

# AGREGATION INTERNE DE GENIE ELECTRIQUE

## OPTION A

### ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

Etude d'un problème d'automatisation (durée 6 heures)

# **TRÉFILEUSE – RECUISEUSE**

### RECOMMANDATIONS AUX CANDIDATS

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 des feuilles séparées et clairement repérées. 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.

### ORGANISATION DU SUJET :

<b>SUJET :</b>	Parties 1 à 4	(14 pages)
<b>DOCUMENTS ANNEXES :</b>	Annexes 1 à 6	(06 pages)
<b>FEUILLES REPONSE :</b>	Feuilles réponse n°1 à 4	(04 pages)
<b>DOCUMENTS CONSTRUCTEURS :</b>	Famille MACH 4	(03 pages)
<b>(partiels)</b>	LT 2000-S	(02 pages)
	LMF 100	(15 pages)

### NOTE AUX CANDIDATS :

**Les parties 1, 2, 3 et 4 sont indépendantes.**

### PRESENTATION DES APPLICATIONS NUMERIQUES :

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.

# TRÉFILEUSE – RECUISEUSE

## PRESENTATION

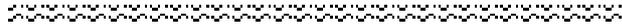
La tréfileuse – recuiseuse utilisée dans la société Alcatel Câble permet, à partir d'une bobine de fil de cuivre brut, de réaliser des fils électriques de section allant de 1,35 mm<sup>2</sup> à 16 mm<sup>2</sup>.

La machine comporte 2 parties :

- Une partie tréfilage qui permet par passes successives d'amener le fil de la section brute à la section désirée. Le fil est tiré derrière chaque filière par un rouleau tracteur. Tous les rouleaux sont entraînés via des réducteurs à rapport de réduction réglable par un seul moteur de traction. L'ensemble de toutes les filières et des rouleaux tracteurs est immergé dans un bain refroidi pour assurer la lubrification et éviter la montée en température du fil.
- Une partie où le recuit est effectué à la volée en 3 phases :
  - zone 1 : phase de préchauffage du fil.
  - zone 2 : phase de recuit du fil.
  - zone 3 : phase de nettoyage, refroidissement puis séchage du fil.

Le chauffage s'effectue, pour chaque zone, par le passage d'un courant directement dans le fil.

Un enrouleur en sortie de recuit, assure la traction du fil et l'enroulage final sur une bobine.



**Le sujet proposé comporte 4 parties :**

**Partie 1 :** Etude du tréfilage et du recuit à la volée.

**Partie 2 :** Etude de l'asservissement de température.

**Partie 3 :** Etude du dispositif de contrôle du courant de recuit.

**Partie 4 :** Travail pédagogique.

Les quatre parties sont indépendantes, cependant **les candidats ont intérêt à lire tout le sujet** et à essayer de traiter les différentes parties dans l'ordre proposé.

Les questions sont identifiées par une police *italique* et repérées par un numéro.

**DONNEES TECHNIQUES :****Données générales :**

Masse volumique du cuivre :	$\mu = 8,96 \text{ T/m}^3$
Résistivité du cuivre à 0 °C :	$\rho_0 = 1,673.10^{-8} \Omega\text{m}$
Chaleur massique du cuivre :	$c = 395 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Résistance à la traction du cuivre :	$Rt = 26 \text{ daN/mm}^2$
Coefficient de température du cuivre :	$a = 0,0041$

**Données relatives au tréfilage :**

Vitesse nominale du fil en sortie :	$v = 24 \text{ m/s}$
Section du fil en sortie :	$S_s = 2 \text{ mm}^2$
Section du fil en entrée :	$S_e = 50 \text{ mm}^2$
Coefficient d'allongement du cuivre :	$A = 34\%$
Puissance du moteur de tréfilage :	$Pt = 150 \text{ kW}$

**Données relatives au recuit :**

Section du fil :	$s = 2 \text{ mm}^2$
Vitesse nominale du fil :	$v = 24 \text{ m/s}$
Température de recuit du cuivre :	$\theta_r = 600^\circ\text{C}$
Température de préchauffage au point A:	$\theta_p = 180^\circ\text{C}$
Température de séchage :	$\theta_s = 150^\circ\text{C}$
Contrôle de la température de chaque zone par gradateurs monophasés à angle de phase.	

**DOCUMENTS :**

Synoptique de la tréfileuse :.....	<b>ANNEXE 1.</b>
Synoptique de la recuiseuse :.....	<b>ANNEXE 2.</b>
Abaque du temps de réponse réduit :.....	<b>ANNEXE 3.</b>
Formulaire pour les calculs de valeurs efficaces :.....	<b>ANNEXE 4.</b>
Organisation interne du CPLD :.....	<b>ANNEXE 5.</b>
Description logique du CPLD :.....	<b>ANNEXE 6.</b>

## 1. ETUDE DU TREFILAGE ET DU RECUIT :

### 1.1 Etude du tréfilage (annexe1) :

Le tréfilage s'effectue à volume constant, dans chaque filière le fil subi un allongement  $A$  défini en page 3.

- 1.1.1. *Déterminer la relation littérale entre la section de sortie et la section d'entrée du fil pour une filière, puis pour  $n$  filières.*
- 1.1.2. *Déterminer la relation littérale entre la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée du fil pour une filière, puis pour  $n$  filières.*
- 1.1.3. *Calculer le nombre de filières à installer pour passer de la section  $S_e$  à la section  $S_s$ .*
- 1.1.4. *Calculer la vitesse du fil à l'entrée de la première filière.*

Le tréfilage s'effectue à la limite de la résistance à la traction du cuivre et l'effort de traction est nul à l'entrée de chaque filière.

- 1.1.5. *Déterminer la puissance mécanique des tracteurs en sortie de chaque filière et vérifier la puissance totale du moteur de tréfilage.*

La puissance de tréfilage est transformée en chaleur au niveau de chaque filière à raison de 40% évacuée par la filière et 60% évacuée par le fil.

- 1.1.6. *Déterminer l'élévation de température qu'aurait le fil sur chaque filière en l'absence de refroidissement et en régime adiabatique.*

### 1.2. Etude du recuit (annexe 2) :

Après le tréfilage, le fil passe dans la partie recuit comportant trois zones : le préchauffage, le recuit et le nettoyage séchage.

#### *L'étude porte uniquement sur la zone de recuit.*

La machine fonctionne à vitesse nominale, le chauffage du fil se fait de manière adiabatique par circulation d'un courant considéré constant  $I_R$  dans le fil entre les points A et B. La température de préchauffage  $\theta_p$  du fil au point A est constante.

- 1.2.1. *Déterminer la longueur utile  $AB$  du fil dans la zone de recuit.*

On considère un petit élément de fil de longueur  $d\ell$  situé à une distance  $\ell$  du point A et à une température  $\theta_p + \theta$ .

- 1.2.2. *Écrire la relation donnant l'énergie électrique  $dW_e$  fournie à l'élément de résistance  $dr$  et de longueur  $d\ell$ .*
- 1.2.3. *Écrire la relation donnant l'énergie thermique  $dW_c$  emmagasinée par le même élément  $d\ell$ .*

- 1.2.4. Rechercher l'équation littérale de l'élévation de température  $\theta$ , de l'élément  $d\ell$  en fonction du temps, du courant  $I_R$  et de la température de préchauffage  $\theta_p$ .
- 1.2.5. En déduire l'équation littérale de l'élévation de température  $\theta$  en fonction de la vitesse  $v$ , du courant  $I_R$  et de la distance  $\ell$ . Tracer l'allure de la courbe  $\theta(\ell)$ , les autres paramètres étant constants.
- 1.2.6. Rechercher la relation littérale du courant  $I_R$  en fonction de la vitesse pour atteindre la température de recuit au point B.
- 1.2.7. Calculer le courant nécessaire au recuit à vitesse nominale.

Le courant est fixé à sa valeur nominale.

- 1.2.8. Déterminer l'expression littérale  $R(\theta_r)$  de la résistance du fil entre les points A et B en fonction de la température de préchauffage  $\theta_p$  et de la température de recuit  $\theta_r$ .
- 1.2.9. Calculer la tension aux bornes du segment AB.
- 1.2.10. Déterminer l'expression littérale de la puissance à fournir en fonction de la température de recuit  $\theta_r$  et de la vitesse de la ligne  $v$ , puis calculer cette puissance à la vitesse nominale.
- 1.2.11. Linéariser la fonction  $R(\theta_r)$  autour du point  $\theta_r = 600^\circ\text{C}$  en écrivant  $R(\theta_r)$  sous la forme  $\rho_1(1 + b(\theta_r - \theta_p))\frac{L}{s}$  puis calculer  $\rho_1$  et  $b$ .

### 1.3. Commande du gradateur de chauffage :

Le courant nécessaire au recuit est contrôlé par un gradateur à angle de phase placé au primaire d'un transformateur monophasé 400/55V.

- 1.3.1. Expliquer le choix de cette configuration et du mode de commande du gradateur.

## 2. ASSERVISSEMENT DE TEMPERATURE :

Dans toute cette partie, la vitesse est considérée constante et égale à la vitesse nominale.

### 2.1. Modélisation :

La température à l'entrée de la zone recuit est prise comme origine.

- 2.1.1. Durant un intervalle de temps  $dt$ , déterminer l'énergie thermique évacuée par un élément de fil de longueur  $d\ell$ , en sortie de la zone recuit.

Le générateur, qui alimente la zone de recuit, doit fournir l'énergie évacuée ainsi que celle nécessaire à l'élévation de température  $d\theta$  le long de toute la zone de recuit.

- 2.1.2. Déterminer l'équation différentielle qui lie la température de sortie  $\theta$  à la puissance  $P$  du générateur.

2.1.3. Écrire littéralement, puis numériquement la fonction  $\frac{\theta(p)}{P(p)}$ .

Le capteur de température est placé 15 cm après la sortie de la zone de recuit.

2.1.4. Calculer le retard pur introduit par la mesure et écrire, numériquement la nouvelle fonction  $\frac{\theta_m(p)}{P(p)}$  ( $\theta_m$  : température mesurée).

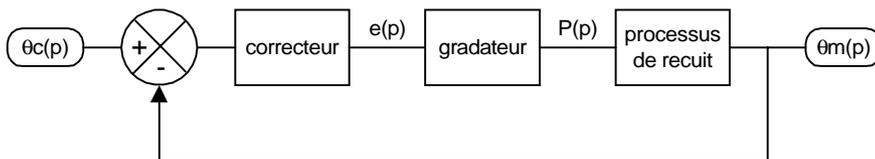
## 2.2. Correction proportionnelle :

On prendra comme fonction de transfert du recuit :  $\frac{\theta_m(p)}{P(p)} = \frac{6 \cdot 10^{-3} e^{-6,25 \cdot 10^{-3} p}}{1 + 55 \cdot 10^{-3} p}$

2.2.1. Tracer le diagramme de Bode de cette fonction de transfert.

2.2.2. Calculer une valeur approchée de la pulsation critique  $\omega_c$  correspondant à une phase de  $-180^\circ$ .

Le gradateur est considéré comme un gain de 220.



2.2.3. Calculer la valeur du gain du correcteur pour la limite de stabilité.

2.2.4. Calculer la valeur du gain à placer pour obtenir une marge de gain de 12db.

2.2.5. Calculer l'erreur statique obtenue avec la valeur du gain calculé en 2.2.4.

Le retard pur est assimilé à l'approximation de Padé. 
$$e^{-Tp} \approx \frac{1 - \frac{T}{2}p}{1 + \frac{T}{2}p}$$

2.2.6. Tracer le diagramme de Bode de l'approximation de Padé.

2.2.7. Déterminer pour le gain calculé en 2.2.4. la marge de phase obtenue pour l'ensemble.

## 2.3. Correction Proportionnelle Intégrale :

Le correcteur est du type P.I. parallèle.  $C(p) = K + \frac{1}{Ti \cdot p}$ , le retard pur est toujours assimilé à l'approximation de Padé.

- 2.3.1. Représenter le diagramme asymptotique de Bode de ce correcteur pour les cas suivants :  $(K ; T_i)$ ,  $(2.K ; T_i)$  et  $(K ; 2.T_i)$ .
- 2.3.2. En utilisant la méthode de compensation de pôles, déterminer les valeurs à donner à  $K$  et  $T_i$  pour avoir une marge de phase de  $45^\circ$ .
- 2.3.3. Pour ces réglages, déterminer la réponse  $\theta_m(p)$  à un échelon de consigne de  $10^\circ\text{C}$ .
- 2.3.4. Mettre  $\theta_m(p)$  sous la forme :

$$\theta_m(p) = \frac{A}{p} + \frac{B(p + m\omega_0)}{(p + m\omega_0)^2 + \omega_0^2(1 - m^2)} + \frac{C \cdot \omega_0 \sqrt{1 - m^2}}{(p + m\omega_0)^2 + \omega_0^2(1 - m^2)}$$

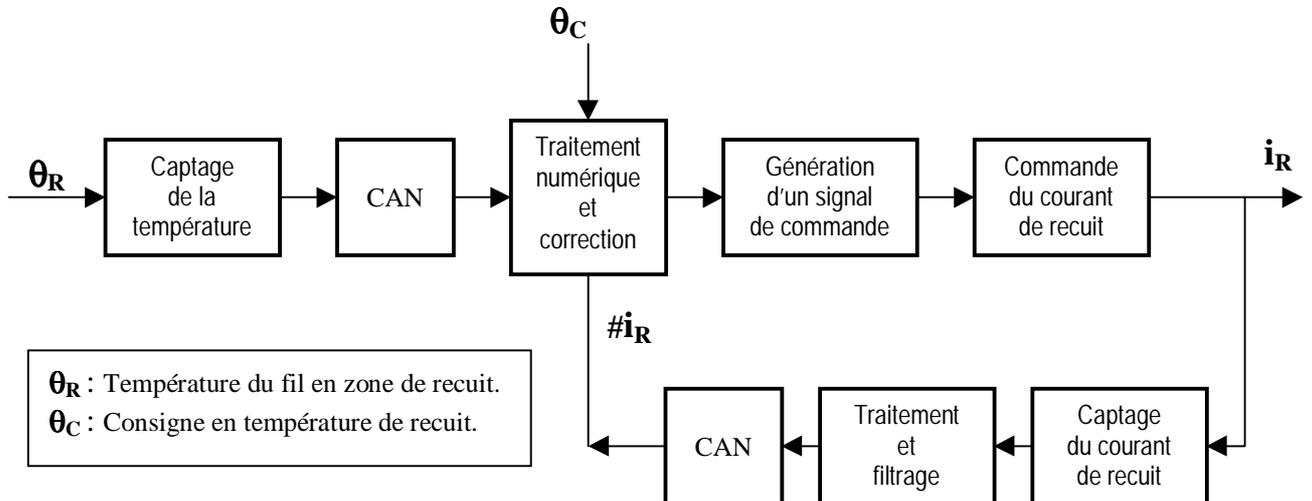
et calculer  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $m$  et  $\omega_0$ .

- 2.3.5. Écrire l'expression temporelle de  $\theta_m(p)$ .

### 3. ETUDE DU DISPOSITIF DE CONTRÔLE DU COURANT DE RECUIT :

Le dispositif de gestion de la température de recuit est basé en particulier sur la régulation du courant de recuit par un ordinateur.

Schéma bloc du dispositif mis en œuvre



La régulation du courant de recuit permet de maîtriser parfaitement les processus mis en œuvre dans la fabrication étudiée.

Pour une consigne en température donnée, le calculateur agit sur le courant de recuit par la génération de la consigne de phase d'un gradateur.

Le courant nécessaire au recuit du fil est mesuré par un capteur de courant afin d'être traité numériquement par le calculateur, en vue de sa régulation.

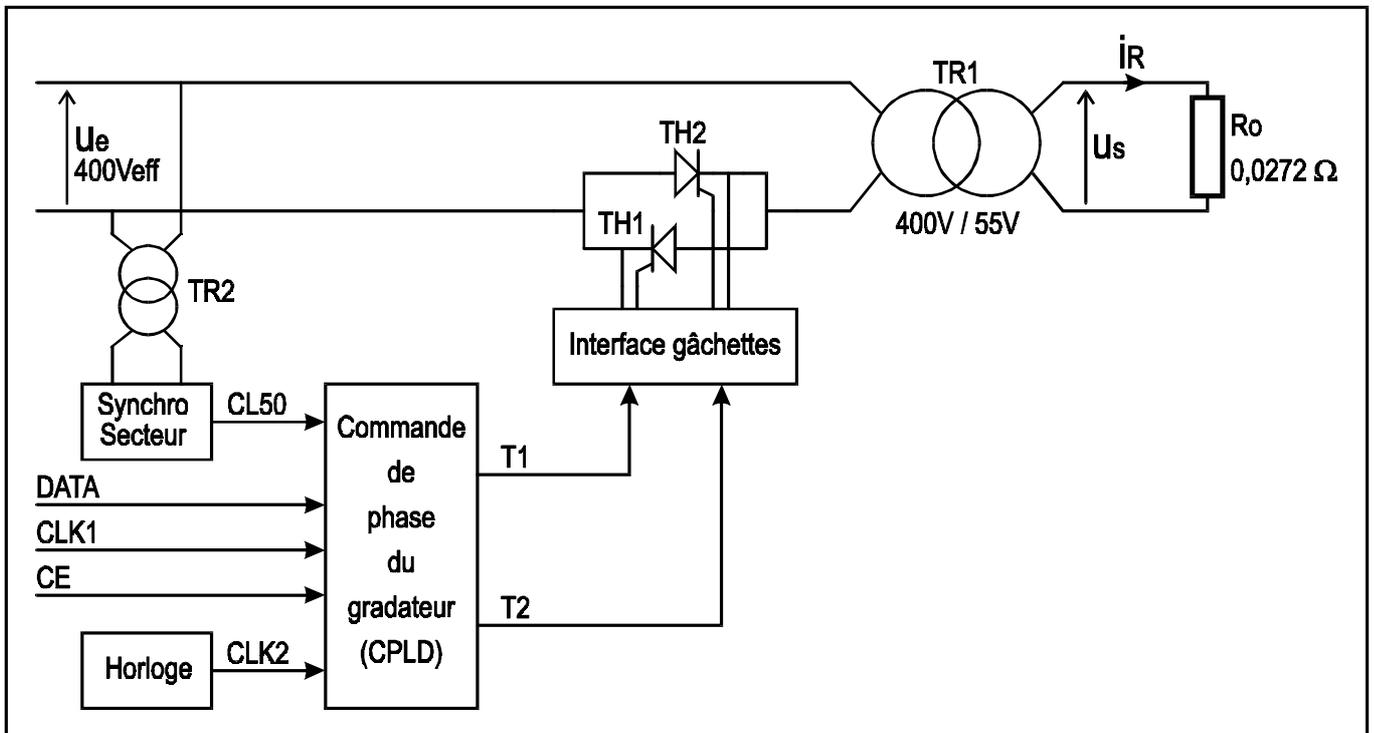
Dans cette partie de l'étude, on s'intéressera plus particulièrement aux fonctions et structures mises en œuvre dans le processus de **mesure et de commande** du courant de recuit.

### 3.1 Commande du courant de recuit :

On s'intéresse à nouveau au gradateur à angle de phase placé au primaire du transformateur monophasé 400V/55V qui alimente le fil à recuire ( $R_o=0,0272\Omega$  à 600°C).

On notera  $m$  le rapport de transformation de TR1 ( $m = \frac{55}{400}$ ).

*Un synoptique simplifié de l'ensemble est donné ci-dessous.*



Remarques : Le transformateur TR1 est supposé parfait.  
On se référera aux chronogrammes de la feuille réponse FR1, qui précise certains éléments du « timing ».

Le circuit de commande de phase est construit autour d'un CPLD de la famille MACH4.

#### *Il reçoit en entrées :*

- un signal **CL50** de synchronisation à la tension secteur  $U_e$ . Ce signal est issu d'un transformateur de faible puissance **TR2** et d'un circuit de mise en forme, il fournit une impulsion positive d'environ 1ms au début de chaque période du secteur,
- une horloge de travail **CLK2** dont on déterminera la fréquence plus loin,
- la consigne de phase  $\Phi$  qui peut varier de 0 à  $\pi$ , codée sur 11 bits en binaire naturel. Cette consigne, élaborée par le calculateur qui gère le processus de fabrication, est transmise grâce aux signaux **DATA**, **CLK1** et **CE**.

Le protocole est simple : l'échange est activé lorsque **CE** passe à zéro. Les onze bits sont alors successivement présentés sur la ligne **DATA** et validés aux fronts montants de **CLK1**. Le **MSB** est transmis en premier, le **LSB** en dernier. L'échange prend fin lorsque **CE** repasse à un, ce qui valide le mot de onze bits en tant que nouvelle consigne de phase.

En appelant  $N_\phi$  le nombre de 11 bits qui code l'angle de phase  $\Phi$  on aura donc la relation

$$\text{suivante : } \phi = \frac{N_\phi}{2^{11}} \cdot \pi$$

**Il génère en sortie (voir chronogrammes feuille réponse FR1) :**

- une impulsion **T1** d'amorçage du thyristor TH1 sur l'alternance positive de la tension secteur  $U_e$ ,
- une impulsion **T2** d'amorçage du thyristor TH2 sur l'alternance négative de la tension secteur  $U_e$ ,

3.1.1 Compléter sur la feuille réponse 1 le chronogramme de  $\dot{I}_R$ .

3.1.2 Préciser la valeur crête de ce courant  $\dot{I}_R$ .

Pour les trois questions suivantes vous vous aiderez de "**l'annexe 4 pour le calcul du courant efficace en sortie du gradateur**".

3.1.3 Déterminer l'expression du courant efficace  $I_{Reff}$  en fonction de  $U_{e,eff}$ ,  $R_o$ ,  $\Phi$  et  $m$ .

3.1.4 Déterminer la valeur de la consigne numérique de phase  $N_\Phi$  pour que l'intensité efficace du courant dans le fil à recuire soit de 1620 A .

3.1.5 Déterminer la sensibilité de réglage  $\sigma = \frac{\Delta I_{Reff}}{\Delta N_\Phi}$  (en A/LSB) du courant efficace dans le fil à recuire autour de ce point de polarisation de 1620 A .

L'organisation fonctionnelle du circuit de commande de phase (MACH4-64/64) est représentée en annexe 5.

- La **fonction CC** ( à concevoir ) a pour rôle de capturer la consigne numérique de phase  $N_\Phi$  conformément au protocole décrit précédemment.
- La **fonction VC** a quant à elle pour rôle de valider cette consigne, c'est-à-dire de la stabiliser sur ses sorties au front montant de CE. La description logique de cette fonction est donnée dans son intégralité en annexe 6.  
(Syntaxes : ET  $\Leftrightarrow$  & ; OU  $\Leftrightarrow$  # ; NON  $\Leftrightarrow$  !)
- Enfin la **fonction CPT** génère les deux impulsions de commande d'amorçage de TH1 et TH2. Cette fonction, également à concevoir, sera construite autour d'un compteur binaire 12 bits évoluant au rythme de l'horloge CLK2. Ce compteur, capable de charger en mode parallèle synchrone au front montant de CL50 la valeur de la consigne numérique  $N_\Phi$ , génère les impulsions T1 et T2 (d'une durée d'une période de l'horloge CLK2) lorsqu'il atteint respectivement les valeurs binaires 1000 0000 0000 puis 0000 0000 0000.

3.1.6 Quelle doit être la fréquence du signal CLK2 pour que l'organisation proposée permette d'atteindre le but recherché ? On pourra prendre comme valeur de raisonnement une consigne de phase  $\Phi = 100^\circ$ .

3.1.7 Compléter la description logique de la fonction CC sur la feuille réponse FR2 .

3.1.8 Compléter la description logique de la fonction CPT sur la feuille réponse FR3 .

3.1.9 Le système ainsi conçu peut-il connaître des aléas de fonctionnement ? Justifiez votre réponse.

### 3.2 Mesure du courant de recuit :

Le « schéma fonctionnel » de la chaîne d'acquisition du courant de recuit est donné en feuille réponse FR4.

Le courant de recuit  $I_R$  est fourni par le secondaire du transformateur monophasé TR1 qui alimente le fil à recuire (se reporter à l'étude précédente :  $R_0=0,0272\Omega$  à  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ).

#### LE CAPTEUR

Les contraintes d'environnement du capteur de mesure déterminent son choix, l'on peut classer ces contraintes suivant trois paramètres :

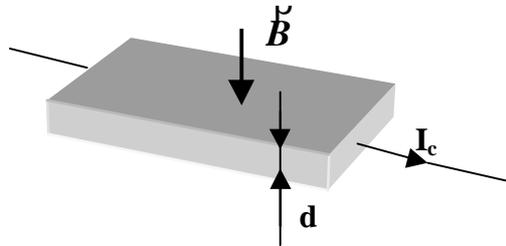
- Les paramètres électriques (type de courant à mesurer, plage de courant, signal de sortie, précision...),
- Les paramètres d'environnement (température de service, de stockage...),
- Les paramètres mécaniques (connexions électriques, fixations...).

La technologie retenue dans notre étude pour mesurer la valeur du courant de recuit est :

**un capteur de courant à effet « Hall » à boucle fermée.**

#### Principe de l'effet « Hall » :

L'on considère une plaquette semi-conductrice d'épaisseur  $d$ , placée dans un champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaire à la plaquette et traversée par un courant de commande conformément à la figure ci-dessous.



3.2.1  $K$  étant la constante de « Hall » pour le matériau étudié, et  $d$  l'épaisseur de la plaquette, justifier la relation suivante :  $V_H = \frac{K}{d} I_c B = \lambda_1 \cdot B$  avec  $\lambda_1 = 0,1\text{ V.Tesla}^{-1}$ .

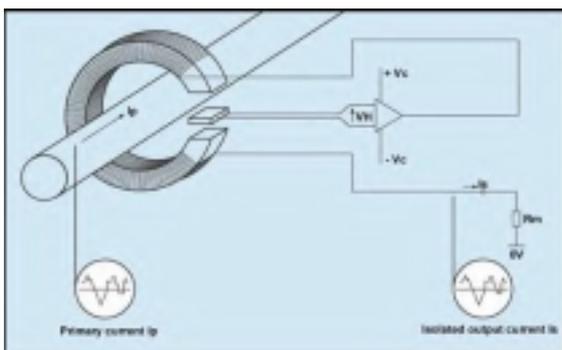
Situer la tension  $V_H$  sur la plaquette.

#### Capteur de courant à effet « Hall » à boucle fermée :

Ces capteurs à boucle fermée sont capables de mesurer avec une isolation galvanique, des courants de formes complexes. Ils se distinguent par :

- Une excellente précision,
- Une très bonne linéarité,
- Une faible dérive en température,
- Un temps de réponse court, et une bande passante élevée.

#### Structure interne d'un capteur à effet « Hall » à boucle fermée :



$N_P$  = Nombre de spires au primaire.  
 $N_S$  = Nombre de spires au secondaire.  
 $I_P$  = Courant primaire.  
 $I_S$  = Courant secondaire.

Ces capteurs à boucle fermée sont aussi appelés « à compensation », ou « à flux magnétique nul », si l'on considère que l'enroulement  $N_S$  (traversé par le courant  $I_S$ ), produit une force magnétomotrice de signe opposé à celle produite par l'enroulement primaire  $N_P$  (traversé par le courant  $I_P$ ).

3.2.2 En négligeant la réductance du circuit magnétique devant celle de l'entrefer (recevant l'élément semi-conducteur « Hall »), montrer que  $V_H = \lambda_2 (N_P I_P - N_S I_S)$

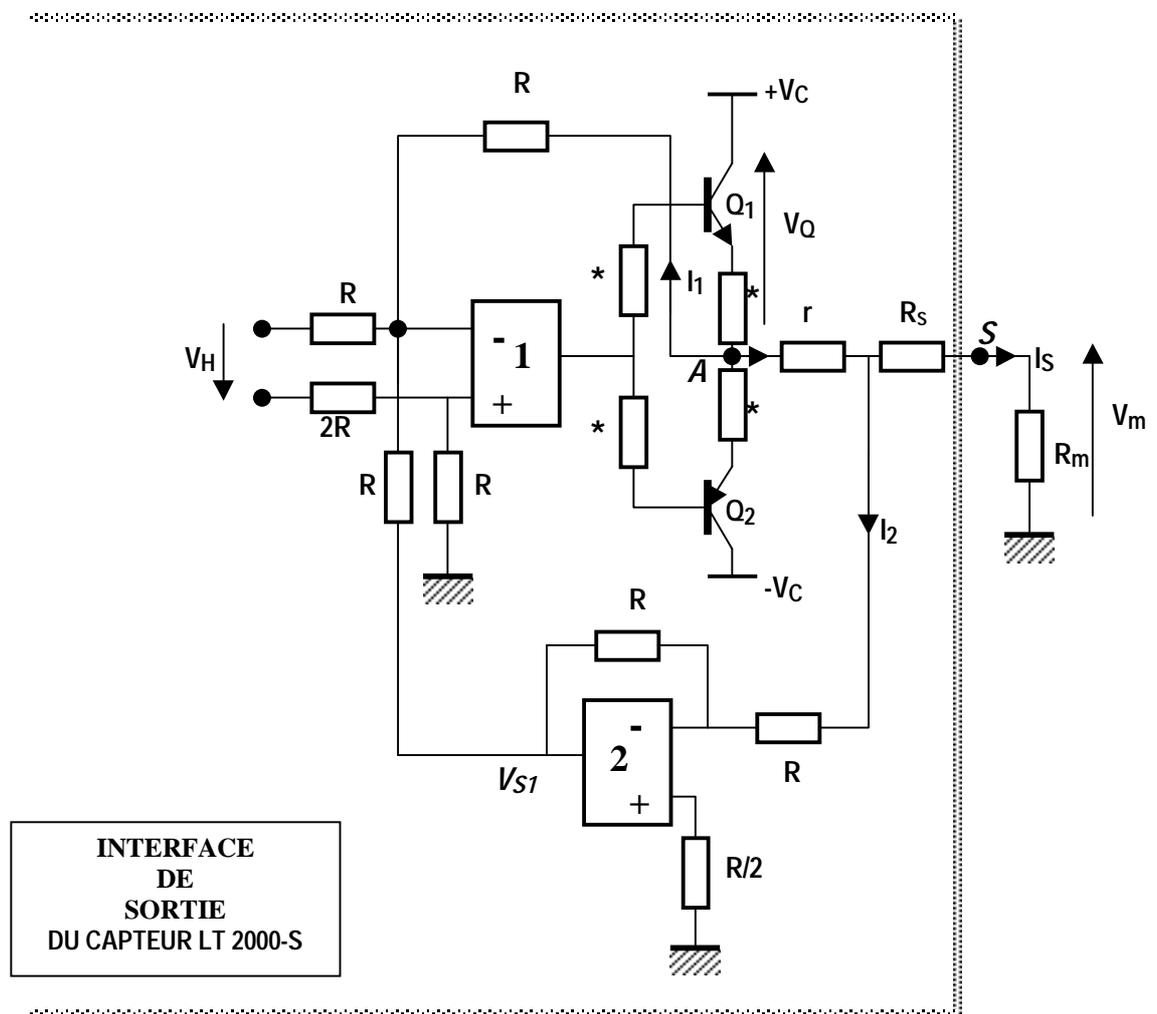
Calculer  $\lambda_2$  sachant que  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  et  $e = 5$  mm.

Donner la « dimension » de  $\lambda_2$  (unité de mesure).

### CARACTERISATION DU COURANT MESURE PAR LE CAPTEUR :

La structure électronique interne (simplifiée) du capteur de courant est donnée en page suivante, il s'agit du capteur LEM LT2000-S.

Cette structure est un **générateur de courant**.



#### Remarques :

- Les résistances marquées d'un astérisque ne sont pas désignées, elles n'interviendront pas dans le calcul.
- Les courants  $I_1$  et  $I_2$  sont très inférieurs au courant  $I_S$ , ils seront donc négligés devant celui-ci.
- $R_S$  est l'enroulement secondaire de compensation, sa valeur est  $15\Omega$ .
- $R_m$  est la résistance de mesure.
- Les tensions d'alimentation  $V_C$  sont de  $+15V$  et  $-15V$  avec une tolérance de  $\pm 5\%$ .

- 3.2.3 Exprimer la relation entre le courant de mesure  $I_S$  et la tension  $V_H$ . ( $I_S$  courant traversant l'enroulement secondaire  $N_S$ ). (On s'attachera en particulier à rechercher en premier lieu la relation entre le potentiel du point A et les tensions  $V_{S1}$  et  $V_H$ ).
- 3.2.4 A partir de la relation donnée à la question 3.2.2, ( $V_H = \lambda_2 (N_P I_P - N_S I_S)$ ), et du résultat précédent, exprimer le rapport  $I_S / I_P$ , donner sa valeur pour le capteur LEM LT 2000-S.
- 3.2.5 Exprimer et calculer la valeur maximale à donner à la résistance de mesure  $R_m$  pour rester dans une zone de fonctionnement linéaire. (Le constructeur impose une tension  $V_0 \text{ min} = +2,35\text{V}$ .)  
On donne  $r = 0,1\Omega$  et  $I_P \text{ max} = 3000\text{A}$ .
- 3.2.6 Donner l'expression de la plage de tension mesurable en sortie du capteur. Calculer cette plage de tension si l'on considère une résistance de mesure  $R_m$  de  $4,7\Omega$ .

### TRAITEMENT ET CONVERSION DE L'INFORMATION DELIVREE PAR LE CAPTEUR :

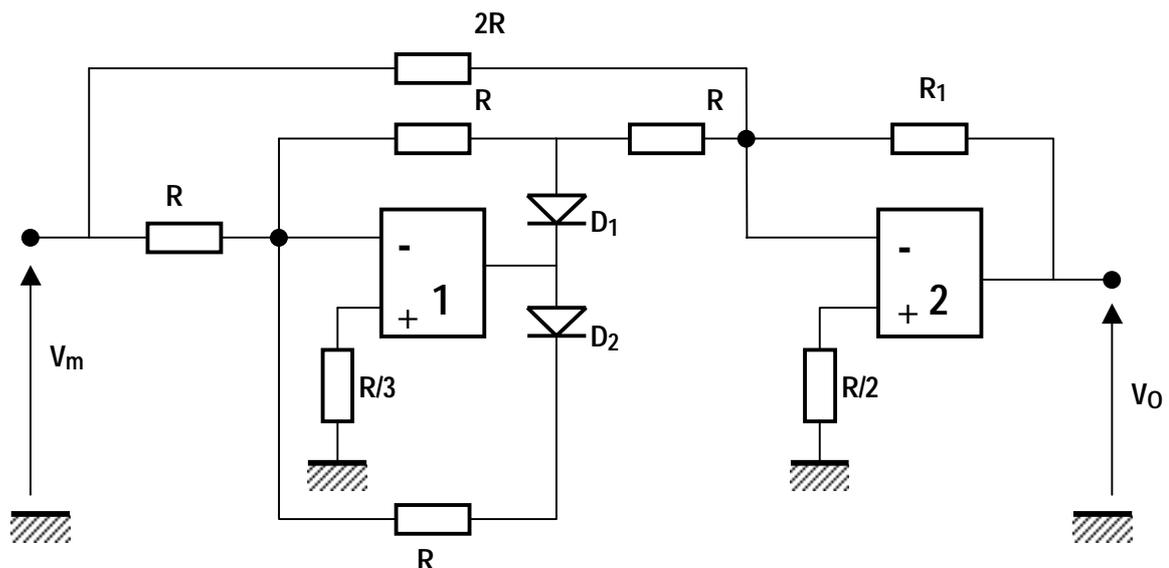
*On se reportera utilement à la feuille réponse FR4 : chaîne d'acquisition de la valeur du courant de recuit.*

La tension  $V_m$  délivrée par le capteur est l'image instantanée du courant de recuit. La connaissance de la valeur moyenne de  $|V_m|$  permet au calculateur de réguler la température de recuit du fil. (Le passage à la valeur efficace, pour une consigne de phase donnée, est fait par le calculateur.)

#### Conversion Alternative / Unidirectionnelle :

Le traitement de la mesure du courant de recuit est en fait une conversion du signal issu du capteur en un signal unidirectionnel.

- 3.2.7 Analyser qualitativement et quantitativement le fonctionnement de la structure ci-dessous, représenter la fonction de transfert  $V_0 = f(V_m)$ .



**Fonction filtrage :**

Le signal  $V_0(t)$  obtenu en sortie de la structure précédente est filtré afin d'en extraire sa valeur moyenne.

On se situe dans le cas d'une consigne de phase  $\Phi = \pi$  (cf. feuille réponse FR1).

3.2.8 Dans ces conditions ( $\Phi = \pi$ ), calculer les termes de la décomposition de  $V_0(t)$  en série de Fourier. On se limitera aux deux premiers harmoniques présents.

3.2.9 Dédire de la question précédente ( toujours pour  $\Phi = \pi$ ), la valeur moyenne de  $V_0(t)$  et l'amplitude maximale de son premier harmonique.

La fonction de filtrage employée, est organisée autour du circuit intégré **LMF100** qui est un double filtre à capacités commutées.

L'on désire obtenir en sortie du filtre la tension  $V_0'(t)$  représentant la valeur moyenne de  $V_0(t)$ .

3.2.10 En analysant la documentation constructeur fournie (extraits), indiquer le type de filtre à mettre en œuvre.

On précisera en particulier :

- Le mode de configuration choisi.
- La fonction de transfert ainsi réalisée, en mettant en évidence l'expression du gain dans la bande passante, la fréquence de coupure et le coefficient de surtension.

3.2.11 Compléter sur la feuille réponse FR4, la structure de la fonction filtrage ainsi choisi.

3.2.12 Pour des raisons de précision sur la mesure, on choisit un coefficient de surtension  $Q$  voisin de 0,7. Justifier ce choix, en déduire la valeur de tous les composants mis en œuvre, ainsi que l'expression de la fréquence de coupure du filtre.

3.2.13 Justifier la présence du filtre anti-repliement précédent le filtre à capacités commutées.

**Caractéristiques métrologiques de la chaîne d'acquisition :**

Le signal  $V_0''(t)$  obtenu en sortie de la fonction filtrage est numérisé afin d'être saisi par le calculateur gérant le processus de fabrication.

La structure retenue est organisée autour d'un convertisseur Analogique / Numérique unipolaire dialoguant en mode série avec le calculateur.

La chaîne d'acquisition de la valeur moyenne de l'image redressée du courant de recuit est formée par la mise en cascade de différentes fonctions.

La relation **idéale** liant l'entrée à la sortie de la chaîne peut s'écrire :

$$N = \frac{G_C(\Phi)V_m}{q} \text{ ou } q \text{ représente le « quantum » du convertisseur.}$$

On se situe dans le cas d'un courant de recuit **I<sub>R</sub> maximum**, soit 3000A pour le capteur étudié, ce courant sera obtenu pour une consigne de phase  $\Phi = \pi$ . La qualité du recuit impose une erreur maximale de +/- 15A sur la valeur du courant de recuit.

On considère que le budget des erreurs de la chaîne se limite aux imperfections de la fonction filtrage uniquement.

3.2.14 *Exprimer le gain de conversion idéal  $G_C$  ( $\phi = \pi$ ) en fonction des éléments constitutifs de la chaîne.*

3.2.15 *Calculer le gain de conversion idéal  $G_C$  ( $\phi = \pi$ ) permettant d'obtenir la dynamique maximale en entrée du convertisseur A/N. En déduire la valeur des résistances  $R_1$  et  $R_2$  de la fonction « conversion alternative / unidirectionnelle ».*

*On donne :  $I_{R\ max} = 3000A + / - 15A$  et  $R_m = 4,7\ \Omega$ .*

3.2.16 *Déterminer le nombre minimal de bits de conversion dont devra disposer le convertisseur utilisé (résolution).*

Les imperfections de la fonction filtrage conduisent à considérer en sortie de celle-ci, une ondulation résiduelle que l'on peut caractériser à partir de la décomposition en série de « Fourier » du signal  $V_0(t)$ .

3.2.17 *Sachant que l'erreur maximale admissible en entrée du convertisseur doit être au plus de  $\frac{1}{2}$  quantum, calculer la fréquence de coupure de la fonction filtrage.*

## 4 TRAVAIL PEDAGOGIQUE :

L'objectif de cette partie est de proposer une **stratégie pédagogique d'enseignement** en classe de **première année** de Technicien Supérieur en Electronique ( 6H en classe complète, 4H en Travaux Pratiques).

Le système technique étudié servira de support pour la stratégie d'enseignement à mettre en œuvre.

On s'intéressera **précisément** aux fonctions, logiciels et structures associés au dispositif de contrôle du courant de recuit, et particulièrement aux circuits logiques programmables (PAL, CPLD, ...).

### Il vous est notamment demandé :

- De **proposer** un cycle de formation (ensemble de séquences d'enseignement) comprenant des séquences de TP et des cours de structuration de connaissances,
- De **présenter** ce cycle sous forme de tableau mettant en évidence, pour chaque séquence constituant le cycle, l'activité déployée, les éléments visés du référentiel, la durée, les conditions de réalisation.
- De **développer** une séquence de TP particulière, extraite du cycle présenté.

### Pour la séquence de Travaux Pratiques développée, vous devez :

- Définir l'**objectif terminal** ciblé par la séquence,
- Définir les **prérequis** nécessaires,
- Choisir la **stratégie d'apprentissage** à déployer pour mettre en œuvre la séquence,
- Construire l'**itinéraire** de la séquence en fixant un **plan guide** permettant de préciser les étapes fondamentales (document professeur),
- Proposer l'**environnement didactique** de la séquence (Documents d'accompagnement, docs. Constructeurs...). Ces documents restent en possession de l'étudiant.