

**AGREGATION**  
**SESSION 2002**

**CONCOURS INTERNE**

**Section : GENIE ELECTRIQUE**

Option B : ELECTROTECHNIQUE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

**ÉTUDE D'UN PROBLEME D'AUTOMATISATION**

DUREE : 6 HEURES, COEFFICIENT : 1

*Aucun document n'est autorisé.*

*Calculatrice autorisée (conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999)  
Convertisseur en Euro autorisé*

**BAIN DE TREMPE A L'HUILE**

**Ce sujet comporte 4 dossiers distincts :**

📁 Dossier de présentation	(5 pages)
📁 Texte du sujet avec le travail demandé	(20 pages)
📁 Documents annexes	(4 pages)
📁 Documents réponses III-1 et III-2	(6 pages)

Ce sujet comporte quatre parties indépendantes :

Partie I : Modélisation et identification du bain de trempe,

Partie II : Correction du système,

Partie III : Modulation de la puissance de chauffe,

Partie IV : Exploitations pédagogiques.

Ces quatre parties sont à traiter obligatoirement.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police italique et repérées par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

Après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

# **FOUR DE TRAITEMENT THERMIQUE DE TYPE « AICHELIN »**

## **ETUDE DU BAIN DE TREMPE A HUILE**

### **PRESENTATION**

VOIR SUJET OPTION A page 252

### **PARTIE I**

#### **MODELISATION ET IDENTIFICATION DU BAIN DE TREMPE**

VOIR SUJET OPTION A page 257

### **PARTIE II**

#### **CORRECTION DU SYSTEME**

VOIR SUJET OPTION A page 262

## PARTIE III

### MODULATION DE LA PUISSANCE DE CHAUFFE

La puissance totale de chauffe est de  $P_0 = 54 \text{ kW}$ . Les thermoplongeurs sont divisés en deux groupes d'une puissance de  $27 \text{ kW}$ . Un groupe de thermoplongeurs est constitué de 3 éléments chauffants branchés en étoile. Chaque groupe est alimenté par un gradateur triphasé commandé par trains d'ondes. Le point étoile des thermoplongeurs est relié au neutre de l'alimentation  $3 \times 400 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$  (tension composée :  $U = 400 \text{ V}$ ).

La tension simple du réseau a pour expression :

$$v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \quad \text{avec} \quad \theta = \omega \cdot t = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t$$

On désigne par  $f$  et  $T$ , la fréquence et la période du réseau d'alimentation ( $f = 50 \text{ Hz}$ ).

On désigne par  $f_g$  et  $T_g$ , la fréquence et la période de fonctionnement d'un gradateur. Le mode de commande par trains d'ondes d'un gradateur travaille sur  $N = 255$  périodes du réseau d'alimentation. La durée de conduction d'un gradateur est de  $n \cdot T$ .

On désigne par  $\alpha = \frac{n}{N}$  le rapport cyclique de commande d'un gradateur.

Compte-tenu du grand nombre de four dans l'atelier de traitement thermique, on souhaite limiter les effets de flicker. Pour cela les deux gradateurs sont entrelacés. Chaque gradateur possède la même période de travail  $T_g$ , et le même rapport cyclique  $\alpha$ , mais leur commande sont décalées de  $\frac{T_g}{2}$ .

Hypothèses simplificatrices :

- la chute de tension dans le gradateur est négligeable,
- la résistance  $R$  des éléments chauffants est constante.

L'objectif de cette partie, est de montrer les avantages d'une structure à deux gradateurs entrelacés par rapport à l'utilisation d'un seul gradateur pour l'alimentation de l'ensemble des thermoplongeurs.

#### III.A. Modulation de puissance par un seul gradateur

On utilise **un seul gradateur** pour moduler la puissance de chauffe de l'ensemble des thermoplongeurs.

**III.A.1.** Calculer la valeur de la résistance  $R$  d'un élément chauffant.

**III.A.2.** Pour un fonctionnement en pleine onde du gradateur ( $\alpha = 1$ ), calculer la valeur efficace  $I_0$  du courant absorbé par un élément chauffant  $R$ .

**III.A.3.** Etablir l'expression de la valeur efficace  $I_r$  du courant absorbé au réseau  $i_r(t)$  en fonction de  $I_0$  et  $\alpha$ . Application numérique :  $\alpha = 1$ .

**III.A.4.** Etablir l'expression de la valeur du rapport  $\frac{P}{P_0}$ .  $P$  étant la puissance fournie aux thermoplongeurs.

**III.A.5.** Etablir l'expression du facteur de puissance  $F_p$  coté réseau.

La décomposition en série de Fourier de  $i_r(t)$  se calcule par rapport à la fréquence de fonctionnement  $f_g$  du gradateur, et comporte des termes de fréquence  $k \cdot f_g$ .

On désigne par « fondamental » l'harmonique de courant  $i_{r1}(t)$  à la fréquence du réseau d'alimentation  $f$ .

**III.A.6.** Etablir l'expression de la fréquence  $f_g$  du courant  $i_r(t)$  absorbé par le gradateur.

**III.A.7.** Comment appelle t-on les termes de la série de  $i_r(t)$  lorsque  $k \geq N$  ?

Comment appelle t-on les termes de la série de  $i_r(t)$  lorsque  $k < N$  ?

**III.A.8.** Etablir les expressions des coefficients  $A_k$  et  $B_k$  permettant de calculer la valeur de l'amplitude du terme de fréquence  $k.f_g$  de la décomposition en série de Fourier de  $i_r(t)$ .

**III.A.9.** Etablir l'expression de la valeur efficace  $I_{r1}$  du « fondamental » de  $i_r(t)$ , ainsi que son déphasage  $\varphi_1$  par rapport à  $v(t)$ .

**III.A.10.** Etablir l'expression du taux d'harmoniques  $THD_F$  (par rapport au « fondamental ») de  $i_r(t)$ . Montrer qu'il est indépendant de  $N$ .

**III.A.11.** Etablir le bilan des puissances présentes au réseau en référence à la puissance apparente  $S_0$  correspondant au fonctionnement pleine onde du gradateur.

### III.B. Modulation de puissance par deux gradateurs entrelacés

On utilise **deux gradateurs entrelacés** pour moduler la puissance de chauffe de l'ensemble des thermoplongeurs.

**III.B.1.** Pour  $\alpha = 0,25$  et  $\alpha = 0,75$ , établir l'allure de l'enveloppe contenant le courant absorbé par chacun des gradateurs ( $i_g(t)$  et  $i_g'(t)$ ), ainsi que du courant absorbé au réseau d'alimentation  $i_r(t)$ .

On s'intéresse maintenant, uniquement au courant absorbé  $i_r(t)$  par l'ensemble des deux gradateurs.

Pour chacune des questions qui vont suivre :

- il faudra étudier les plages de fonctionnement suivantes :  $0 \leq \alpha \leq 0,5$ , et  $0,5 \leq \alpha \leq 1$ ,
- effectuer les applications numériques pour  $\alpha = 0,25$ , et  $\alpha = 0,75$ .

**III.B.2.** Etablir l'expression de la valeur efficace  $I_r$  du courant  $i_r(t)$  en fonction de  $I_0$  et  $\alpha$ .

**III.B.3.** Etablir l'expression de la valeur efficace  $I_{r1}$  du « fondamental » de  $i_r(t)$ , ainsi que son déphasage  $\varphi_1$ . Comparer cette expression à celle obtenue à la question III.A.9. Conclure.

**III.B.4.** Etablir l'expression du taux d'harmoniques  $THD_F$  (par rapport au « fondamental ») de  $i_r(t)$ .

**III.B.5.** Etablir l'expression de la valeur du rapport  $\frac{P}{P_0}$ .  $P$  étant la puissance fournie aux thermoplongeurs.

**III.B.6.** Etablir le bilan des puissances présentes au réseau en référence à la puissance apparente  $S_0$  correspondant au fonctionnement pleine onde des gradateurs.

**III.B.7.** Etablir l'expression du facteur de puissance  $F_p$  coté réseau.

**III.B.8.** Conclure sur les avantages de la structure entrelacée par rapport au gradateur seul.

## PARTIE IV

### EXPLOITATIONS PEDAGOGIQUES

#### OBJECTIF VISE

L'objectif de cette partie est de construire une séquence de Travaux Pratiques dans le cadre des Essais de Systèmes en deuxième année de BTS ELECTROTECHNIQUE.

L'étude du bain de trempe du four « AICHELIN », servira de contexte industriel à cette séquence.

Pour réaliser la **transposition didactique** de ce système industriel, on se propose d'utiliser un « banc d'étude de la régulation d'un liquide en circulation ».

#### DESCRIPTION DU SUPPORT DIDACTIQUE

Le synoptique général du support didactique est donné à la page suivante.

On dispose d'un bac en inox de forme parallélépipédique. Le volume total d'eau dans le bac et son circuit de refroidissement est de 8,5 litres.

La chauffe du bain est assurée par deux thermoplongeurs triphasés (couplage étoile) d'une puissance nominale de 1,5 kW chacun. Les thermoplongeurs sont alimentés par une unité de puissance de type gradateur monophasé commandé par trains d'ondes.

Un échangeur de chaleur eau/air permet le refroidissement forcé du bain. Le ventilateur est entraîné par un moteur à courant continu de 24 V DC. La circulation de l'eau est assurée par une pompe dont le débit est de  $Q_E = 2,5$  litres/mn.

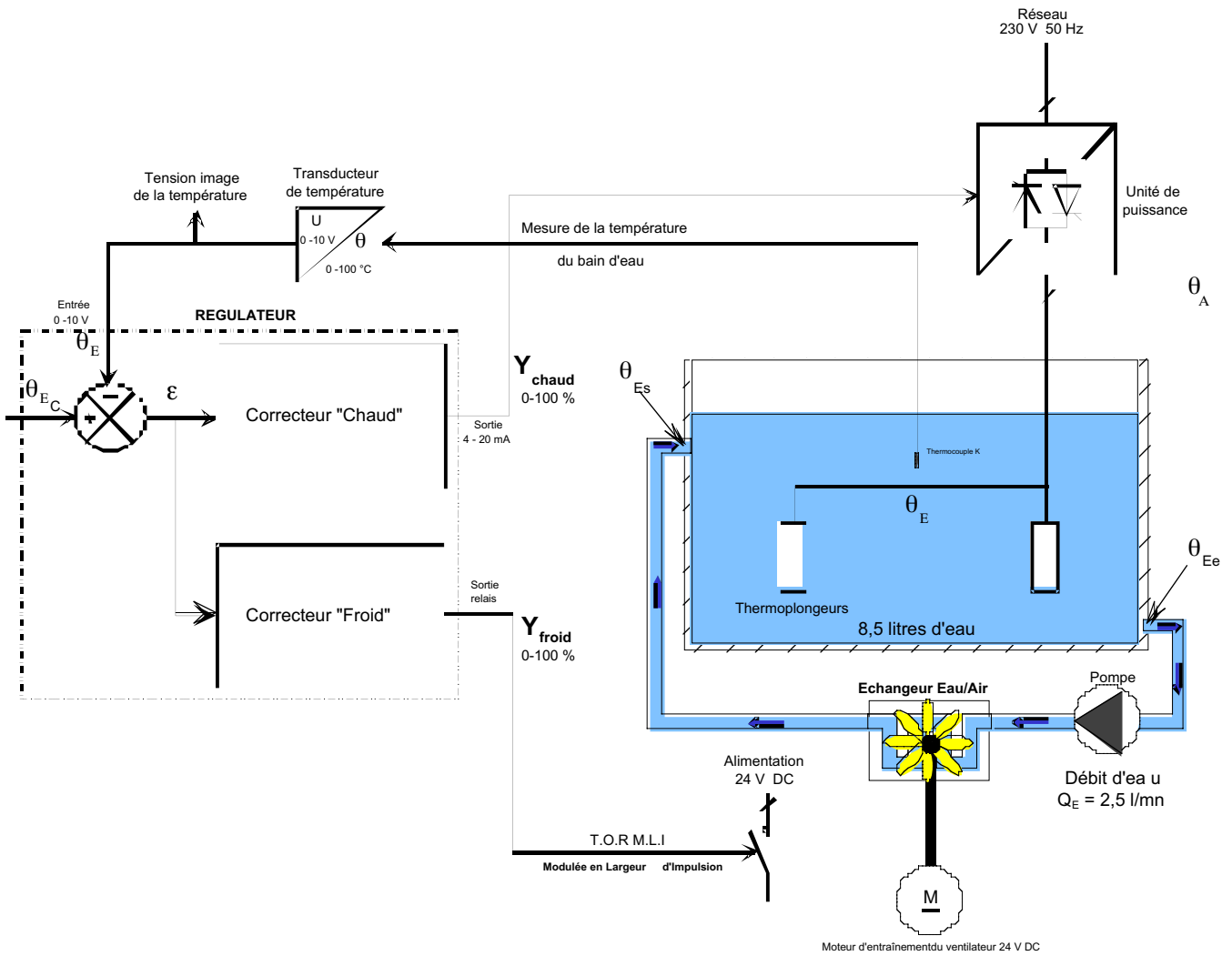
La température de l'eau est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K. Un transducteur de mesure permet de convertir le signal délivré par le capteur en signal normalisé 0 – 10 V pour 0 - 100°C. Ce signal est disponible pour l'entrée mesure du régulateur de température, et pour les appareils de mesure.

Un régulateur de type « chaud-froid » assure la régulation de la température du bain. Son étendue de mesure est de 100°C. Son entrée mesure est de type 0 – 10 V. Il dispose de deux sorties :

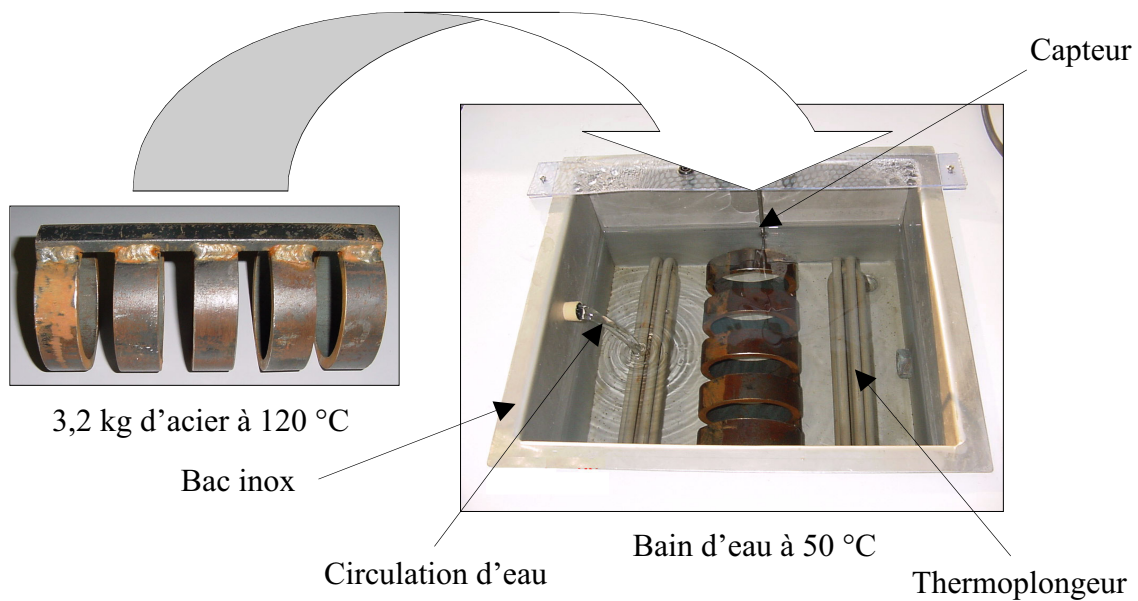
- une sortie « chaude » délivrant un signal normalisé de type 4 - 20 mA pilotant l'unité de puissance,
- une sortie « froide » de type Tout Ou Rien (contact « sec ») pilotant le moteur de l'échangeur eau/air en Modulation de Largeur d'Impulsion (M.L.I.). La période de modulation est de 25 s.

Pour transposer « l'opération de trempe » du contexte industriel, il est prévu d'immerger dans le bain une pièce d'acier de 3,2 kg portée préalablement à une température de 120°C grâce à un four (non étudié).

## Synoptique général du support didactique utilisé



### « Trempe » d'une pièce d'acier dans le bain



## Caractéristiques principales et notations

### - Température de fonctionnement du bain d'eau :

température de consigne .....  $\theta_{EC}$  ..... = 50 °C

### - Eau :

température du bain d'eau .....  $\theta_E$

température à l'entrée du circuit de refroidissement .....  $\theta_{Ee}$

température à la sortie du circuit de refroidissement .....  $\theta_{Es}$

hauteur d'eau dans le bac .....  $h_E$  ..... = 9,5 cm

volume (bain + circuit échangeur) .....  $V_E$  ..... = 8,5 litres

masse volumique .....  $\rho_E$  ..... = 998 kg/m<sup>3</sup>

chaleur massique .....  $C_{pE}$  ..... = 4 180 J/kg.K

### - Bac en acier inox : avec rebord de 20 mm sur tout le contour

longueur x largeur x hauteur .....  $L \times l \times h = 300 \times 265 \times 175$  mm

épaisseur .....  $e_B$  ..... = 2 mm

masse .....  $m_B$  ..... = 4,7 kg

masse volumique .....  $\rho_B$  ..... = 7 800 kg/m<sup>3</sup>

chaleur massique .....  $C_{pB}$  ..... = 501 J/kg.K

### - Pièce d'acier à immerger :

température initiale avant immersion .  $\theta_P$  ..... = 120 °C

masse .....  $m_P$  ..... = 3,2 kg

chaleur massique .....  $C_{pP}$  ..... = 460 J/kg.K

résistance thermique pièce/eau .....  $R_P$  ..... = 0,0075 K/W

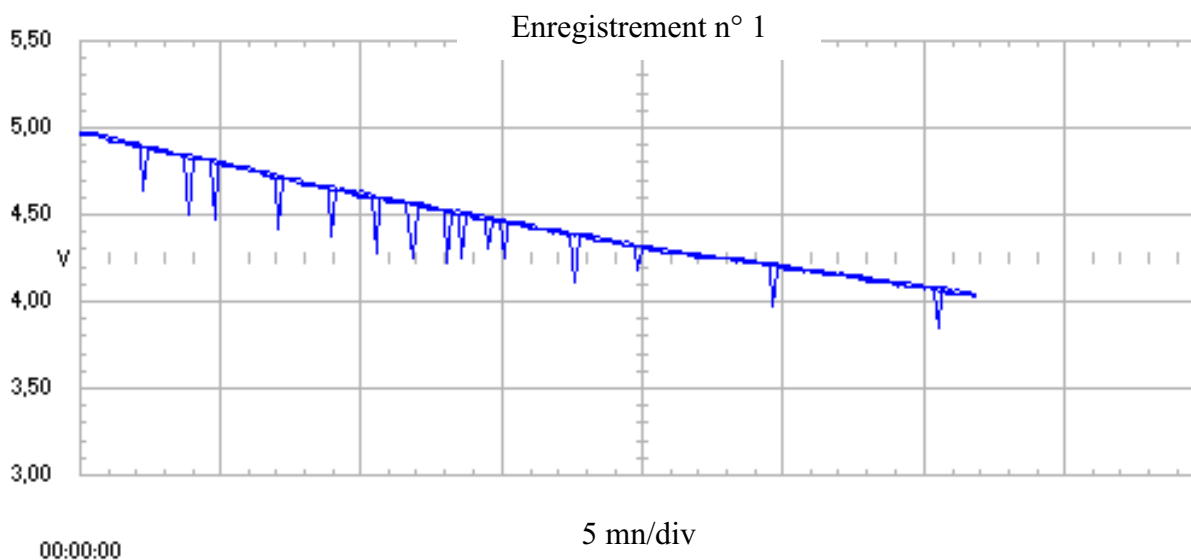
## MESURAGES REALISES SUR LE SUPPORT DIDACTIQUE

### 1 - ESSAIS DE REFROIDISSEMENT :

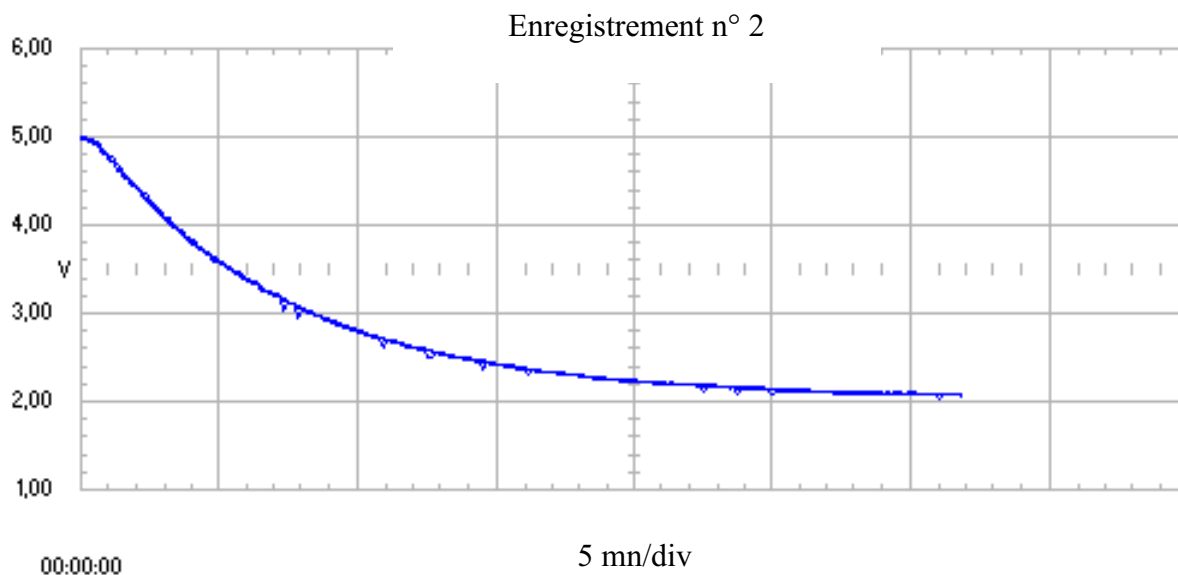
Deux enregistrements en refroidissement ont été réalisés :

Pour une température ambiante de  $\theta_A = 22^\circ\text{C}$ , et une température initiale d'eau de  $\theta_{Ei} = 50^\circ\text{C}$ .

- Enregistrement n° 1 : Action « chaude » à l'arrêt. Eau en circulation. Echangeur eau/air à l'arrêt (Action « froide » à 0 %).



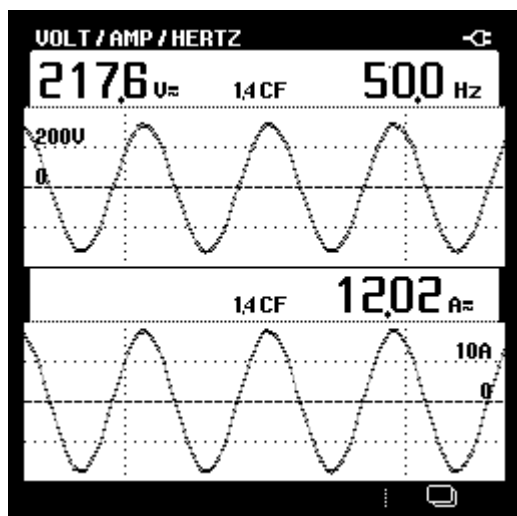
- Enregistrement n° 2 : Action « chaude » à l'arrêt. Eau en circulation. Echangeur eau/air en service (Action « froide » à 100 %).



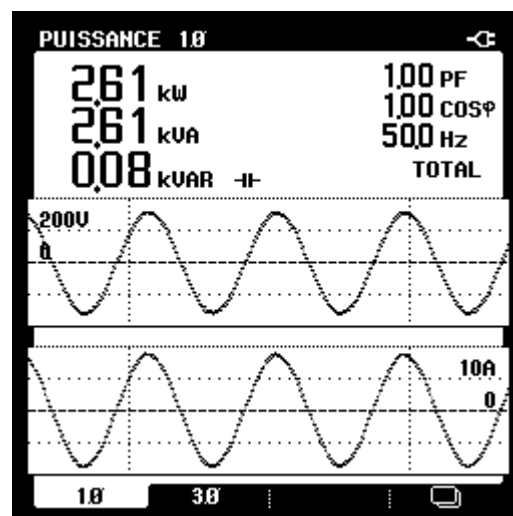
## 2 - ESSAI A PLEINE PUISSANCE DE CHAUFFE :

La grandeur réglante  $Y_{\text{chaud}} = 100\%$  (la puissance de chauffe est maximale).

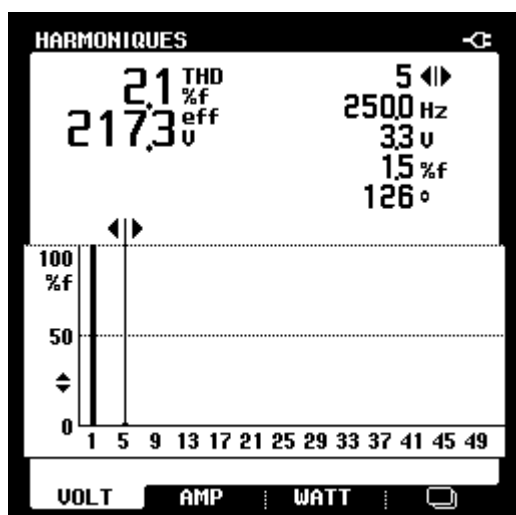
Tension et courant en sortie du gradateur trains d'ondes –  $Y_{\text{chaud}} = 100\%$



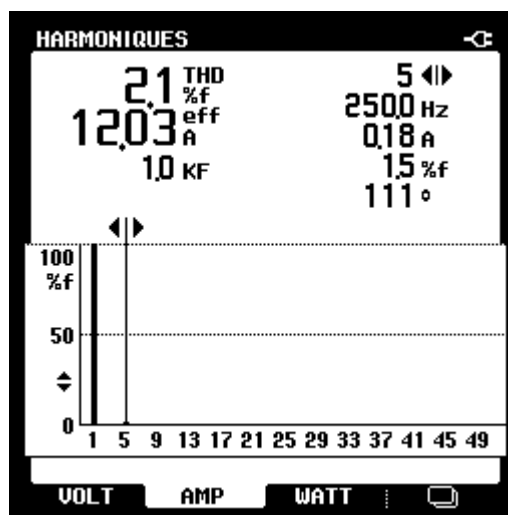
Puissances en sortie du gradateur trains d'ondes –  $Y_{\text{chaud}} = 100\%$



Tension en sortie du gradateur trains d'ondes –  $Y_{\text{chaud}} = 100\%$



Courant en sortie du gradateur trains d'ondes –  $Y_{\text{chaud}} = 100\%$

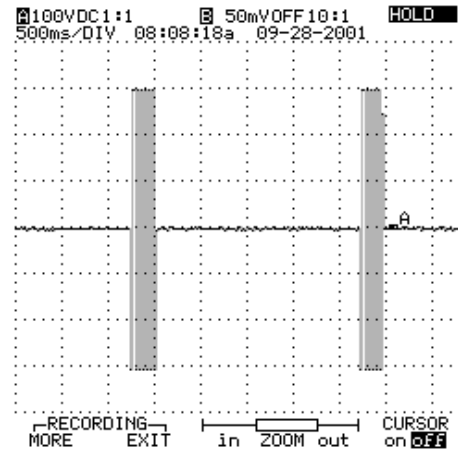


### 3 – REGIMES PERMANENTS :

Le régulateur de température est en mode « manuel ». Les sorties « chaude » et « froide » sont imposées. Après stabilisation du système, les mesures suivantes ont été obtenues :

#### Régime permanent n° 1 :

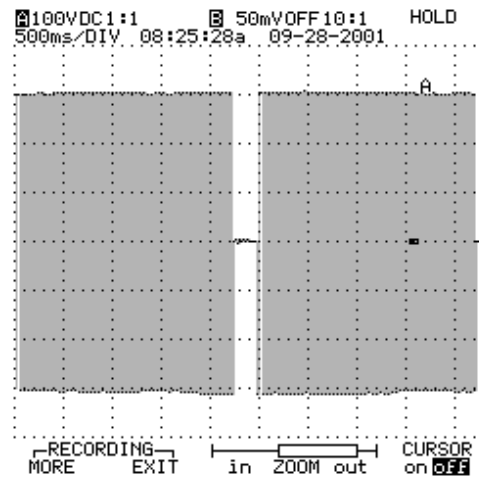
- Température ambiante  $\theta_A = 21^\circ\text{C}$ ,
- Eau en circulation
- Action « chaude »  $Y_{\text{chaud}} = 12\%$ .
- Action « froide »  $Y_{\text{froid}} = 0\%$
- Echangeur eau/air à l'arrêt.
- Température d'eau  $\theta_E = 52,5^\circ\text{C}$ .
- Température d'eau à l'entrée du circuit de refroidissement  $\theta_{Ee} = 53^\circ\text{C}$
- Température d'eau en sortie du circuit de refroidissement  $\theta_{Es} = 52^\circ\text{C}$



Tension en sortie du gradateur trains d'ondes  
 $Y_{\text{chaud}} = 12\%$

#### Régime permanent N°2 :

- Température ambiante  $\theta_A = 22,5^\circ\text{C}$ ,
- Eau en circulation
- Action « chaude »  $Y_{\text{chaud}} = 82\%$ .
- Action « froide »  $Y_{\text{froid}} = 100\%$
- Echangeur eau/air en service.
- Température d'eau  $\theta_E = 52^\circ\text{C}$ .
- Température d'eau à l'entrée du circuit de refroidissement  $\theta_{Ee} = 52,5^\circ\text{C}$
- Température d'eau en sortie du circuit de refroidissement  $\theta_{Es} = 41^\circ\text{C}$



Tension en sortie du gradateur trains d'ondes  
 $Y_{\text{chaud}} = 82\%$

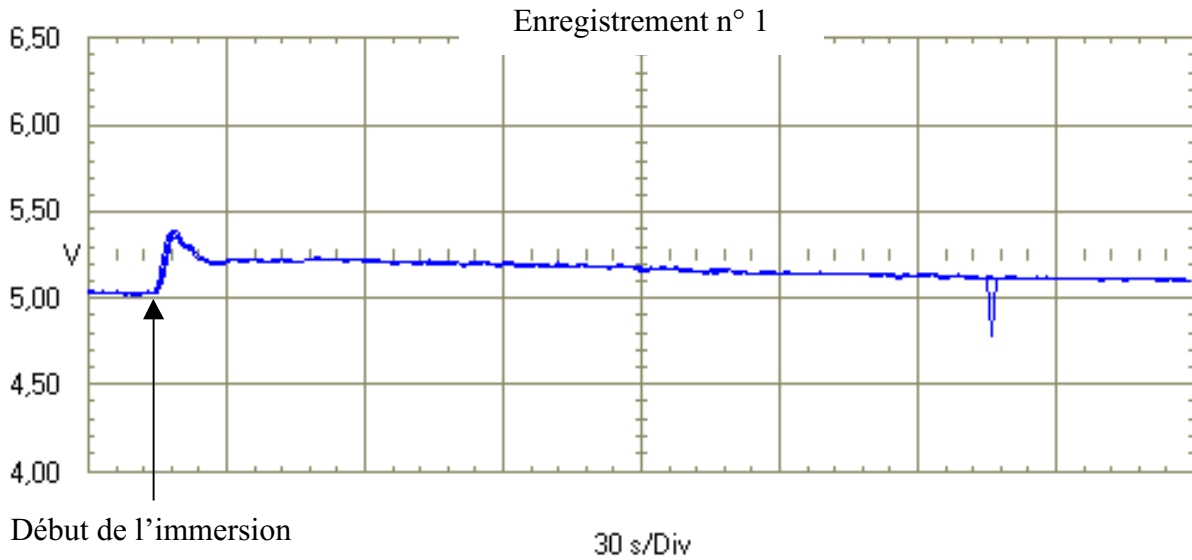
#### 4 – « TREMPE » D'UNE PIÈCE D'ACIER :

Pour transposer « l'opération de trempe » du contexte industriel, une pièce d'acier de 3,2 kg portée préalablement à une température de 120°C grâce à un four, est immergée dans le bain (voir la photographie).

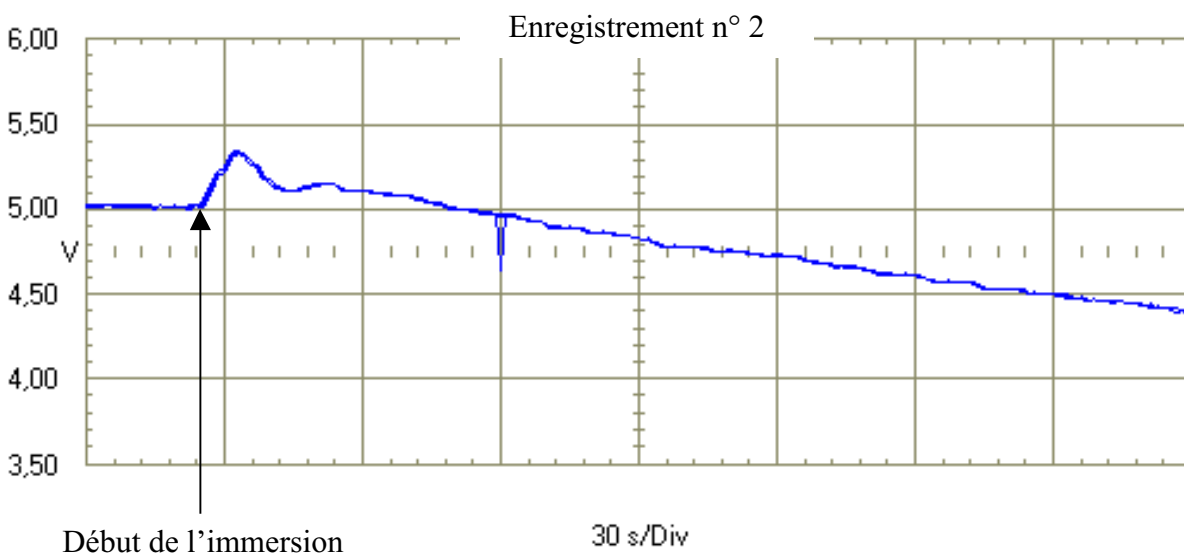
Deux enregistrements ont été réalisés :

Pour une température ambiante de  $\theta_A = 23^\circ\text{C}$ , une température initiale d'eau de  $\theta_{Ei} = 50^\circ\text{C}$ , et une température initiale de la pièce de  $\theta_{Pi} = 120^\circ\text{C}$ .

- Enregistrement n° 1 : Action « chaude » à l'arrêt (0 %). Eau en circulation. Echangeur eau/air à l'arrêt (Action « froide » à 0 %).



- Enregistrement n° 2 : Action « chaude » à l'arrêt (0 %). Eau en circulation. Echangeur eau/air en service (Action « froide » à 100 %).



## TRAVAIL DEMANDE

On souhaite établir un texte de Travaux Pratiques (T.P.) utilisant le support didactique précédemment décrit. On vous précise :

- le niveau de formation choisi : seconde année de BTS ELECTROTECHNIQUE,
- le secteur d'activité choisi : Laboratoire d'Essais de Systèmes.

### IV.A. Calculs préparatoires :

**IV.A.1.** *A partir des caractéristiques du support didactique, des mesurages réalisés, et pour une température de travail de  $\theta_E \approx 50^\circ\text{C}$  :*

- *Etablir le bilan des capacités thermiques mises en jeu,*
- *Etablir le bilan des déperditions thermiques présentes au niveau du bain,*
- *En déduire les résistances thermiques correspondantes,*
- *Montrer les effets du fonctionnement de l'échangeur de chaleur eau/air sur celles-ci.*

**IV.A.2.** *Etablir les schémas équivalents au bain (par analogie électrique), pour un fonctionnement à 0 et 100 % de l'échangeur eau/air.*

### IV.B. Texte du Travaux Pratiques :

Les objectifs terminaux du T.P. sont les suivants :

- *Etablir le bilan des puissances mises en jeu au niveau du bain durant une phase de montée, puis de maintien à une température constante. Justifier la puissance de chauffe installée en rapport avec le cahier des charges du système.*
- *Choisir et régler les paramètres d'action des correcteurs du régulateur de température en rapport avec les performances attendues du système.*

**IV.B.1.** *Compte tenu des objectifs visés, établir une partie du texte du sujet d'Essais de Systèmes.*

*Vous devez préciser très clairement :*

- *le **cahier des charges** retenu pour ce T.P. Enoncer les conditions de fonctionnement souhaitées, et les **performances attendues** du système régulé,*
- *le travail préparatoire demandé aux étudiants,*
- *les conditions de déroulement du T.P. Définir la démarche pédagogique, et la chronologie des différentes étapes du T.P.,*
- *les essais et mesurages nécessaires. Les appareils de mesure utilisés,*
- *l'exploitation des mesurages et les conclusions. Définir les indicateurs d'évaluation permettant de valider les compétences visées.*

# ELEMENTS DE CORRIGE

## PARTIE III

### MODULATION DE LA PUISSANCE DE CHAUFFE

#### III.A. Modulation de puissance par un seul gradateur

$$\text{III.A.1. } R = \frac{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{P}{6}} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{54 \cdot 10^3}{6}} = 5,926 \Omega$$

$$\text{III.A.2. } i_R(\theta) = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{R} \cdot \sin \theta \quad \text{avec } \theta = \omega t = \frac{2\pi}{T} \cdot t \quad \text{et } V = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad I_0 = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot R} = 38,97 \text{ A}$$

$$\text{III.A.3. } I_r = \sqrt{\frac{1}{2\pi \cdot N} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} (2 \cdot i_R(\theta))^2 \cdot d\theta} = 2 \cdot \frac{U}{\sqrt{3} \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{n}{N}} = 2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot I_0 \quad I_r = 77,94 \text{ A pour } \alpha = 1$$

$$\text{III.A.4. } \frac{P}{P_0} = \frac{2 \cdot \left(3 \cdot R \cdot \left(\frac{I_r}{2}\right)^2\right)}{2 \cdot \left(3 \cdot R \cdot I_0^2\right)} = \alpha$$

$$\text{III.A.5. } F_p = \frac{P}{S} = \frac{2 \cdot \left(3 \cdot R \cdot \left(\frac{I_r}{2}\right)^2\right)}{3 \cdot V \cdot I_r} = \sqrt{\alpha}$$

$$\text{III.A.6. } f_g = \frac{f}{N}$$

III.A.7. Pour que  $k \cdot f_g = k \cdot \frac{f}{N}$  soit égale à  $f$ , il faut que  $k = N$ .

Le « fondamental » est l'harmonique de rang  $k = N$ .

Les termes en  $k \geq N$  sont appelés : harmoniques

Les termes en  $k < N$  sont appelés : sous-harmoniques.

III.A.8. Décomposition en série de Fourier de  $i_r(t)$  par rapport à la fréquence  $f_g$  (période  $T_g = N \cdot T$ )

$$A_k = \frac{1}{N \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} 2 \cdot I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \sin \frac{k \cdot \theta}{N} \cdot d\theta \quad \text{et} \quad B_k = \frac{1}{N \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} 2 \cdot I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \cos \frac{k \cdot \theta}{N} \cdot d\theta$$

III.A.9. Le « fondamental » est l'harmonique de rang  $k = N$ .

$$A_{k=N} = \frac{1}{N \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} 2 \cdot I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \sin \frac{N \cdot \theta}{N} \cdot d\theta = \frac{1}{N \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} 2 \cdot I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin^2 \theta \cdot d\theta = 2 \cdot \alpha \cdot I_0 \cdot \sqrt{2}$$

et

$$B_{k=N} = \frac{1}{N \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} 2 \cdot I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \cos \frac{N \cdot \theta}{N} \cdot d\theta = 0$$

$$\text{d'où } I_{r1} = 2 \cdot \alpha \cdot I_0 \quad \text{et} \quad \varphi_1 = \arctg \frac{B_{k=N}}{A_{k=N}} = 0$$

$$\text{III.A.10. THD}_F = \frac{\sqrt{I_r^2 - I_{r1}^2}}{I_{r1}} = \sqrt{\frac{I_r^2 - I_{r1}^2}{I_{r1}^2}} = \sqrt{\left(\frac{I_r}{I_{r1}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot I_0}{\alpha \cdot 2 \cdot I_0}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{1 - \alpha}{\alpha}}$$

$$\text{III.A.11. } S_0 = 3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0$$

$$\text{La puissance apparente : } \frac{S}{S_0} = \frac{3 \cdot V \cdot I_r}{3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0} = \sqrt{\alpha}$$

$$\text{La puissance active : } \frac{P}{S_0} = \frac{2 \cdot \left(3 \cdot R \cdot \left(\frac{I_r}{2}\right)^2\right)}{3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0} = \alpha \quad \text{ou} \quad \frac{P}{S_0} = \frac{3 \cdot V \cdot I_{r1} \cdot \cos \varphi_1}{3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0} = \alpha \quad \text{car } \varphi_1 = 0$$

$$\text{La puissance réactive définie pour le seul fondamental : } \frac{Q}{S_0} = 0 \quad \text{car } \varphi_1 = 0$$

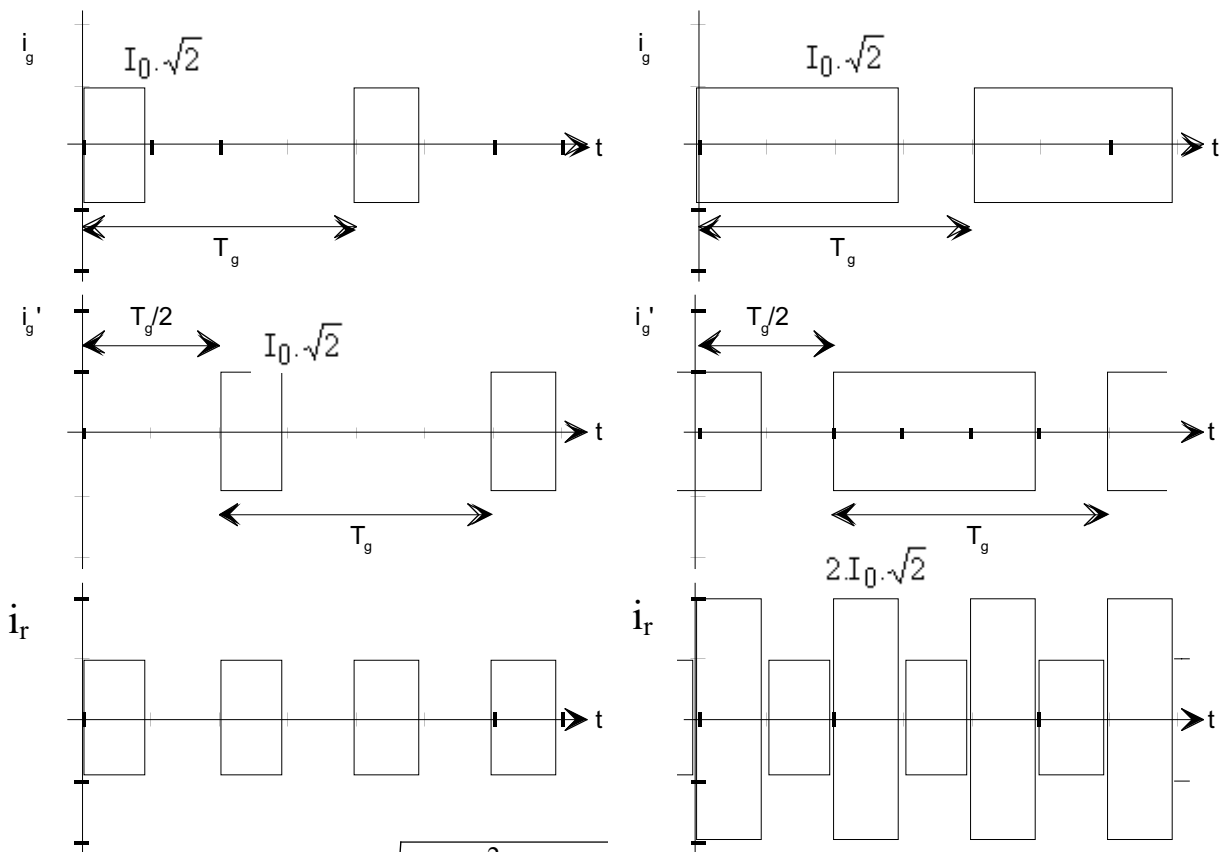
$$\text{La puissance déformante : } \frac{D}{S_0} = \frac{\sqrt{S^2 - P^2}}{S_0} = \sqrt{\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - \left(\frac{P}{S_0}\right)^2} = \sqrt{\alpha - \alpha^2} = \sqrt{\alpha(1 - \alpha)}$$

### III.B. Modulation de puissance par deux gradateurs entrelacés

#### III.B.1.

$$\alpha = 0,25$$

$$\alpha = 0,75$$



$$\text{III.B.2. Pour } 0 \leq \alpha \leq 0,5 : I_r = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot N} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi \cdot n} i_R(\theta)^2 \cdot d\theta} = \sqrt{2 \cdot \alpha} \cdot I_0$$

$$I_r = 27,55 \text{ A pour } \alpha = 0,25.$$

Pour  $0,5 \leq \alpha \leq 1$  :

$$I_r = \sqrt{\frac{2}{2\pi N} \left( \int_0^{2\pi n - 2\pi N/2} (2i_R(\theta))^2 d\theta + \int_{2\pi n - 2\pi N/2}^{2\pi N/2} i_R(\theta)^2 d\theta \right)} = \sqrt{2(3\alpha - 1)} \cdot I_0$$

$I_r = 61,61 \text{ A}$  pour  $\alpha = 0,75$ .

**III.B.3.** Pour  $0 \leq \alpha \leq 0,5$  :  $A_k = \frac{2}{N\pi} \cdot \int_0^{2\pi n} I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \sin \frac{k\theta}{N} d\theta$  et

$$B_k = \frac{2}{N\pi} \cdot \int_0^{2\pi n} I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \cos \frac{k\theta}{N} d\theta$$

Pour  $0,5 \leq \alpha \leq 1$  :  $A_k = \frac{2}{N\pi} \left( \int_0^{2\pi n - 2\pi N/2} 2I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \sin \frac{k\theta}{N} d\theta + \int_{2\pi n - 2\pi N/2}^{2\pi N/2} I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \sin \frac{k\theta}{N} d\theta \right)$

et

$$B_k = \frac{2}{N\pi} \left( \int_0^{2\pi n - 2\pi N/2} 2I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \cos \frac{k\theta}{N} d\theta + \int_{2\pi n - 2\pi N/2}^{2\pi N/2} I_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \theta \cdot \cos \frac{k\theta}{N} d\theta \right)$$

Le « fondamental » est l'harmonique de rang  $k = N$ .

$A_{k=N} = 2\alpha \cdot I_0 \cdot \sqrt{2}$  et  $B_{k=N} = 0$  quelque soit la plage de variation de  $\alpha$ .

d'où  $I_{r1} = 2\alpha \cdot I_0$  et  $\varphi_1 = \arctg \frac{B_{k=N}}{A_{k=N}} = 0$

Valeur identique à celle de la question III.A.9. , car seul le « fondamental » du courant transporte la puissance active.

**III.B.4.** Pour  $0 < \alpha < 0,5$  :  $\text{THD}_F = \sqrt{\left(\frac{I_r}{I_{r1}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{1}{2\alpha} - 1} = 100\%$  pour  $\alpha = 0,25$ .

Pour  $0,5 < \alpha < 1$  :  $\text{THD}_F = \sqrt{\left(\frac{I_r}{I_{r1}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\frac{(3\alpha - 1)}{2\alpha^2} - 1} = 33\%$  pour  $\alpha = 0,75$ .

**III.B.5.**  $\frac{P}{P_0} = \frac{3 \cdot V \cdot I_{r1} \cdot \cos \varphi_1}{2 \cdot (3 \cdot R \cdot I_0^2)} = \alpha$

**III.B.6.**  $S_0 = 3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0$

La puissance apparente :

Pour  $0 \leq \alpha \leq 0,5$  :  $\frac{S}{S_0} = \frac{3 \cdot V \cdot I_r}{3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0} = \sqrt{\frac{\alpha}{2}} = 0,35$  pour  $\alpha = 0,25$ .

Pour  $0,5 \leq \alpha \leq 1$  :  $\frac{S}{S_0} = \frac{3 \cdot V \cdot I_r}{3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0} = \frac{\sqrt{2(3\alpha - 1)}}{2} = 0,79$  pour  $\alpha = 0,75$ .

La puissance active :  $\frac{P}{S_0} = \frac{3 \cdot V \cdot I_{r1} \cdot \cos \varphi_1}{3 \cdot V \cdot 2 \cdot I_0} = \alpha$  car  $\varphi_1 = 0$

La puissance réactive définie pour le seul fondamental :  $\frac{Q}{S_0} = 0$  car  $\varphi_1 = 0$

La puissance déformante :

$$\text{Pour } 0 \leq \alpha \leq 0,5 : \frac{D}{S_0} = \sqrt{\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - \left(\frac{P}{S_0}\right)^2} = \sqrt{\frac{\alpha(1-\alpha)}{2}} = 0,306 \text{ pour } \alpha = 0,25.$$

$$\text{Pour } 0,5 \leq \alpha \leq 1 : \frac{D}{S_0} = \sqrt{\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - \left(\frac{P}{S_0}\right)^2} = \sqrt{\frac{3\alpha-1}{2} - \alpha^2} = 0,25 \text{ pour } \alpha = 0,75.$$

**III.B.7.** Pour  $0 \leq \alpha \leq 0,5$  :  $F_P = \frac{P}{S} = \frac{3.V.I_{r1}}{3.V.I_r} = \sqrt{2\alpha} = 0,707$  pour  $\alpha = 0,25$ .

Pour  $0,5 \leq \alpha \leq 1$  :  $F_P = \frac{P}{S} = \frac{3.V.I_{r1}}{3.V.I_r} = \frac{2\alpha}{\sqrt{2(3\alpha-1)}} = 0,948$  pour  $\alpha = 0,75$ .

**III.B.8.** Tableau comparatif :

	Un seul gradateur		Deux gradateurs entrelacés	
	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,75$	$\alpha = 0,25$	$\alpha = 0,75$
$I_r$ (A)	38,97	67,49	27,55	61,61
$I_{r1}$ (A)	19,48	58,45	19,48	58,45
THD <sub>F</sub> (%)	173	57,7	100	33
$P/P_0$	0,25	0,75	0,25	0,75
$F_P$	0,5	0,866	0,707	0,948

Pour un même taux de modulation de puissance  $\frac{P}{P_0}$  : amélioration du facteur de puissance, diminution du courant en ligne et du taux d'harmoniques...

# ELEMENTS DE CORRIGE

## PARTIE IV

### EXPLOITATIONS PEDAGOGIQUES

**IV.A.1.** Capacité thermique de l'eau :  $C_E = \rho_E \cdot v_E \cdot Cp_E = 998 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 4180 = 35\,459 \text{ J/K}$

Capacité thermique du bac :  $C_B = m_B \cdot Cp_B = 4,7 \cdot 501 = 2\,355 \text{ J/K}$

D'où la capacité thermique totale :  $C_{th} = C_E + C_B = 37\,814 \text{ J/K}$

Equation d'un refroidissement :

- retard pur T d'environ 35 s, suivi d'un premier ordre d'équation :  $\theta_E(t) = (\theta_{Ei} - \theta_A) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_A$  avec  $\tau = R_{th} \cdot C_{th}$ ,  $R_{th}$  étant la résistance thermique globale du bain.

La pente de décroissance est  $\left(\frac{d\theta_E(t)}{dt}\right)_{t=0} = -\frac{(\theta_{Ei} - \theta_A)}{\tau}$  d'où  $\tau = -\frac{(\theta_{Ei} - \theta_A)}{\left(\frac{d\theta_E(t)}{dt}\right)_{t=0}}$

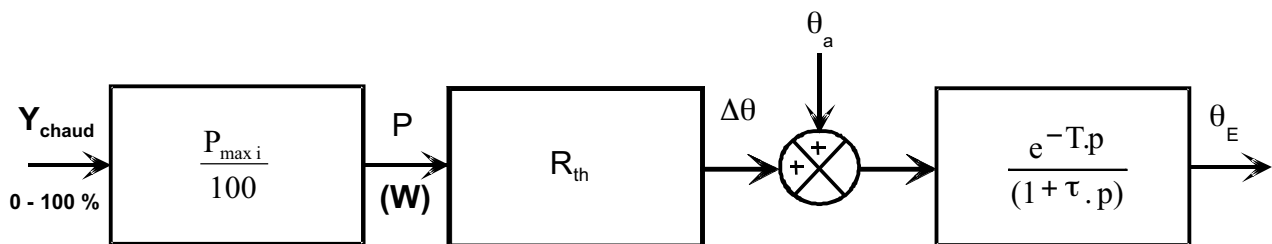
Pour l'enregistrement n° 1 :  $\tau_1 = -\frac{(50 - 22)}{\left(\frac{-15}{2310}\right)} = 4312 \text{ s} = 72 \text{ mn}$

D'où la résistance thermique du bain avec l'échangeur à l'arrêt :  $R_{th1} = \frac{\tau_1}{C} = \frac{4312}{37814} = 0,114 \text{ K/W}$

Pour l'enregistrement n° 2 :  $\tau_2 = -\frac{(50 - 22)}{\left(\frac{-40}{750}\right)} = 525 \text{ s} = 8,75 \text{ mn}$

D'où la résistance thermique du bain avec l'échangeur à l'arrêt :  $R_{th2} = \frac{\tau_2}{C} = \frac{525}{37814} = 0,0139 \text{ K/W}$

Compte tenu des relevés obtenus, on peut adopter le schéma bloc suivant :



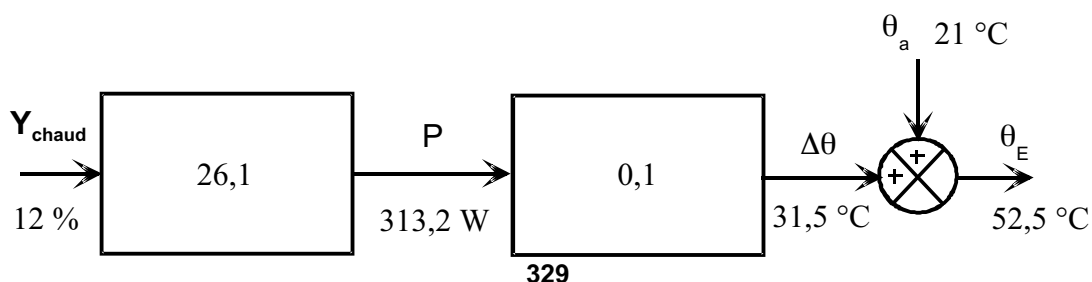
Pour  $Y_{chaud} = 100 \%$ , la puissance absorbée par les thermoplongeurs est de 2 610 W. Le gain statique du gradateur est donc de  $G_H = \frac{2610}{100} = 26,1$ .

La puissance fournie aux thermoplongeurs se calcule par :  $P = G_H \cdot Y$

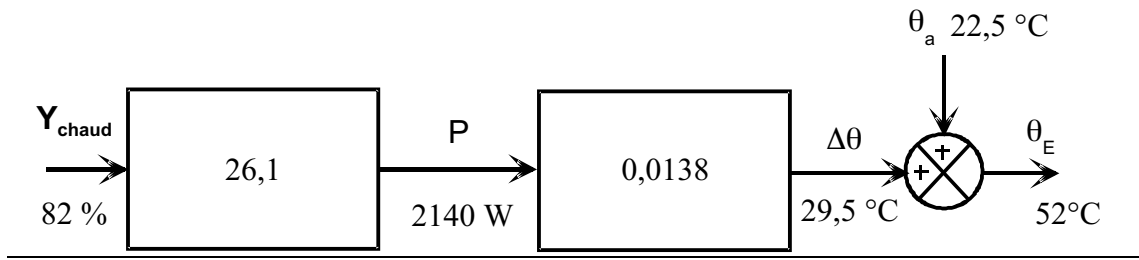
La résistance thermique globale se calcule en régime permanent par :  $R_{th} = \frac{\theta_E - \theta_a}{P}$

**IV.A.2.** D'où les schémas blocs suivants :

Régime permanent n° 1 :



Régime permanent n° 2 :



**Bilan des puissances :** pour une température de bain  $\theta_E \approx 50 \text{ °C}$

Le régime permanent n° 1 ( $Y_{\text{chaud}} = 12 \%$  - échangeur à l'arrêt) permet de déterminer la puissance perdue dans le circuit de refroidissement lorsque l'échangeur est à l'arrêt. La chute de température dans le circuit de refroidissement est de  $1 \text{ °C}$ .

La puissance perdue correspondante est de :  $P_{\text{circulation d'eau}} = \rho_E \cdot Q_E \cdot C_{pE} \cdot (\theta_{Es} - \theta_{Ee})$

$$P_{\text{circulation d'eau}} = 998 \cdot \left( \frac{2,5 \cdot 1000}{60} \right) \cdot 4180 \cdot (53 - 52) = 173,8 \text{ W}$$

Déperditions par convection du bain :

$$D_{\text{bain}} = P_{\text{thermoplongeur}} - P_{\text{circulation d'eau}} = 313,2 - 173,8 = 139,4 \text{ W}$$

Le régime permanent n° 2 ( $Y_{\text{chaud}} = 82 \%$  - échangeur à 100 %) permet de déterminer la puissance perdue dans le circuit de refroidissement lorsque l'échangeur est à 100 %. La chute de température dans le circuit de refroidissement est de  $11,5 \text{ °C}$ .

La puissance perdue correspondante est de :  $P_{\text{circulation d'eau + échangeur}} = \rho_E \cdot Q_E \cdot C_{pE} \cdot (\theta_{Es} - \theta_{Ee})$

$$P_{\text{circulation d'eau + échangeur}} = 998 \cdot \left( \frac{2,5 \cdot 1000}{60} \right) \cdot 4180 \cdot (52,5 - 41) = 1\,999 \text{ W}$$

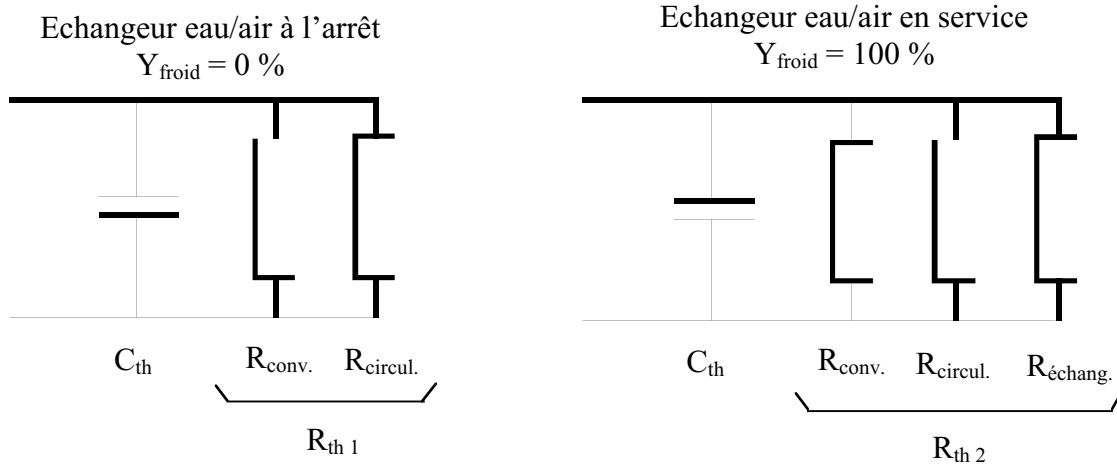
La puissance « froide » due au fonctionnement de l'échangeur est de :

$$P_{\text{échangeur}} = P_{\text{circulation d'eau + échangeur}} - P_{\text{circulation d'eau}} = 1999 - 173,8 = 1825,2 \text{ W}$$

On retrouve bien la puissance absorbée par les thermoplongeurs :

$$P_{\text{thermoplongeur}} = P_{\text{échangeur}} + P_{\text{circulation d'eau}} + D_{\text{bain}} = 1825,2 + 173,8 + 139,4 = 2\,138,4 \text{ W}$$

Schémas équivalents au bain (par analogie électrique) :



$$R_{\text{conv.}} = \frac{(\theta_E - \theta_a)}{D_{\text{bain}}} = \frac{(52,5 - 21)}{139,4} = 0,226 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{circul.}} = \frac{(\theta_E - \theta_a)}{P_{\text{circulation}}} = \frac{(52,5 - 21)}{173,8} = 0,181 \text{ K/W}$$

d'où  $R_{\text{th1}} = 0,1 \text{ K/W}$  (résultat quasi identique à celui obtenu à partir de l'enregistrement en refroidissement. Voir plus haut).

$$R_{\text{échang.}} = \frac{(\theta_E - \theta_a)}{P_{\text{échang.}}} = \frac{(52 - 22,5)}{1825,2} = 0,0161 \text{ K/W}$$

d'où  $R_{\text{th2}} = 0,0139 \text{ K/W}$  (résultat identique à celui obtenu à partir de l'enregistrement en refroidissement. Voir plus haut)

#### IV.B.1. Texte du Travaux Pratiques :

## ESSAIS DE SYSTEMES

<b>Niveau de formation</b>	: B.T.S. ELECTROTECHNIQUE – 2 <sup>nd</sup> année
<b>Lieu d'activité</b>	: LABORATOIRE D'ESSAIS DE SYSTEMES
<b>Conditions</b>	: par trinôme durant 5 h

### REALITE INDUSTRIELLE

## Four de traitement thermique – Bain de trempe à huile

### SUPPORT DIDACTIQUE

## Régulation chaud/froid d'un bain

#### Objectifs du TP :

- IDENTIFIER les différentes fonctions à assurer au sein d'un système asservis,
- JUSTIFIER le choix des équipements assurant la gestion d'énergie,
- IDENTIFIER et DETERMINER les différents gains du système,
- EXPERIMENTER des méthodes d'identification pour DETERMINER les paramètres caractérisant le système thermique à réguler. ETABLIR le modèle équivalent au système,
- DETERMINER les paramètres de correction du régulateur de température,
- VALIDER au moyen d'essais et de mesurages les performances attendues du système asservis par rapport au cahier des charges du système.

#### Acquis préalables nécessaires au TP :

- Physique appliquée :
  - Asservissements linéaires,
  - Conversion alternatif/alternatif : gradateurs monophasés.
- Génie électrique :
  - Instrumentation (capteurs et convertisseurs de mesures)
- Systèmes asservis : identification et réglage des processus industriels,
  - Choix et mise en œuvre d'un module de puissance de type gradateur.

#### Equipements :

On donne :

- Le support didactique : « banc d'étude de la régulation d'un liquide en circulation » + doc.
- Gradateur monophasé trains d'ondes + documentation technique.
- Régulateur de température de type Chaud/froid + logiciel de paramétrage + doc.
- Abaques de régulation.
- Appareils de mesure : oscilloscope à mémoire, enregistreur 2 voies, multimètre, énergiètre.

# 1 – CAHIER DES CHARGES

**PERFORMANCES VISEES** : à partir d'une température ambiante de 20 °C

- température de consigne du bain :  $\theta_{bc} = 50$  °C,
- précision en régime permanent : erreur statique nulle,
- temps de montée en température du bain : 20 mn,
- performances en « asservissement » (échelon de consigne), et en « régulation » (échelon de perturbation) : 1<sup>er</sup> dépassement < 2 % de  $\theta_{bc}$ . Temps de réponse à 5 % < 1 mn.

# 2 – ETUDE PRELIMINAIRE

L'eau est en circulation. L'action froide est à l'arrêt.

A partir des caractéristiques du support didactique, du cahier des charges, et des mesurages fournis (enregistrement en refroidissement, puissances mesurées en régime permanent à une température de travail de  $\theta_E = 50$  °C) :

Justifier la puissance de chauffe installée,

Etablir le schéma bloc de l'action chaude en régime permanent en faisant apparaître les différents gains statiques.

En régulation de type Proportionnelle, déterminer en régime permanent, la valeur des grandeurs suivantes :

Température du bain d'eau,

Erreur statique,

Dépensements totales.

Pour une bande proportionnelle BP = 50, 10 et 1 °C (plage de mesure 0°C - 100 °C).

# 3 – PARTIE PRATIQUE

**1<sup>ER</sup> ESSAI** : Echangeur à l'arrêt.

Réponse à un échelon de consigne de 30 °C ( $\theta_{bc} = 50$  °C et  $\theta_A = 20$  °C), en régulation Tout Ou Rien (avec une BP de 0 °C).

Le cahier des charges est-il respecté ?

Identification du système en régulation T.O.R par la méthode de Ziegler-Nichols.

Détermination des paramètres BP et Ti pour une régulation de type PI.

**2<sup>nd</sup> ESSAI** : Echangeur à l'arrêt.

Passage en mode manuel. Recherche du régime permanent à  $\theta_b = 50$  °C.

Valider le modèle défini en partie préliminaire (gains statiques).

**3<sup>ème</sup> ESSAI** : Echangeur à l'arrêt. Après refroidissement.

Valider les paramètres de correction PI. Réponse indicielle du système pour  $\theta_{bc} = 50$  °C.

Conclure sur le rôle de l'action intégrale I.

**4<sup>ème</sup> ESSAI** : Echangeur à l'arrêt. Après refroidissement.

Changer la valeur de Ti. Réponse indicielle du système pour  $\theta_{bc} = 50$  °C.

Conclure sur les effets de l'action I.

**5<sup>ème</sup> ESSAI** :

Valider le fonctionnement de l'action froide (échangeur) : par « la trempe » d'une pièce d'acier de 3,2 kg portée préalablement à 120 °C.

Proposer un réglage pour l'action Proportionnelle du régulateur « froid », dans le but de permettre à la température du bain de retrouver sa valeur initiale (50 °C) en 2 mn.

Valider et justifier vos réglages par des essais.

Le cahier des charges est-il atteint ?