui apparaît pour une intensité  $I_e$  *supérieure* à  $700 \text{ A}$  ?  
Dans toute la suite, on supposera que l'on se trouve toujours dans la partie linéaire de la courbe ( $I_e < 700 \text{ A}$ ).  
Dans le cas particulier du moteur à excitation série, l'induit et l'inducteur sont traversés par un courant de même intensité :  $I_e = I$  ( $I$  intensité du courant dans l'induit).

D. 1) b. A partir du modèle équivalent du moteur à courant continu à excitation série représenté précédemment, donner une relation liant  $U$ ,  $E$ ,  $R_T$  et  $I$ .

D. 1) c. Le flux à travers la machine est proportionnel à l'intensité du courant dans l'inducteur. Montrer que l'on peut écrire pour ce moteur :  $E = k I \Omega$ , avec  $k$  une constante,  $I$  l'intensité du courant parcourant le moteur et  $\Omega$  la vitesse de rotation de son arbre (en  $\text{rad.s}^{-1}$ ).

D. 1) d. A l'aide de la courbe  $E = f(I_e)$  en annexe A page 7/9, montrer que  $k$  a pour valeur :  $9,1 \times 10^{-3} \text{ V.s.A}^{-1}.\text{rad}^{-1}$ .

D. 1) e. En vous aidant de la question D. 1) c, montrer que le moment du couple électromagnétique peut s'écrire :  $T_{em} = k I^2$ .

D. 2) Étude au régime nominal, déterminer :

D. 2) a. la force électromotrice  $E_N$ ,

D. 2) b. le moment  $T_{emN}$  du couple électromagnétique,

D. 2) c. le moment  $T_{uN}$  du couple utile,

D. 2) d. le moment  $T_p$  du couple de pertes,

D. 2) e. la puissance absorbée  $P_{aN}$ .

D. 2) f. le rendement  $\eta_N$ .

DI.

### D.3) Étude à vitesse variable

On peut être amené à faire tourner la machine à vitesse réduite. On supposera que la valeur du moment du couple électromagnétique reste égale à sa valeur nominale :  $T_{em} = T_{emN}$ .

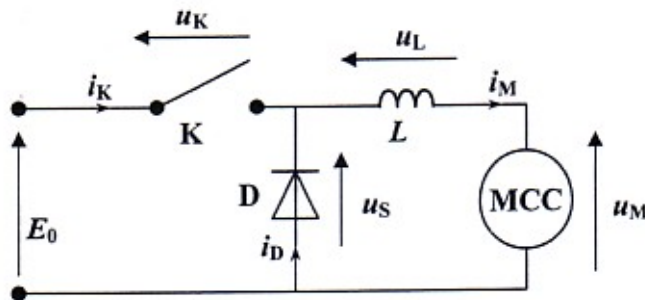
D.3) a. Montrer dans ces conditions que  $I = I_N$ .

D. 3) b. En vous appuyant sur les questions D. 1)b. et D. 1)c., montrer que la tension  $U$  a pour expression  $U = 0,647 n + 31,4$  avec la fréquence  $n$  de rotation exprimée en  $\text{tr.min}^{-1}$ .

D. 3) c. Calculer la valeur de la tension  $U$  pour une fréquence de rotation de  $600 \text{tr.min}^{-1}$ .

### E. Étude du hacheur

On suppose que le moteur est commandé par un hacheur série (voir schéma ci-après),



On a placé une bobine de forte inductance  $L$  en série avec le moteur. La source continue en entrée du hacheur délivre une tension de valeur :  $E_0 = 800 \text{ V}$ .

L'interrupteur  $K$  est commandé périodiquement de la façon suivante sur une période  $T$ :

- il est fermé pour  $t$  compris entre  $0$  et  $t_1 = \alpha T$ ,
- il est ouvert pour  $t$  compris entre  $t_1 = \alpha T$  et  $t_2 = T$ .

$\alpha$  est appelé le rapport cyclique de hachage.

On supposera en outre que la diode  $D$  et l'interrupteur  $K$  sont idéaux.

E. 1) Quel composant électronique de puissance peut-on choisir pour  $K$  ?

E. 2) Le hacheur fonctionne en conduction ininterrompue (le courant d'intensité  $i_M(t)$  est peu ondulé et ne s'annule jamais). Quel est le rôle de la diode  $D$  dite « diode de roue libre » ?

E.3) On a relevé les oscillogrammes de l'intensité  $i_M(t)$  dans la charge et de la tension de sortie du hacheur  $u_s(t)$  (voir document réponse n°2 page 9/9).

E. 3) a. Compléter les formes d'ondes des signaux  $u_K(t)$ ,  $i_K(t)$  et  $i_D(t)$  sur le document réponse n°2 page 9/9.

E. 3) b. Donner la période  $T_H$  de hachage et en déduire la fréquence  $f_H$  de ce hachage.

E. 3) c. Déterminer le rapport cyclique  $\alpha$  de fonctionnement du hacheur.

E. 3) d. Exprimer alors littéralement (sans justifier) la valeur moyenne  $\langle u_s \rangle$  de la tension  $u_s(t)$  en fonction de  $\alpha$  et  $E_0$ , puis la calculer numériquement.

E.4)

E. 4) a. On néglige la résistance de la bobine : montrer que  $\langle u_M \rangle < u_s \rangle$ .

E. 4) b. Déterminer le rapport cyclique  $\alpha_N$  au régime nominal permettant d'obtenir :  $\langle u_M \rangle = 760 \text{ V}$ .

## F. Étude de l'électronique de commande

On donne en annexe B page 7/9 le schéma d'une partie de l'électronique de commande permettant la régulation de vitesse du moteur. La tension  $v_c(t)$  est une tension de consigne permettant de régler la valeur de la vitesse du moteur. La tension  $v_n(t)$  provient d'un capteur de vitesse et est liée à celle-ci par la relation suivante :  $v_n(t) = 0,010n$  (avec  $n$  exprimée en  $\text{tr.min}^{-1}$ ).

Les amplificateurs linéaires intégrés idéaux (ALI 1 et ALI 2, encore appelés amplificateurs opérationnels) sont alimentés par des tensions symétriques  $+15\text{V}/-15\text{V}$ . Le premier étage réalise la fonction « opération de différence ». Le second permet d'amplifier la tension  $v_{er}(t)$ .

F.1) Montrer que les ALI 1 et 2 peuvent fonctionner en régime linéaire.

F. 2) F. 2) a. En justifiant, montrer que la tension  $v^+(t)$  est égale à  $v_c(t)/2$ .

F.2) b. On a  $v^-(t) = \frac{v_n(t) + v_{er}(t)}{2}$  en déduire une relation liant  $v_{er}(t)$ ,  $v_c(t)$  et  $v_n(t)$ .

F. 3) F. 3) a. Montrer que  $v_a(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times v_{er}(t)$

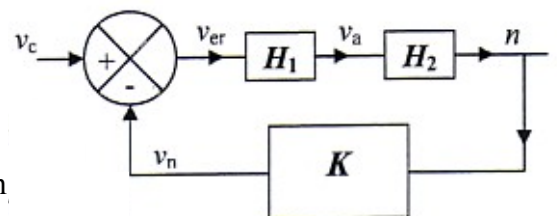
F. 3) b. Sachant que  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ , calculer la valeur de  $R_2$  pour avoir  $v_a(t) = 5,7 \times v_{er}(t)$ .

## G. Étude de la régulation de vitesse

Le schéma ci-contre présente la boucle de régulation de la vitesse du moteur en commandant sa fréquence de rotation.

On suppose que la tension  $v_a$  agit par l'intermédiaire du hacheur de manière à avoir  $n = 200v_a$  avec  $n$  exprimée en  $\text{tr.min}^{-1}$ .

On connaît par ailleurs :  $v_a = 5,7v_{er}$  et  $v_n = 0,010n$  (exprimée en  $\text{tr.min}^{-1}$ )



G.1) G.1)a. Donner la valeur respective des transmittances  $K$ ,  $H_1$  et  $H_2$  (sans oublier les unités).

G.1) b. Comment s'appelle la partie de la boucle correspondant à la transmittance  $K$ ?

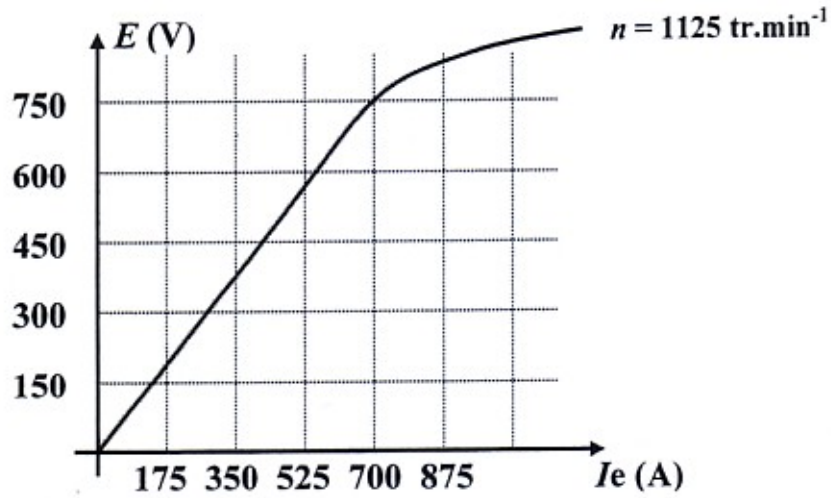
G.2) Exprimer la transmittance  $H$  de la chaîne directe en fonction de  $H_1$  et  $H_2$ , puis la calculer.

G.3) G. 3) a. Montrer que la transmittance de la boucle fermée s'écrit :  $T = \frac{n}{v_c} = \frac{H}{1 + HK}$

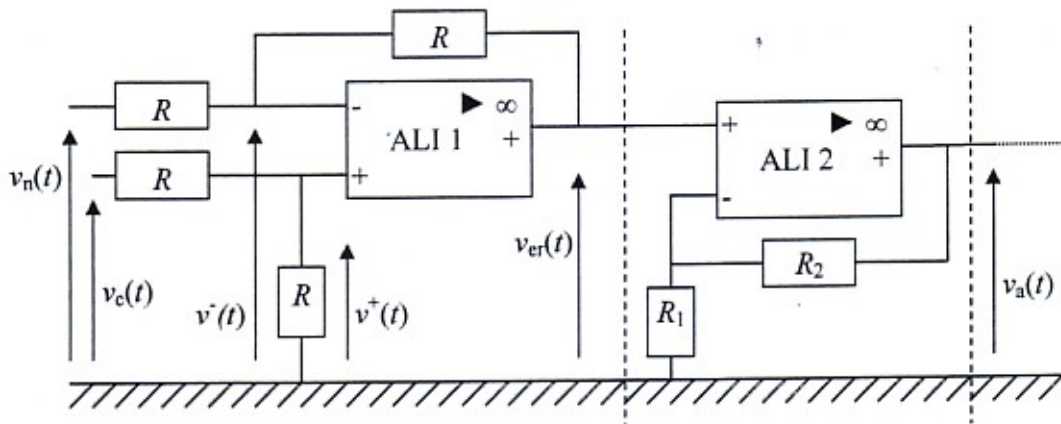
G. 3) b. Calculer  $T$ .

G. 3) c. Déterminer la valeur de  $v_c$  permettant d'obtenir une fréquence  $n = 1125 \text{ tr.min}^{-1}$ .

## Annexe A : Essai en génératrice à excitation séparée

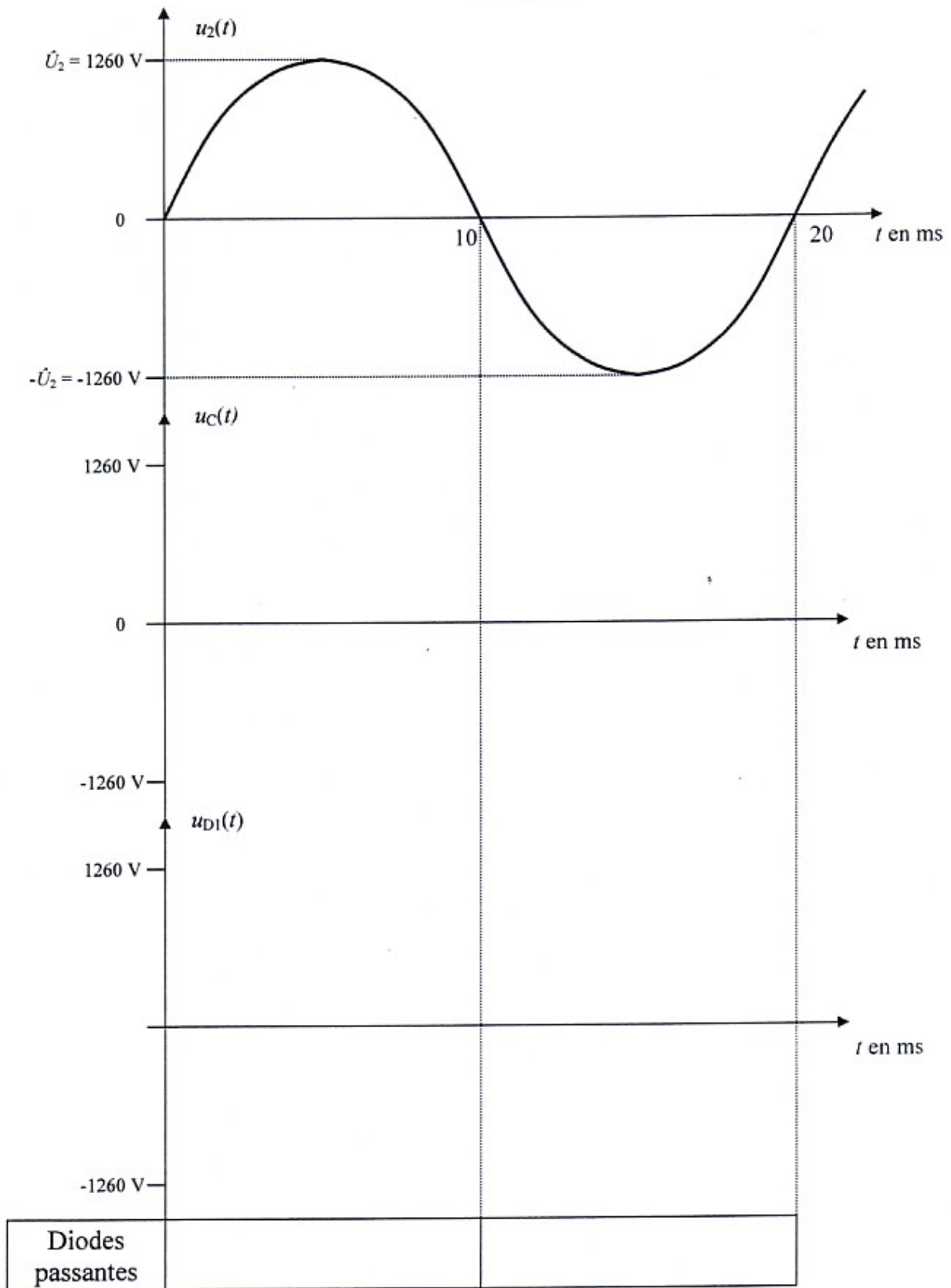


## Annexe B : Électronique de commande



# Document réponse n°1

## Redresseur





## Document réponse n°2

### Hacheur série

