

**BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR  
ÉLECTROTECHNIQUE**

**E4 - PHYSIQUE APPLIQUÉE  
À L'ÉLECTROTECHNIQUE**

**Durée : 4 heures**

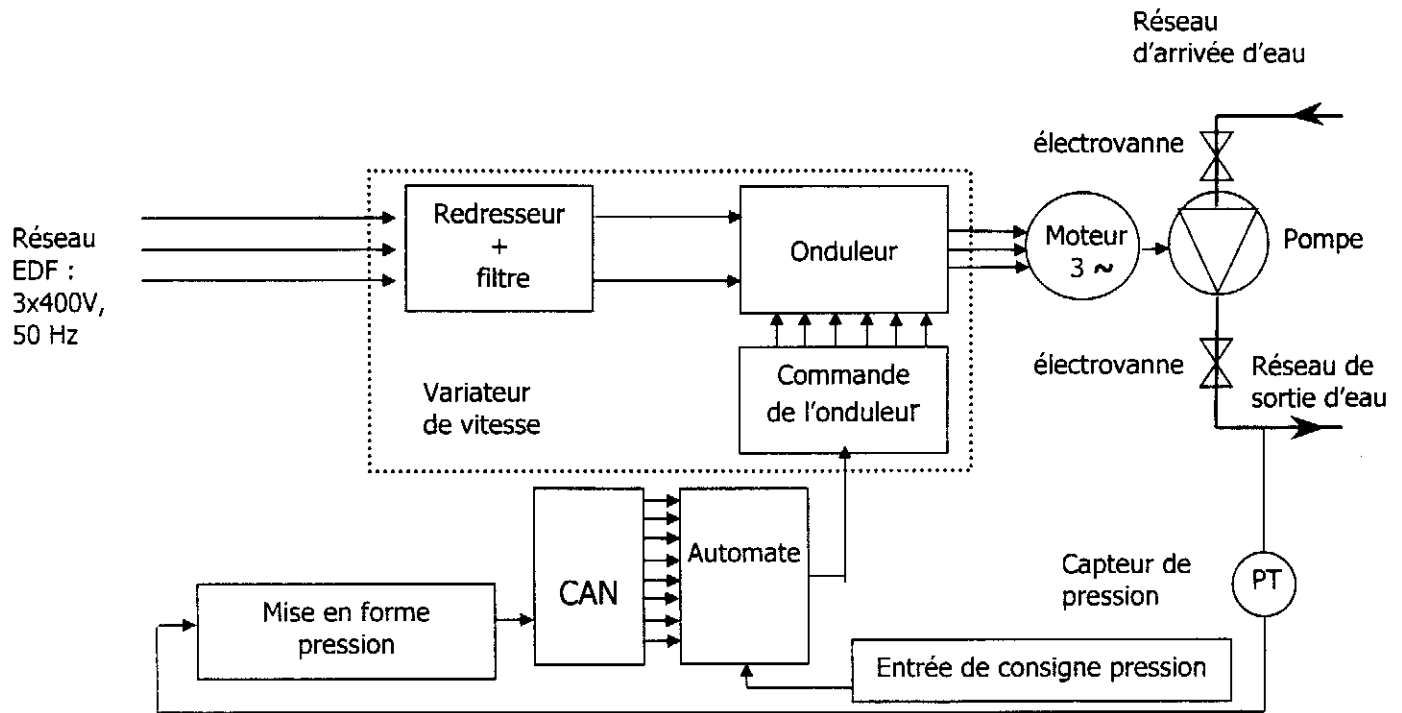
**Coefficient : 3**

*Calculatrice autorisée*

# ÉTUDE D'UNE STATION DE POMPAGE

Une société chargée de la distribution d'eau potable a installé une station de surpression qui a pour fonction de refouler l'eau à une pression de l'ordre de 6 bars en sortie du surpresseur, l'eau provenant d'un réservoir.

Le schéma fonctionnel simplifié de cette station est donné ci-dessous.



**Schéma général**

Le surpresseur est constitué d'une pompe entraînée par un moteur asynchrone.

Afin d'assurer une pression et un débit adaptés à la demande de l'utilisateur, le moteur de la pompe doit avoir une vitesse variable ; il est donc alimenté par un variateur de vitesse.

Un capteur de pression permet de connaître la pression disponible sur le réseau de sortie et après comparaison avec la pression de consigne, un automate génère la commande de l'onduleur pour faire varier la vitesse du moteur de la pompe.

**Le problème consiste à étudier le moteur, le redresseur, l'onduleur, et la mise en forme de la grandeur physique représentant la pression.**

**Les 4 parties sont indépendantes.**



Les lettres minuscules représentent les valeurs instantanées des grandeurs électriques, et les majuscules, les valeurs efficaces ou continues.

# 1 ÉTUDE DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

Dans cette première partie, on fait le bilan des pertes du moteur afin de calculer son rendement au fonctionnement nominal ; on modélisera ensuite le moteur afin de calculer le couple au démarrage.

Sur la plaque signalétique du moteur asynchrone, on peut lire les indications suivantes :

Puissance utile nominale : 9,0 kW  
Vitesse nominale : 1425 tr/min  
Fréquence nominale : 50 Hz

 400V 17 A	 230V 29 A
--	--

Sur cette machine, on réalise les essais suivants à 50 Hz :

A) Essai à vide, sous la tension nominale  $U_N = 400V$  :

- Courant absorbé :  $I_v = 7,0 A$  ;
- Puissance absorbée :  $P_v = 570W$  ;

Cet essai est réalisé à une vitesse très proche du synchronisme (le glissement est quasi nul). On admet en outre que les pertes mécaniques sont négligeables.

B) Essai avec rotor bloqué :

- Tension d'alimentation :  $U_{cc} = 71 V$  ;
- Courant par phase :  $I_{cc} = 17 A$  ;
- Puissance absorbée :  $P_{cc} = 603 W$ .

Dans tout le problème, on néglige :

- les inductances de fuite et les résistances statoriques
- les pertes fer rotoriques
- les pertes mécaniques.

## 1.1 Analyse des essais

- 1.1.1 Sachant que le moteur est alimenté par un réseau dont la tension entre phases a pour valeur efficace 400 V, comment doit-on coupler les enroulements statoriques du moteur ?
- 1.1.2 Donner (éventuellement sous la forme d'un diagramme) le bilan de puissance du moteur asynchrone étudié.
- 1.1.3 Rappeler la relation entre les pertes joule au rotor et la puissance transmise au rotor.
- 1.1.4 Pour le point de fonctionnement nominal, déterminer :
  - les pertes fer stator,  $P_{fs}$  ;
  - le glissement,  $g$  ;
  - la puissance transmise au rotor,  $P_{tr}$  ;
  - le couple électromagnétique,  $T_{em}$  ;
  - les pertes joule rotoriques,  $P_{jr}$  ;
  - la puissance absorbée,  $P_{abs}$  ;
  - le facteur de puissance,  $f_p$  ;
  - le rendement,  $\eta$ .

## 1.2 Modélisation

Pour chaque phase du moteur on adopte le modèle simplifié représenté à la figure 1.

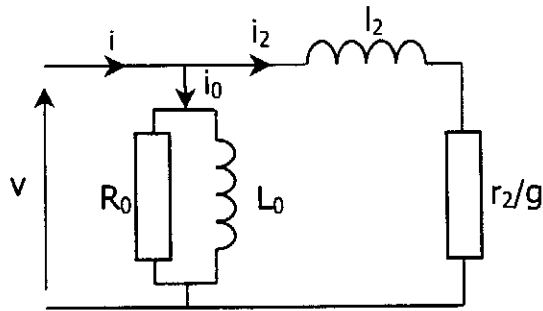


Figure 1

$r_2$  et  $l_2$  représentent les résistance et inductance de fuites rotoriques ramenées au stator,  $g$  désigne le glissement. On notera  $X_0 = L_0\omega$  et  $X_2 = l_2\omega$  ( $\omega$  désigne la pulsation des tensions d'alimentation).

- 1.2.1 Que devient le modèle lors de l'essai à vide ? (On rappelle que le glissement est alors négligeable). Calculer  $R_0$  et  $X_0$ .
- 1.2.2 En utilisant l'essai B à rotor bloqué et en négligeant  $I_0$  devant  $I$ , déterminer une valeur approchée des autres éléments du modèle, soit  $r_2$  et  $X_2$ .

## 1.3 Expression du moment du couple

Quelles que soient les valeurs trouvées précédemment, on prendra pour la suite :

$$r_2 = 0,80 \, \Omega \quad \text{et} \quad l_2\omega = 2,5 \, \Omega.$$

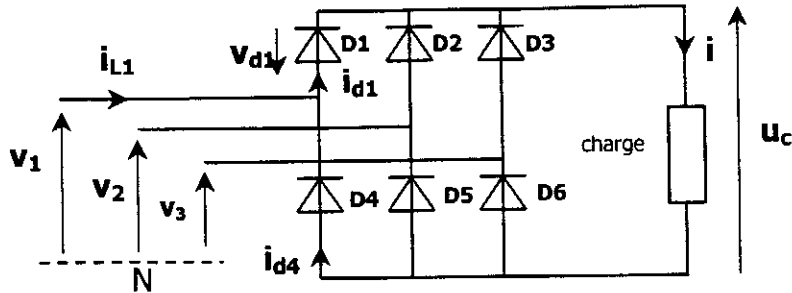
- 1.3.1 Montrer à partir du modèle équivalent que le moment du couple électromagnétique en fonction de  $g$  s'exprime par :

$$T_{em} = \frac{3V^2 \times \left(\frac{l_2}{g}\right)}{\Omega_s \times \left[ \left(\frac{l_2}{g}\right)^2 + (l_2\omega)^2 \right]} \quad \text{avec } \Omega_s \text{ vitesse de synchronisme du moteur.}$$

- 1.3.2 Calculer le moment du couple au démarrage, sous la tension nominale  $U_N$ .

## 2 ÉTUDE DE LA PARTIE REDRESSEUR

Le variateur de vitesse est constitué d'un redresseur qui permet d'obtenir une tension continue à partir du réseau EDF. La figure 2 représente le pont redresseur à diodes du variateur de vitesse.



**Figure 2**

$v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$  sont les 3 tensions simples du réseau de valeur efficace  $V = 230V$ .

Les 6 diodes du pont sont supposées idéales.

Les chronogrammes des 3 tensions simples sont donnés sur le document réponse n°1, figure 3.

**On suppose que le courant  $i$  dans la charge est tel que  $i = I = \text{Constante}$ .**

- 2.1 Hachurer les cases correspondant aux diodes conductrices sur le document réponse n°1, figure 3 pour tous les intervalles de temps.
- 2.2 Pour les intervalles  $[t_1 ; t_2]$  et  $[t_2 ; t_3]$  (figure 3), donner l'expression de  $u_c(t)$  en fonction de  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$  et représenter  $u_c(t)$  sur le document réponse n°1.
- 2.3 Sur le document réponse n°1, représenter pour un intervalle de temps égal à une période :
  - la tension  $v_{d1}(t)$ , tension aux bornes de la diode  $D_1$ ,
  - le courant  $i_{d1}(t)$  dans la diode  $D_1$ ,
  - le courant  $i_{d4}(t)$  dans la diode  $D_4$
  - le courant de ligne  $i_{L1}(t)$ .
- 2.4 Sachant que la valeur moyenne de la tension  $u_c$  a pour expression :

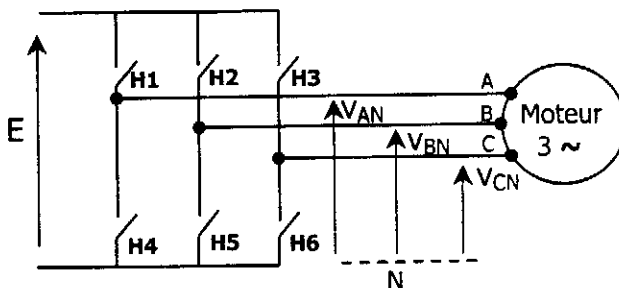
$$U_{\text{cmoy}} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V}{\pi}$$

calculer la valeur numérique de  $U_{\text{cmoy}}$ .

- 2.5 Une mesure à l'oscilloscope a permis d'enregistrer le courant de ligne  $i_{L1}$ , représenté figure 4, ainsi que son spectre d'amplitude, représenté figure 5.
  - 2.5.a Expliquer rapidement les différences entre la courbe théorique obtenue à la question 2.3 et celle représentée figure 4.
  - 2.5.b Donner la fréquence puis la valeur efficace du fondamental du courant  $i_{L1}$  puis celles des 2 harmoniques suivants.
  - 2.5.c Citer au moins un inconvénient de la présence de ces harmoniques sur le réseau.

### 3 ÉTUDE DE LA PARTIE ONDULEUR

Le variateur de vitesse est constitué d'un onduleur qui permet d'alimenter le moteur asynchrone avec une tension alternative à partir de la tension continue fournie par le redresseur.  
La figure 6 représente le schéma de principe de l'onduleur triphasé :



**Figure 6**

La tension continue E est la tension d'alimentation de l'onduleur. Les 6 interrupteurs commandés sont supposés parfaits.

#### 3.1 Onduleur PLEINE ONDE

Chaque interrupteur est fermé pendant une demi-période ; les commandes des interrupteurs (H1, H4) (H2, H5) et (H3, H6) sont complémentaires 2 à 2. Chacun des 3 demi-ponts est commandé avec un retard de T/3 sur le précédent.

Ces commandes sont schématisées sur la figure 7 du document réponse n°2.

3.1.1 Tracer sur le document réponse n°2 les courbes représentatives de  $u_{AB}$ ,  $u_{BC}$ ,  $u_{CA}$ .

En admettant qu'à chaque instant :  $v_{AN} + v_{BN} + v_{CN} = 0$ , montrer que  $v_{AN} = \frac{u_{AB} - u_{CA}}{3}$ , puis tracer  $v_{AN}$  sur le document réponse n°2.

3.1.2 Calculer la valeur efficace  $V_{AN}$  de la tension  $v_{AN}$  en fonction de E.

3.1.3 On montre que tous les termes pairs de la décomposition en série de Fourier de  $v_{AN}$  sont nuls ainsi que les termes impairs multiples de 3. On donne :

$$v_{AN}(t) = \left(\frac{2E}{\pi}\right) \left( \sin\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \frac{1}{11}\sin 11\omega t + \dots \right)$$

Donner l'expression de la valeur efficace  $V_1$  du fondamental de  $v_{AN}$  et calculer le taux d'harmoniques  $\tau$  de  $v_{AN}$ . (On rappelle que le taux d'harmoniques d'une grandeur  $v$  de valeur efficace  $V$  et dont la valeur efficace du fondamental est  $V_1$ , est donné par :  $\tau = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1}$  )

3.1.4 Quelle doit être la valeur de E pour que le fondamental de la tension  $v_{AN}$  ait pour valeur efficace 230 V ?

### 3.2 Onduleur MLI

En réalité, le convertisseur de fréquence fonctionne sur le principe de la modulation de largeur d'impulsion. La figure 8 donne 2 exemples notés  $u_{AB1}(t)$  et  $u_{AB2}(t)$  des variations de la tension  $u_{AB}(t)$ .

3.2.1 Montrer que l'expression de la valeur efficace de la tension  $u_{AB1}$  est donnée par  $U_{AB1} = 0,816 E$ .  
(il est conseillé de faire un simple calcul d'aire).  
En déduire la valeur numérique de  $U_{AB1}$  si  $E = 540 V$ .

3.2.2 Donner les fréquences  $f_1$  et  $f_2$  des tensions  $u_{AB1}$  et  $u_{AB2}$  représentées sur la figure 8.

3.2.3 Comparer les rapports  $U_{AB1}/f_1$  et  $U_{AB2}/f_2$  sachant que la valeur efficace de la tension  $U_{AB2}$  est égale à 220V.  
Quelle est la conséquence de ce type de commande sur l'état magnétique du moteur ?

## 4 MESURE DE PRESSION

Afin d'adapter la vitesse de fonctionnement du moteur à la pression  $P$  du réseau de sortie, on mesure la pression à l'aide d'un capteur de pression PT monté sur le réseau de sortie d'eau. Le pressostat fournit ensuite une tension continue  $U_{PT}$ , image de la pression  $P$ .

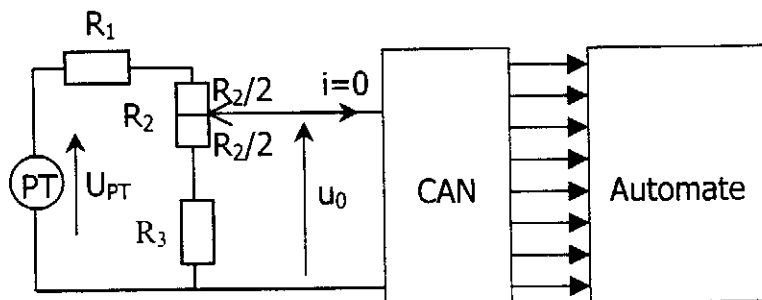


Figure 9

Le convertisseur analogique-numérique utilisé sera considéré comme ayant une résistance d'entrée infinie d'où  $i = 0$ . Pour le pressostat,  $U_{PT} = kP$  avec  $k = 2,0 V \cdot \text{bar}^{-1}$ ; la pression maximale à mesurer est de 10 bars.

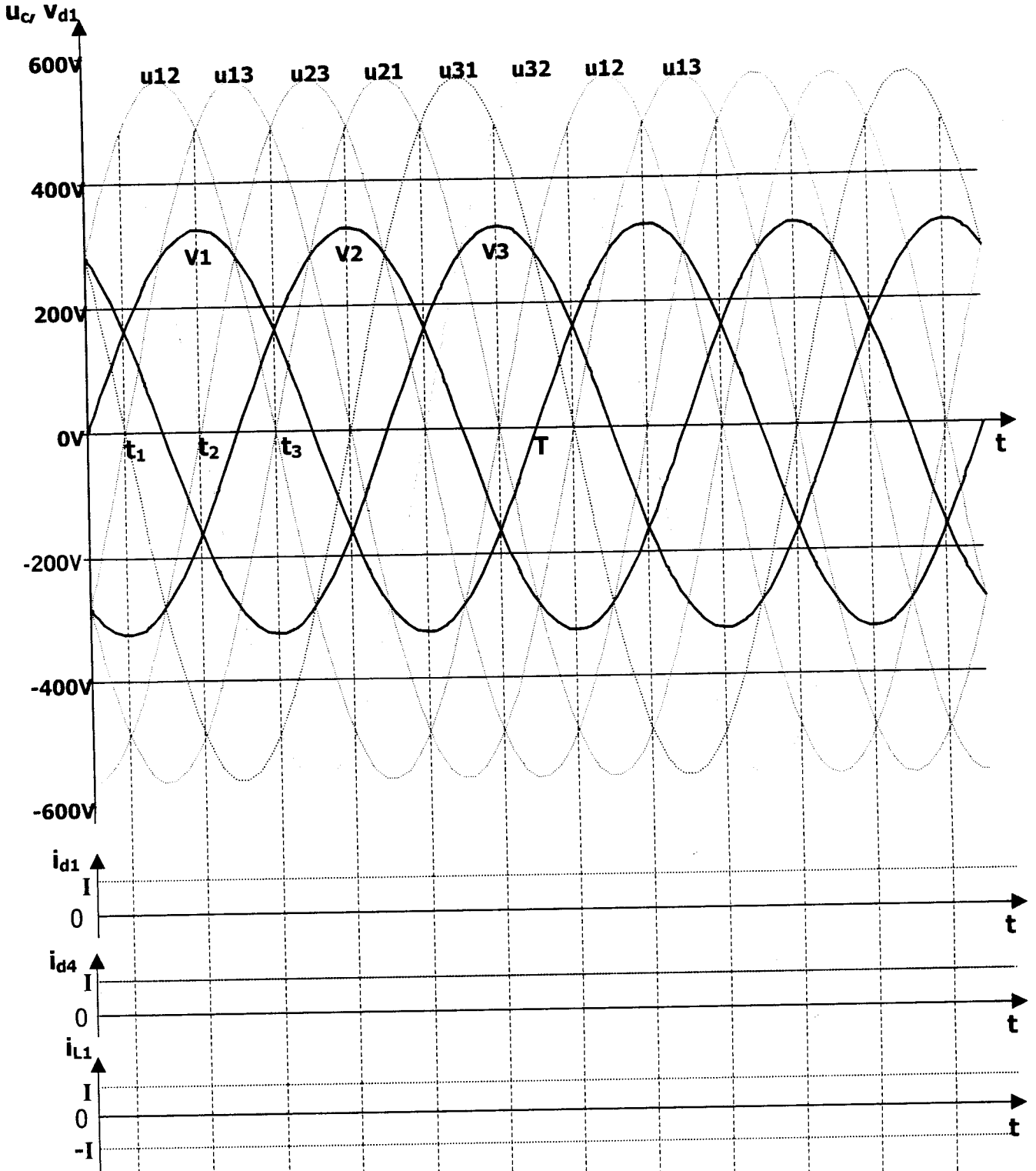
On donne :

$R_2 = 1k\Omega$  et le curseur du potentiomètre est en position médiane.

$R_3 = 1k\Omega$ .

- 4.1 Calculer la valeur à donner à la résistance  $R_1$ , sachant que la tension  $u_0$  appliquée à la carte contrôle du variateur doit être égale à 10V lorsque la pression à mesurer est maximale.
- 4.2 Le convertisseur analogique-numérique doit pouvoir convertir une tension  $u_0$  comprise entre 0 et  $U_{0\max} = 10V$ ; la tension  $u_0$  est codée sur  $n = 8$  bits; on définit la résolution  $r = U_{0\max}/2^n$ . Calculer  $r$  et en déduire la plus petite valeur de la pression que l'on peut mesurer.
- 4.3 La pression  $P$  sur le réseau de sortie d'eau est fixée à 6 bars. Quel sera le mot binaire qui codera la tension  $u_0$  correspondante ?

**Figure 3**



D1	
D2	
D3	
D4	
D5	
D6	

**Figure 3**



Courant  $i_{L1}$

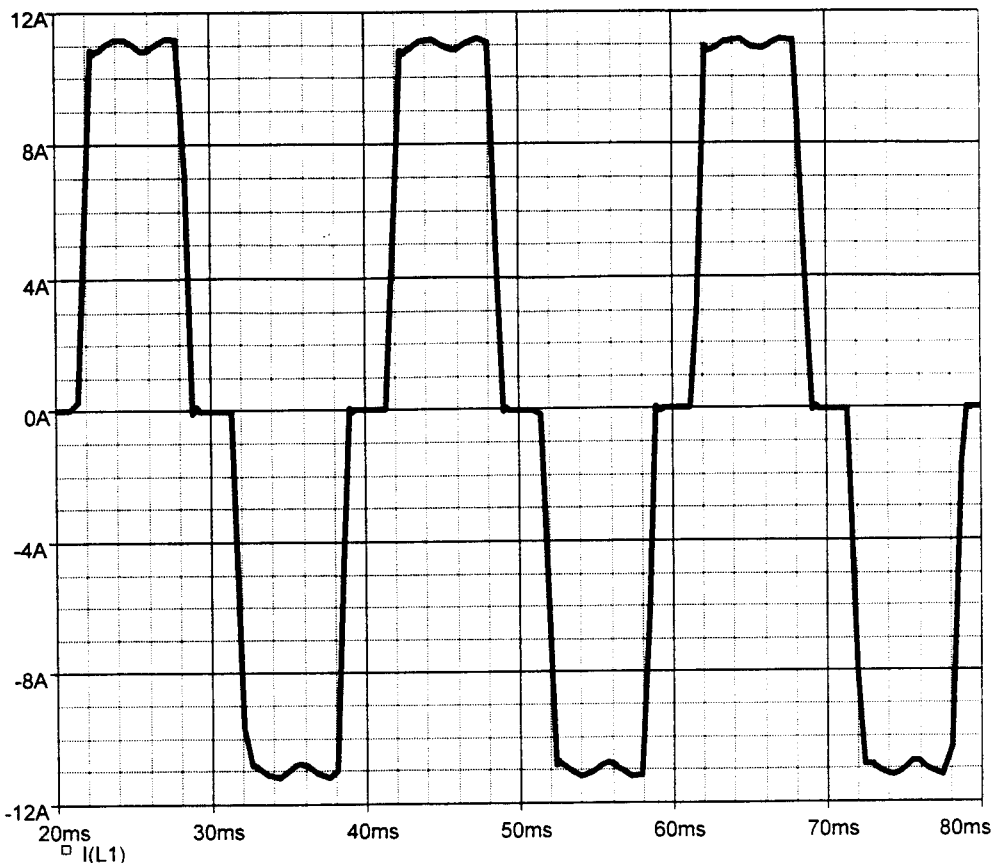


Figure 4

Spectre d'amplitude de  $i_{L1}$  (valeurs maximales)

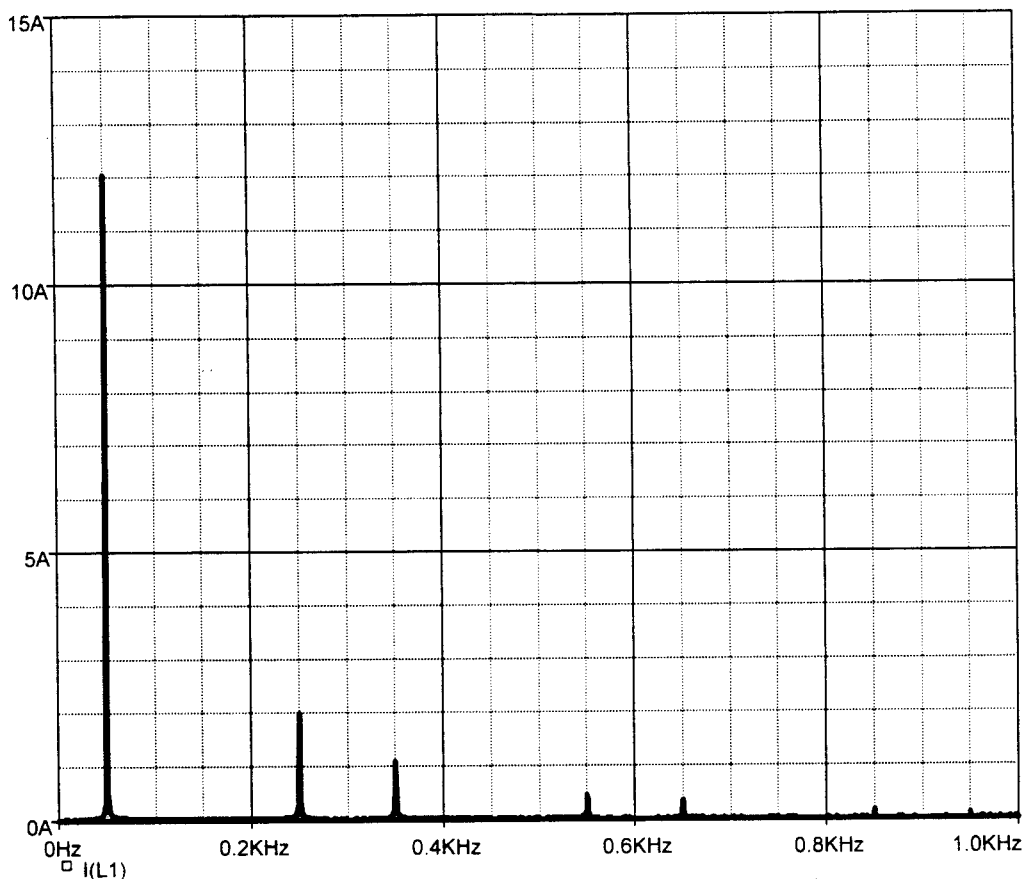
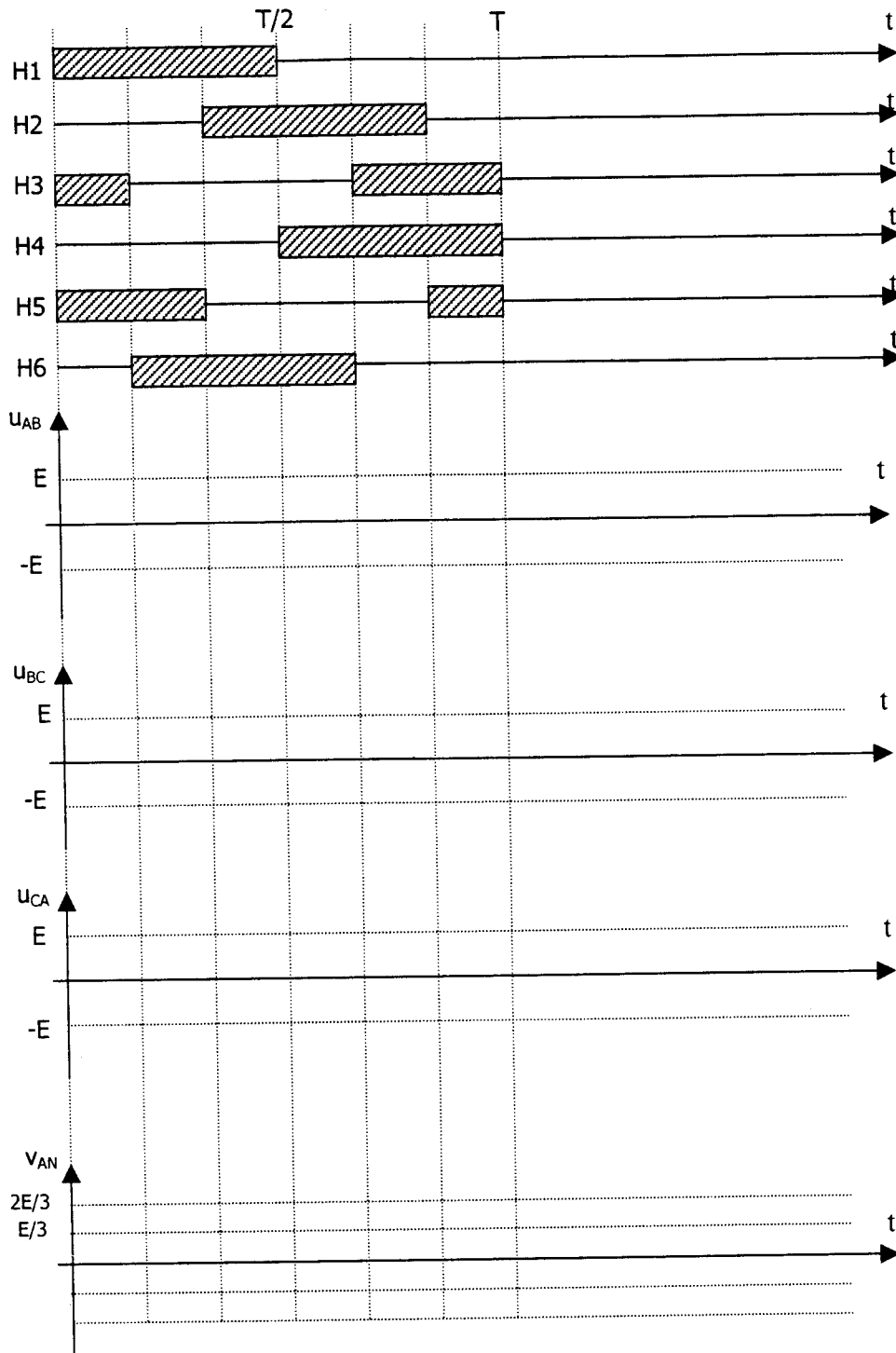


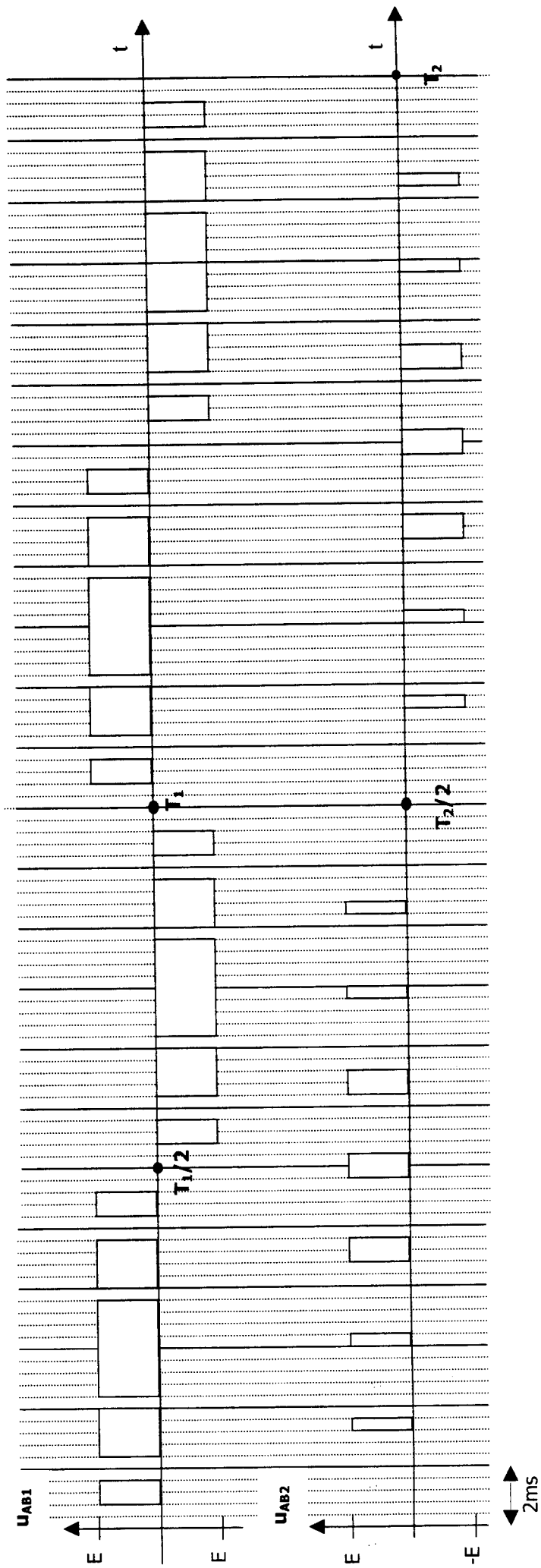
Figure 5

**Document réponse n°2 (Question 3.1)**  
**(à rendre avec la copie)**

Chaque interrupteur est fermé pendant l'intervalle de temps l'intervalle hachuré.



**Figure 7**



**Figure 8**