

65/86

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES D'INGENIORAT

SUJET

ANALYSE - MISE EN MARGHE  
DE L'EQUIPEMENT ELECTRONIQUE  
DE COMMANDE ET REGULATION  
DU FOUR HERAEUS TYPE ROR

2,5/30 - 1700°C

1 PLANCHE

Proposé par :

Pr. SLUSZKIEWICZ T.

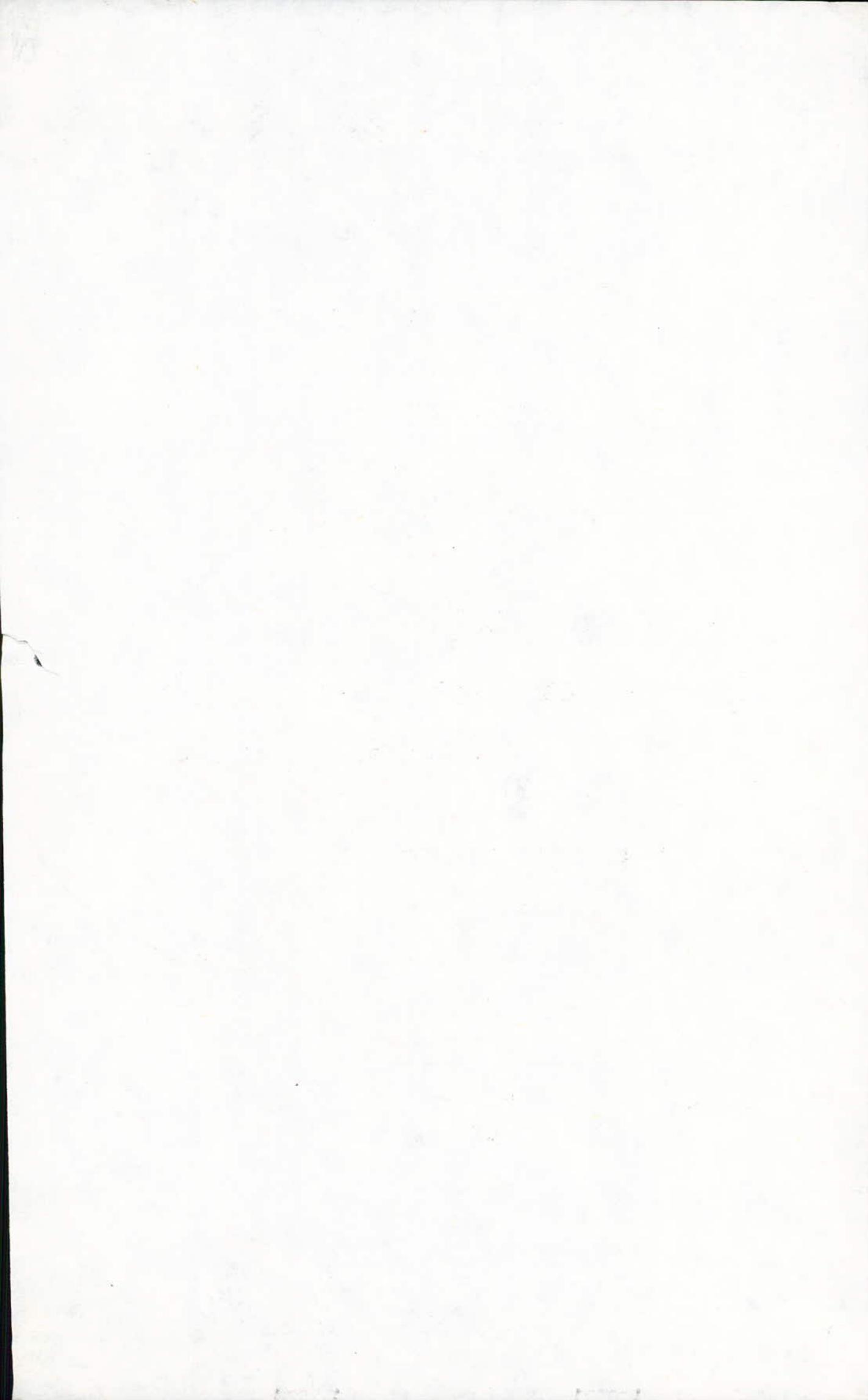
Etudié par :

Mme VORY  
née RAZAFIMAHEFA  
Marie Laurence

Dirigé par :

Pr. SLUSZKIEWICZ  
Tomasz

PROMOTION : JUIN 1986



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

### PROJET DE FIN D'ETUDES D'INGENIORAT

#### SUJET

ANALYSE - MISE EN MARGHE  
DE L'EQUIPEMENT ELECTRONIQUE  
DE COMMANDE ET REGULATION  
DU FOUR HERAEUS TYPE ROR

2,5/30 - 1700°C

Proposé par :

Pr. SLUSZKIEWICZ T.

Etudié par :

Mme VORY  
née RAZAFIMAHEFA  
Marie Laurence

Dirigé par :

Pr. SLUSZKIEWICZ  
Tomasz

PROMOTION : JUIN 1986

—ooOoo— Dedicace —ooOoo—

A la mémoire de mon père

A la mémoire de ma soeur Marie Yvonne

A ma mère

A toute ma famille

—ooOoo—



—ooOoo— REMERCIEMENTS —ooOoo—

Je voudrais remercier ici :

Professeur SLUSZKIEWICZ TOMASZ, pour ses conseils et suggestions fructueux tout au long de ce travail.

Enfin, toute ma reconnaissance à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet.

—oooOooo—

INTRODUCTION ..... I



I- PRESENTATION DU FOUR :

I-1 Généralité .....	1
I-2 Classement du four HERAEUS TYPE ROR 2,5/30 .....	4
I-3 Caractéristiques techniques .....	4
I-4 Propriétés et caractéristiques de la résistance chauffante .....	6
I-5 Principe de chauffage .....	8

II- ANALYSE DESCRIPTIVE DE L'EQUIPEMENT :

II-1 Description .....	11
II-2 Etat du four .....	13
II-3 Documents manquants .....	13

III- LES CAPTEURS DE MESURES :

III-1 Définition .....	14
III-2 Les capteurs de température .....	14
III-3 Le couple Pt-Rh/Pt-Rh EL 18 .....	21
III-4 Théorie de l'étalonnage .....	21

IV- ETUDE DE REGULATION - REGULATION DE TEMPERATURE :

1<sup>ère</sup> partie : Etude de régulation

1- Généralité .....	30
2- Processus de régulation .....	30
3- Les différents régulateurs .....	32

2<sup>è</sup> partie : Régulateur de température

du four HERAEUS type ROR 2,5/30 1700°C

1- Circuit oscillant .....	34
2- Influence de l'interposition de la palette entre les bobines .....	36
3- Source de tension additionnelle .....	37

4- Intérêt de cette source de tension additionnelle .....	38
5- Caractéristique $V'_g = f(R_g)$ .....	41
<b>V- ETUDE DU CIRCUIT DE COMMANDE :</b>	
V-1 Intérêt du circuit de commande .....	49
V-2 Principe de fonctionnement .....	49
V-3 Influence des tensions V(5-6) et V(7-8) .....	50
<b>VI- ETUDE DU CIRCUIT DE PUISSANCE :</b>	
VI-1 Introduction .....	57
VI-2 Principe de fonctionnement .....	57
<b>VII- SYNTHESE SUR LE FONCTIONNEMENT DU GROUPE DE COMMANDE ET DE REGULATION :</b>	
VII-1 Introduction .....	63
VII-2 Régime transitoire .....	63
VII-3 Régime établi .....	64
<b>VIII- PLAN D'EXPERIENCES - UTILISATION ET MAINTENANCE :</b>	
VIII-1 Données prises lors des mesures.....	66
VIII-2 Analyse de chaque sous-système .....	66
VIII-3 Réglage avec le four .....	70
VIII-4 Mise en marche .....	71
VIII-5 Utilisation .....	73
VIII-6 Maintenance .....	74
CONCLUSION .....	81
ANNEXE .....	83
BIBLIOGRAPHIES .....	85





Depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de l'électricité à des fins thermiques dans l'industrie n'a cessé de croître. Cette croissance s'est accompagnée d'une évolution des procédés électrothermiques utilisés. A savoir :

- l'accroissement de densité de puissance
- l'amélioration des alliages métalliques pour les résistances chauffantes
- des recherches poussées dans le domaine des capteurs thermométriques
- des progrès en matière de commande et de régulation

Traditionnellement, la régulation des procédés électrothermiques se faisait électromécaniquement. Le contrôle du processus de chauffage était alors bien plus fin que celui obtenu en chauffage par combustibles. Leurs performances étaient toutefois limitées par l'inertie des composants purement mécaniques, qui imposait le temps de réponse du système.

Des modules électroniques se sont progressivement substitués aux composants électromécaniques. Les propriétés et caractéristiques des composants électroniques, en particulier la petite valeur de leur inertie ont permis une amélioration sensible du temps de réponse. L'utilisation du système électronique a permis entre autre de réaliser des progrès dans l'augmentation de densité de puissance.

Pour rester dans le cadre de notre étude, on peut dire que l'uniformité de température dans un four dépend de la répartition et de la nature des corps de chauffe, du brassage de l'atmosphère et de régulation de puissance.

Les trois premières caractéristiques traduisent la qualité de la conception thermique du four et rendent possible l'obtention d'une température de charge précise et homogène. Toutefois, c'est la régulation qui permet l'ajustement fin de la température.



CHAPITRE -I

- PRESENTATION DU FOUR -

## I- PRESENTATION DU FOUR;

### I-1 Généralité:

Un four est une application d'un mode de chauffage déterminé. D'une façon générale, un four est constitué d'un corps de chauffe, d'un réfractaire et d'un calorifuge.

En fonction de son utilisation, de la gamme de température et du mode de chauffage, on distingue:

#### I-a Le four à résistance:

Le chauffage des fours à résistances repose sur la loi de JOULE: toute substance conductrice de l'électricité traversée par un courant électrique est le siège d'un dégagement de chaleur.

La puissance électrique transformée en chaleur s'exprime par la relation :

$$P = UI = RI^2 = U^2/R$$

avec  $P, U, I, R$  exprimés respectivement en watts, en volts, en ampères, en ohms

#### I-b Four à induction électromagnétique :

Tout corps conducteur de l'électricité s'échauffe par effet JOULE quand il est parcouru par un courant électrique. Cet échauffement s'obtient aussi en plaçant ce conducteur dans un champ magnétique variable. C'est le chauffage par induction électromagnétique. Si on applique, par exemple, une différence de potentiel alternative  $V$  aux bornes d'un solénoïde  $B$ , le courant alternatif de fréquence  $f$  qui parcourt cette bobine crée à l'intérieur, à l'extérieur et aussi, autour de la bobine, un champ magnétique  $H$  variable. Si on introduit dans la bobine un corps conducteur, la variation du champ magnétique produit une variation du flux magnétique qui traverse ce corps et, d'après la loi de LENZ, induit une force électromotrice donnant naissance à des courants de FOUCAULT. Ces courants se transforment en chaleur par effet JOULE dans le corps qui s'échauffent. [6]

### 1-c Le four de fusion par conduction :

Dans le chauffage par conduction, le matériau à chauffer est lui-même parcouru par le courant électrique qui l'échauffe alors directement par effet JOULE. Ce mode de chauffage est encore appelé "chauffage par passage direct du courant" ou plus simplement "chauffage direct par résistances" [6]

Le corps à chauffer doit donc être conducteur.

### 1-d Four à rayonnement infrarouge :

Le chauffage par rayonnement infrarouge constitue un cas particulier du chauffage par rayonnement et du chauffage par résistance puisqu'il est fondé d'une part, sur la transmission de l'énergie par rayonnement, et d'autre part, il utilise comme sources émettrices des résistances électriques. Le transfert d'énergie se fait sans besoin de support intermédiaire. [6]

### 1-e Four à arc électrique : [6]

L'arc électrique est la manifestation du passage du courant entre deux électrodes dans un milieu gazeux ionisé à une pression différente. Le mode de transmission de la chaleur dans un four à arc de même que sa technologie varie fortement avec la conception du four.

Deux grandes familles des fours à arc sont généralement distinguées :

- Les fours de fusion à chauffage par arc électrique : où le matériau à fondre est d'abord chargé dans l'enceinte du four, puis fondu sous l'effet de la chaleur transmise par un ou plusieurs arcs électriques.

- Les fours de réduction à chauffage par arc-résistance : le produit est introduit de façon continue ou discontinue dans le four pour y subir une opération de réduction.

1-f Four ou réacteur par plasma :

Le plasma est un état de la matière obtenu par ionisation d'un gaz; il se compose d'ions chargés négativement, mais reste, d'un point de vue électrique, neutre. Son état d'ionisation le rend conducteur de l'électricité. Le plasma est souvent considéré comme le quatrième état de la matière.

- Les plasmas dont le degré d'ionisation est voisin de l'unité, c'est le cas en fusion thermonucléaire.

- Les plasmas à ionisation partielle, appelés par extension, plasmas, sont ceux utilisés dans l'industrie.

Les générateurs de plasma constituent des torches ou chalumeaux. Le four ou réacteur est alors constitué d'une enceinte dans laquelle les générateurs de plasma sont mis en oeuvre de différentes façons :

- générateur à arc soufflé, sans transfert de l'arc à la charge
- générateur à arc superposé . [6]

1-g Repartition des procédés électrothermiques entre chauffage direct et indirect :

Chauffage direct	Chauffage indirect
-chauffage direct par résistance ou par conduction	-chauffage indirect par résistance
-chauffage diélectrique haute fréquence	-chauffage par rayonnement infrarouge
hyperfréquence (micro-ondes)	
- chauffage par laser	-chauffage indirect à arc
-chauffage direct à arc	-chauffage par plasma

Tableau n° 1

I-2 Classement du four HERAEUS type ROR 2,5/30 1700°C

En fonction du mode de transmission de l'énergie, le chauffage par résistance est divisé en deux catégories (Tableau n°1)

2-a Chauffage direct :

Où le corps à chauffer est lui-même le siège du dégagement de chaleur. Les échanges ultérieures de chaleur s'effectuent selon les lois de la thermique usuelle.

2-b Chauffage indirect :

Où la transmission d'énergie se fait de la source de chaleur au corps à chauffer en obéissant aux différentes lois de la thermique. [6]

Ainsi, de par sa constitution, notre four peut être classé parmi les fours à chauffage indirect par résistance.

I-3 Caractéristiques techniques :

3-1 Destination du four :

Le four pour lequel on étudie le système de commande et de régulation, est un four tubulaire à enroulement chauffant en rhodium, modèle ROR.

Il sert à expérimenter des matériaux métalliques et céramiques à hautes températures, à contrôler et étalonner

- les thermocouples (et pyromètres) à disparition de filament
- les pyromètres à rayonnement total
- et les pyromètres bichromatiques [15]

3-2 Caractéristiques techniques :

[15]

Appellation : four HERAEUS type ROR 2,5/30

Température nominale :

1700°C

Dimensions nominales :

Diamètre intérieur

25mm

Longueur chauffée

250mm

## Dimensions extérieures :

Diamètre de la carcasse .....	140 mm
Longueur de la carcasse .....	280 mm
Longueur totale .....	300 mm
Hauteur totale .....	400 mm
Hauteur du centre du tube .....	330 mm

four réglable de  $\pm 55$  mm en hauteur

Tension nominale standard .....	42 V
Puissance nominale .....	1,7 KW
Poids net approximatif (sans accessoire) .....	11 Kg
Thermocouple .....	Pt. Rh-Pt. Rh EL 18

introduit axialement, soudure placée au milieu du four, près de l'enroulement chauffant.

Appareillage de commande, de mesure, et de régulation de température est de type RE HERAEUS [15]

Le four tubulaire et son régulateur de température doivent être parfaitement adaptés l'un à l'autre.

## 3-3 Représentation schématique du four :

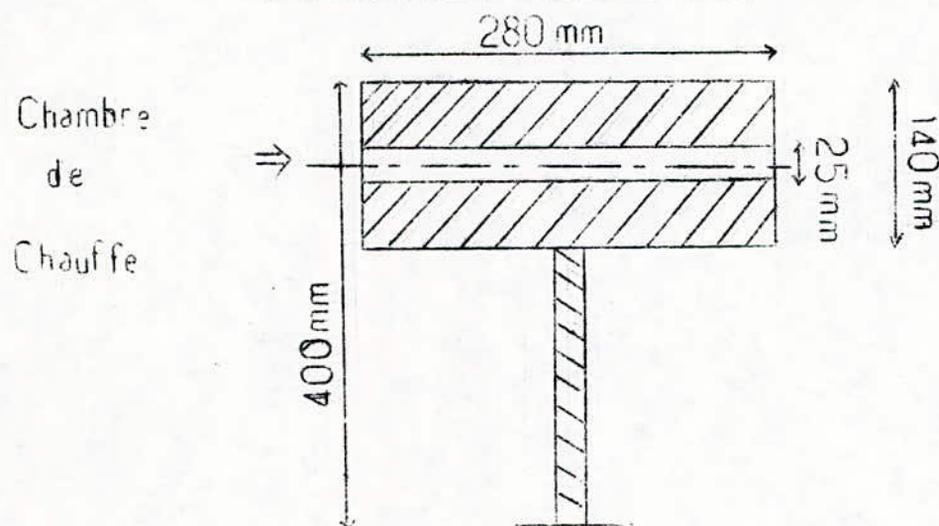


FIG-1

#### I-4 Propriétés et caractéristiques de la résistance chauffante :

##### 4-a caractéristiques des résistances en rhodium [6] :

- Densité .....	12,48
- Température de fusion en °C .....	1985 °C
- Résistivité à 0 °C .....	4,31 $\mu\Omega/\text{cm}$
- Température maximale d'emploi de la résistance .....	1850 °C - 1900 °C
- Coefficient de température de la résistivité entre 0 °C et la température d'emploi .....	$5,96 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
- Densité de puissance maximale à la température du régime ....	2W/cm <sup>2</sup>

Un coefficient de température positif produit une certaine autorégulation de la puissance dissipée puisque, en cas d'augmentation accidentelle de la température, la valeur de la résistance s'accroît et la puissance dissipée diminue.

Une étude comparative avec d'autre alliage de résistance permet de mieux comprendre les conditions d'utilisation du Rhodium comme résistance chauffante.

##### 4-b Résistance à base d'alliage de Nickel et de Chrome :

Ni 70-Cr 30 [6]

- Point de fusion .....	1400 °C
- Température maximale d'utilisation .....	1250 °C
- Coefficient moyen de la température de la résistivité...	$0,058 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
- Résistivité à 20 °C .....	118 $\mu\Omega/\text{cm}$

##### 4-c Résistance à base de Fer - Chrome - Aluminium :

Cr 22 - Al 4,5 - Fe

- Point de fusion .....	1500 °C
- Température maximale d'utilisation en régime permanent de l'élément .....	1280 °C
- Coefficient moyen de température de la résistivité.....	$0,07 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$
- Résistivité à 20 °C .....	135 $\mu\Omega/\text{cm}$

Ces alliages sont magnétiques en dessous du point de curie ( de l'ordre de  $730^{\circ}\text{C}$  ) et amagnétiques au-dessus [6] .

#### 4-d Calcul de la résistivité à $T^{\circ}\text{C}$ :

soit  $\rho_n$  : cette résistivité

si  $\rho$  : résistivité à  $T_0^{\circ}\text{C}$

$\alpha$  : coefficient de température de la résistivité

$$\text{on a} : \rho_n = \alpha \times \rho (T - T_0) \quad [ \text{M}\Omega \cdot \text{cm} ]$$

A  $1700^{\circ}\text{C}$ , pour le Rhodium :

$$\rho_{1700^{\circ}\text{C}} = 5,96 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C} \times 4,3 \text{ M}\Omega \text{ cm} \times 1700^{\circ}\text{C}$$

avec :  $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$

$$\rho_{1700^{\circ}\text{C}} = 43,5676 \text{ M}\Omega \text{ cm}$$

#### 4-e Tableau comparatif en fixant T à $1200^{\circ}\text{C}$ :

Nature de la Résistance :	Rhodium	Ni 70-Cr 30	Cr 22-Al 4,5-Pb
Coefficient moyen de température	$5,96 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$	$0,058 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$	$0,07 \cdot 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$
Résistivité :	$30,7536 \text{ M}\Omega \text{ cm}$	$8,0759 \text{ M}\Omega \text{ cm}$	$11,151 \text{ M}\Omega \text{ cm}$

Tableau n°2

#### Conclusion :

Le coefficient moyen de température de la résistivité du Rhodium est 100 fois plus grand que celui du Ni70-Cr30 ou du Cr22-Al4,5-Pb . La résistivité du Rhodium croît assez fortement avec la température, l'utilisation du Rhodium comme élément chauffant nécessite un dispositif de démarrage limitant la puissance à basse température.

Tandis que pour le Ni70 - Cr30 et le Cr22 - Al4,5 - Fe, la variation de la résistivité avec la température est très faible. Ces dernières résistances sont utilisables sans dispositif particulier de démarrage.

### I-5 Principe de chauffage :

Au cours d'un cycle complet de traitement dans un four électrique, on se trouve en présence de trois catégories principales de transferts thermiques :

- Transfert de chaleur du corps de chauffe (résistance chauffante) vers la charge et le four. Chauffage du four tant pour la mise en température que pour la marche normale en régime permanent.

- Transfert de chaleur de la charge chauffée vers la masse du four et à partir de la masse vers l'extérieur. Refroidissement naturel de la charge et du four.

- Transfert de chaleur particulier. Refroidissement par convection forcée de la charge. Refroidissement du système de manutention. Refroidissement des extrémités de certaines résistances.

Les échanges thermiques entre les résistances, la charge et les parois du four obéissent aux lois de rayonnement, notamment celles de STEFAN-BOLTZMANN, de PLANCK-WIEN et de KIRCHHOFF.

#### 5-a Loi de STEFAN - BOLTZMANN :

Le flux thermique échangé entre les éléments chauffants et la charge est de la forme :

$$\Phi = \epsilon_{RC} F S \sigma (T_R^4 - T_C^4)$$

où :  $T_R$  et  $T_C$  ; températures absolues des résistances et de la surface de

$\epsilon_{RC}$  ; coefficient tenant compte des émissivités  $\epsilon_R$  et  $\epsilon_C$  des résistances et de la charge.

$F$  ; facteur de forme global du four

$\sigma$  ; constante de STEFAN

$S$  ; aire de la surface émettrice

Cette expression montre l'importance de pouvoir disposer de corps de chauffe émettant à température élevée pour obtenir des densités de puissance importantes.

#### 5-b Loi de PLANCK - WIEN :

La répartition spectrale de l'énergie rayonnée suit la loi de PLANCK :

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

où :

- $M_{\lambda}$  : puissance rayonnée en watts par mètre carré par micron correspondant à la longueur d'onde .
- $C_1$  : constante égale à  $3,741 \cdot 10^8 \text{ W Um}^4 / \text{m}^2$
- $C_2$  : constante égale à  $14388 \text{ Um.K}$
- $\lambda$  : longueur d'onde en micromètres

La loi de PLANCK donne en fonction de la température et de la longueur d'onde considérée l'émittance monochromatique  $M_{\lambda}$  du corps noir pour la longueur d'onde  $\lambda$  .

Le maximum d'émittance monochromatique (pouvoir émissif rapporté à la longueur d'onde) à la température absolue  $T$  correspond à la longueur d'onde  $\lambda_m$  déterminée par la loi de Wien :

$$C = T \cdot \lambda_m$$

$\lambda_m$  : longueur d'onde en microns ( $\mu\text{m}$ )

$T$  : température en degré Kelvin

$C$  : constante égale à 2898

#### 5-c Loi de KIRCHHOFF :

La loi de KIRCHHOFF indique que pour chaque longueur d'onde et chaque direction de propagation du rayonnement émis par une surface ou incident sur celle-ci. Les émissivités et absorptivités monochromatiques directionnelles sont égales :

à :

$$\varepsilon_{\Delta\lambda} = \alpha_{\Delta\lambda}$$

5-d Loi de JOULE :

Le chauffage des fours à résistances repose sur la loi de JOULE. La puissance électrique transformée en chaleur s'exprime par :

$$P = UI = RI^2 = U^2/R \quad (P \text{ exprimée en watts})$$

Pendant un temps  $t$ , l'énergie électrique transformée en chaleur est :

$$Q = Pt = RI^2 t$$

$Q$  : en joules

$t$  : en secondes

1 KWH = 3600 KJ

KWH / kilo -watt -heure

KJ : kilo-joule

Le transfert de chaleur s'opère soit directement entre les résistances et la charge. Soit indirectement par réflexion sur les parois du four ou par réémission de ces parois portées à hautes températures.

## CHAPITRE -II

- ANALYSE DESCRIPTIVE

DE L'EQUIPEMENT-

### III - ANALYSE DESCRIPTIVE DE L'EQUIPEMENT :

#### II - 1 Description :

Le groupe de commande et de régulation pour le four HERAEUS type ROR 2,5 /30 1700°C est constitué par :

- Un galvanomètre étalonné en degré celsius, muni de régulateur de température, du détecteur de position et d'un programmeur de température maximale.

- Un circuit de puissance

- Une alimentation principale

- Un bloc contenant deux générateurs d'impulsion électronique et une source de tension additionnelle.

Raccordé au système, on trouve le four avec le capteur de température à l'intérieur. La figure n°1 nous donne une représentation schématique de l'ensemble.

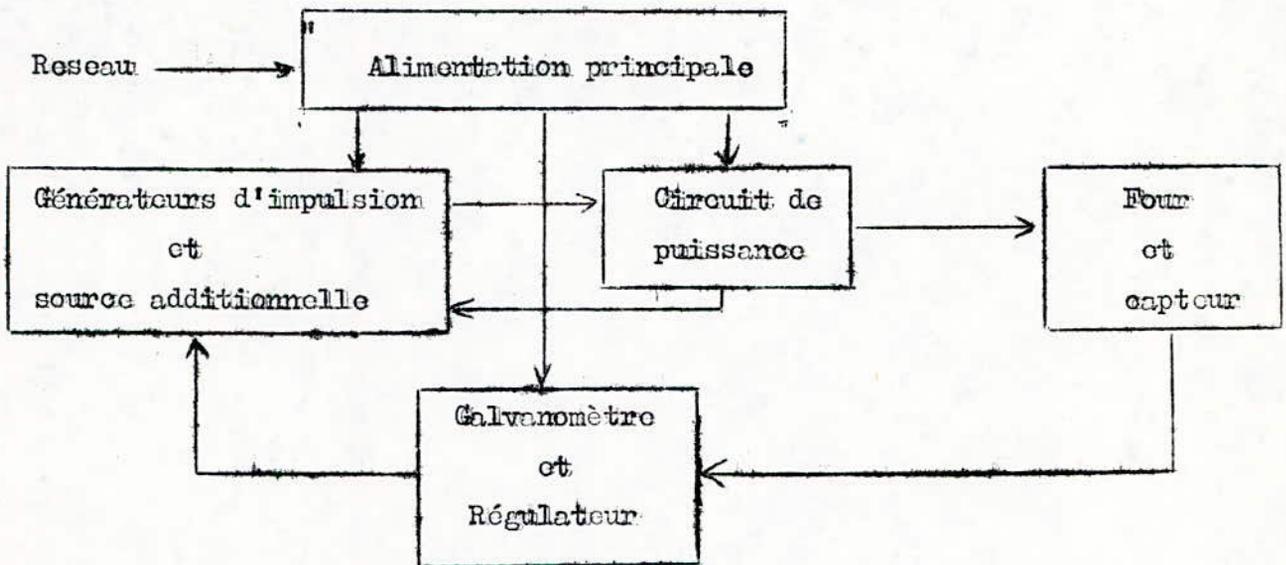


Fig.2 : Représentation schématique de l'équipement.

### 1-a L'alimentation principale :

L'alimentation principale reliée

au réseau monophasé comprend :

- l'interrupteur principal
- une ampoule signalitique pour tout le système
- un transformateur permettant l'adaptation de l'équipement de puissance à la tension du réseau et son isolation galvanique par rapport à ce dernier [8]
- un fusible lent inséré au primaire du transformateur. Ce fusible sert de protection contre les surcharges et les court-circuits. Il est aussi choisi pour supporter le courant d'enclenchement du transformateur.

### 1-b Le circuit de puissance :

Il comprend :

- deux thyristors AEG T50 N500 EOA, montés en tête bêche avec radiateur
- un ensemble de deux résistances et condensateurs
- un transformateur de courant AGTO 75/5 A, 20 VA, 50 HZ avec en parallèle au secondaire une résistance de faible valeur  $3\Omega$  max
- deux fusibles sablés 63A, 500V.

### 1-c Le bloc de commande :

Il comprend :

- deux générateurs d'impulsion
- une source additionnelle
- un transformateur à sortie multiple permettant l'alimentation des divers modules
- un circuit de redressement et de filtrage pour la polarisation des transistors

### I-d Galvanomètre :

Il contient :

- un circuit de mesures
- l'organe de consigne. Le consigne étant fixé par l'opérateur de l'extérieur. Ainsi que la remise à zéro
- le régulateur de température
- un relais électromagnétique
- le détecteur de position

### I-e le four :

Il contient un capteur de température, inséré parallèle à son axe (axe du four).

### II-2 Etat du four :

Le groupe de commande et de régulation avait des parties qui ne fonctionnaient pas :

- le régulateur de température
- un générateur d'impulsion
- le relais qui était hors circuit
- la fiche de l'alimentation ne correspondait pas au réseau

### II-3 Documents manquants :

Au commencement des travaux, nous avons reçu de la part du constructeur les schémas suivants :

- un schéma des générateurs d'impulsions électroniques
- un schéma du circuit de puissance
- un catalogue pour le four tubulaire HERBES EW-D 1

Les autres schémas ont été donc reconstitués à partir du circuit réel. Comme aucune description concernant le fonctionnement du four et de son système de régulation n'était disponible, cette documentation était à reconstituer. Néanmoins, le catalogue a permis d'avoir les caractéristiques du four.

CHAPITRE -III

- LES CAPTEURS DE MESURES -

### III -- LES CAPTEURS DE MESURES :

#### III-1 Définition :

Les grandeurs physiques élémentaires (température, niveau, pression ....) que l'on veut exploiter, se présentent rarement sous une forme directement utilisable dans les circuits électroniques d'un équipement.

Pour conduire une opération, un système de commande a besoin d'information sur la situation actuelle du système à régler.

Ces signaux d'informations sont fournis par des capteurs de mesures. Le capteur est en fait un convertisseur de précision transformant la grandeur physique mesurée, en une grandeur électrique corrélée.

#### III-2 Les capteurs de température :

Il existe une variété de capteur de température selon le phénomène exploité :

- La dilatation d'un liquide dans un enveloppe métallique ou en verre utilisé par les thermomètres à pontane, à alcool et à mercure....  
travaillant entre :  $200^{\circ}\text{C}$  et  $750^{\circ}\text{C}$  [4]

- La variation de la résistance électrique, utilisée par les thermomètres à résistance : platine, cuivre, nickel ....  
travaillant entre :  $-260^{\circ}\text{C}$  et  $+260^{\circ}\text{C}$  [4]

- Les thermistances COTN qui sont caractérisées par leur coefficient de température négatif élevé :  $-6,5\%$  par  $^{\circ}\text{C}$  à  $25^{\circ}\text{C}$   
La valeur de la résistance diminue rapidement quand la température augmente. Les COTN sont utilisables entre :  $-80^{\circ}\text{C}$  à  $700^{\circ}\text{C}$  [5]

- Les lois du rayonnement du corps noir utilisé par les pyromètres optiques travaillant entre :  $200^{\circ}\text{C}$  à  $3500^{\circ}\text{C}$  [5]

- La thermoélectricité, utilisée par les couples thermoélectriques travaillant entre :  $-100^{\circ}\text{C}$  à  $1800^{\circ}\text{C}$  [4]

## 2-1 Les thermocouples :

a- Définition : Un couple thermoélectrique est un dispositif constitué de deux conducteurs métalliques de nature différente, reliés à leurs extrémités.

La mise en oeuvre des thermocouples est basée sur la différence de température entre les deux contacts ou soudures.

b- Principe et Caractéristique : Le principe des couples thermoélectriques est basé sur les lois suivantes :

Première loi : Loi des circuits homogènes

Aucun courant électrique n'apparaît dans un circuit d'un seul conducteur homogène, même si sa section varie par application de la chaleur seule. La f.e.m. développée dans un circuit de deux conducteurs est donc indépendante des gradients de température qui peuvent exister le long de chacun des conducteurs, pourvu que ceux-ci soient homogènes. Elle ne dépend que des températures  $T_X$  et  $T_A$  des jonctions (FIG-3) [9] [5]

Ainsi, en portant les contacts à des températures différentes, on constate l'apparition d'un courant. (FIG-3)

Par conséquent, en ouvrant le circuit à un endroit quelconque (généralement l'un des contacts), ce dernier se comporte comme un générateur dont la f.e.m. dépend de la nature du couple et de la différence de températures entre les jonctions (FIG-4).

Par convention, on appelle soudeuse chaude, la jonction de mesure, et soudeuse froide, la jonction de référence bien qu'à ce niveau il n'y ait pas de contact (FIG-5). Ainsi, si la soudeuse chaude est portée à la température  $T_X$  et la soudeuse froide à l'ambiante  $T_A$ , la f.e.m. délivrée par le couple vaut :

$$E(T_X, T_A) = C(T_X - T_A) \quad [5]$$

Le coefficient  $C$  dit coefficient de SEEBECK dépend du couple; et  $C$  varie entre : 10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  et 50  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Si  $T_A = 0^\circ\text{C}$ , on lit après une multiplication avec le coefficient de Seebeck, directement la température  $T_X$ . On peut aussi effectuer une compensation fixe si  $T_A$  est constante.

Dans les cas les plus courants, on met en oeuvre un circuit dit de compensation de soudure froide. De cette façon on réalise la relation :

$$E(T_X, T_A) = C(T_X - T_A) + CT_A \quad [5]$$

Le circuit de traitement peut alors être plongé dans une ambiante dont la température varie sans entacher la mesure d'une erreur.

#### Deuxième loi : Loi des conducteurs intermédiaires

La somme algébrique des f.e.m développées dans le circuit formé d'un nombre quelconque de conducteurs différents est nulle. Ainsi l'introduction d'un appareil de mesure dans un circuit thermoélectrique ne fait apparaître aucune f.e.m parasite, si les deux jonctions du couple à cet appareil sont à la même température ainsi que toutes les soudures entre les différents métaux qu'il comporte (FIG. 6) [9] [4]

La FIG. 6 montre que " une série de soudures isothermes se comporte comme une soudure direct des métaux extrêmes " .

DE même, la soudure entre les éléments  $M_1$  et  $M_2$  du couple peut être assurée par un troisième élément C à condition que les jonctions  $M_1/C$  et  $M_2/C$  sont à la même température (FIG. 7) [9]

Par contre, si l'un des conducteurs présente des hétérogénéités (impuretés, différent de l'état physique....) dans une partie qui traverse une région présentant un gradient de température, des f.e.m parasites prendront naissance.

D'une manière générale, on peut écrire pour un nombre quelconque de conducteurs C, D, ..., I interposés entre les conducteurs  $M_1$  et  $M_2$  [9]

$$E_{T_X}^{T_A}(M_1 / M_2) = E_{T_X}^{T_A}(M_1 / C) + E_{T_X}^{T_A}(C/D) + \dots + E_{T_X}^{T_A}(I / M_2)$$

### Troisième loi : Loi des températures intermédiaires

La force thermoélectrique d'un couple de deux conducteurs  $M_1$  et  $M_2$  dont les soudures sont aux températures  $T_X$  et  $T_m$ , est la somme algébrique des forces thermoélectriques des couples de même conducteurs  $M_1$  et  $M_2$  dont les soudures seraient aux températures :

$$T_X \text{ et } T_1, T_1 \text{ et } T_2, \dots, T_{n-1} \text{ et } T_m \quad [9]$$

$$E_{T_m}^{T_X} (M_1/M_2) = E_{T_X}^{T_1} (M_1/M_2) + E_{T_1}^{T_2} (M_1/M_2) + \dots + E_{T_{n-1}}^{T_m} (M_1/M_2)$$

#### c- Qualités requises pour les thermocouples :

Pour répondre aux exigences d'un service industriel, les thermocouples doivent :

- Développer une f.e.m. aussi grande que possible, fonction continue de la température.

- Être suffisamment durables, et il faut envisager par là non seulement leur résistance à la corrosion et aux chocs, mais encore la propriété de conserver à une température donnée une f.e.m. invariable.

- Être interchangeables, c'est-à-dire que les appareils de lecture ne doivent nécessiter aucun réétalonnage ni aucune correction lorsqu'on substitue un thermocouple à un autre de même nature.

#### d- Vieillesse des thermocouples :

La f.e.m. développée par un couple à une température donnée ne reste pas rigoureusement constante avec le temps.

L'expérience a permis en outre de constater souvent une augmentation de sa résistance qui a pour effet de faire diminuer la valeur indiquée de la température quand on emploie la méthode de mesure galvanométrique.

Le temps au bout duquel ces phénomènes apparaissent et la rapidité de leur évolution dépendent beaucoup de la température de fonctionnement,

de la nature de la canne pyrométrique, de l'atmosphère de l'encinte et du diamètre des fils.

Quand il est utilisé près de sa température limite d'emploi, comme le cas en est fréquent en métallurgie, son vieillissement sera relativement accéléré.

L'expérience montre aussi que les thermocouples dont les fils sont de forte section, vieillissent moins vite que ceux de diamètre compris entre 3 à 5/10 de mm, comme le couple Pt - Rh, par exemple. [4]

#### 2-2 Câble de compensation :

Très souvent, la soudure froide confondue avec les bornes de l'appareil de mesure, est très éloignée de la soudure chaude. Il serait particulièrement malhabile et onéreux de plonger les fils du thermocouple, car ils font l'objet d'élaboration et de sélection particulièrement sévères afin de leur assurer exactitude et fidélité dans une vaste plage de température. On substitue alors au fil du thermocouple et sur la majeure partie du trajet, un câble bifilaire appelé "câble de compensation".

En effet, la majeure partie de la chute de température entre celle mesurée et celle de la soudure froide a lieu sur quelques dizaines de centimètres. Le reste se trouve réparti sur la longueur restante. C'est donc dans un domaine relativement restreint de température et au surplus voisin de la température ambiante (100°C au maximum) que l'on demande au câble de compensation de remplacer sans erreur les fils du couple [4] [5] Les câbles de compensation doivent avoir les mêmes propriétés thermoélectriques que les fils du couple qu'ils remplacent.

Dans la FIG-8, les conducteurs C et C' peuvent être de même nature que ceux du couple ou de nature différente. Pour que la compensation se fasse correctement :

- Il faut que les températures des connexions  $\alpha$  et  $\alpha'$  entre les conducteurs du câble et les fils du thermocouple soient égales (FIG-8)
- Et que le couple formé par les deux fils (C et C') développe en P et P' la même f.e.m. que le couple (M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>). (FIG-8)

# CARACTERISTIQUES des couples thermoelectriques

## - loi des circuits homogènes

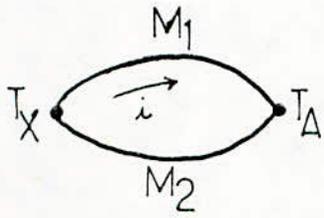


FIG-3 : apparition de courant quand les contacts du couple  $(M_1, M_2)$  sont portés à  $T_X$  et  $T_A$

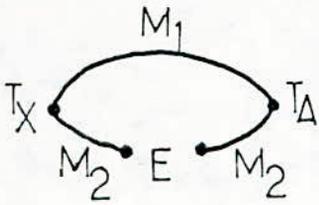


FIG-4 : ouverture du conducteur  $M_2$  engendre une f.e.m : E

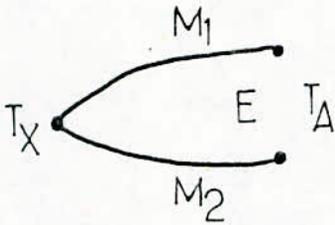


FIG-5 : jonction froide à la température  $T_A$   
jonction chaude à la température  $T_X$

## - loi des conducteurs intermédiaires

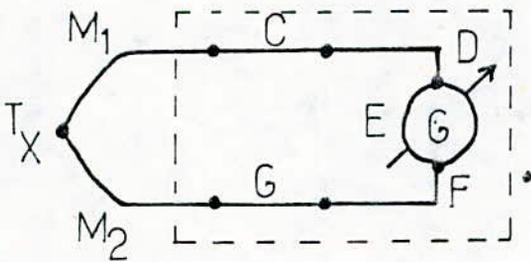


FIG-6 : influence de l'appareil de mesure

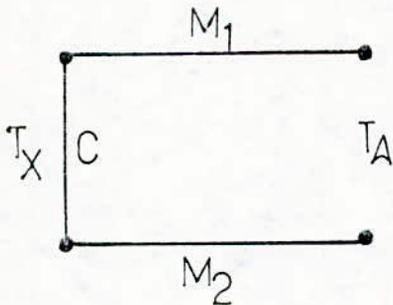


FIG-7 : conducteur "c" à la soudure chaude

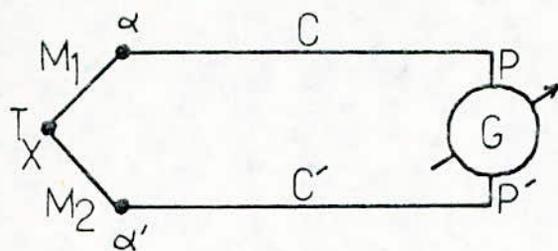


FIG-8 Couple Thermoélectrique  
avec son câble de compensation

2-3 Tableau des couples thermoélectriques normalisés :

symbole	type de couple	code de couleurs	coefficient de SEEBECK : C
T	Cuivre/Cuivre-Nickel (ancien cuivre-constantan)	BLEU	42,8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
J	Fer/Cuivre-Nickel (ancien fer-constantan)	NOIR	52,3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
E	Nickel-Chrome/Cuivre-Nickel (ancien Ni/Cr-constantan)	ROUGE	40,8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	Nickel-Chrome/Ni-Aluminium (ancien N" Ni-Cr/Ni allié')	VERT	6,4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
S	Platine 10% Rhodium/ Platine (ancien Pt. rhodié 10% Pt.)	VERT	6,4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
R	Platine 13% Rhodium/ Platine (ancien Pt. rhodié 13% Pt.)		6,4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
B	Platine 30% Rhodium/ Platine 6% Rhodium		5,6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Tableau n° 1

Il importe de ne pas intervenir les fils de compensation aux bornes  $\alpha$  et  $\alpha'$ . (FIG-8)

Suivant la plage de température étudiée, il existe de différents couples thermoélectriques normalisés (tableau n°1, page 20).

Dans ce qui suit, nous nous limiterons à l'étude du couple Pt-Rh/Pt-Rh III 18 utilisé comme capteur de température dans le four tubulaire type ROR 2,5/30 1700°C.

### III-3 Le couple Pt-Rh/Pt-Rh III 18 :

Ce couple qu'on trouve aussi sous le nom de couple Pt 30% Rh/ Pt 6% Rh, a été proposé d'abord en Allemagne par DEGUSSA il y a environ un demi-siècle sous le nom de "couple 18". Il est classé dans la norme française : E 18.001

On peut indiquer comme limites approximatives d'emploi :

- 1820°C pour un service de courte durée
- 1400°C pour un service continu prolongé

Pour les couples de ce type, la f.e.m. aux températures peu élevées, est très petite.

Pour le couple 18, elle peut être négligée dans la plupart des cas au-dessous de 50°C. Ce couple est utilisable sans jonction de référence à température connue. [ 13 ]

Ainsi : - Les caractéristiques du couple Pt-Rh/Pt-Rh III 18 est données dans le tableau n°2

- La correspondance entre température et f.e.m., à la jonction de référence à 0°C, est donnée dans le tableau n°3.

- La courbe de la f.e.m. en fonction de la température montre qu'à partir de 100°C, la f.e.m. varie linéairement par rapport à la température (FIG-9).

### III-4 Théorie d'étalonnage :

Comme les thermocouples vieillissent (sous chap-2-1-d), la valeur de la température indiquée peut diminuer quand on emploie la méthode de mesure galvanométrique.

## 3-a Tableau de caractéristiques du couple Pt-Rh/Pt-Rh EL 18

Couple thermoélectrique :	Elément (+) Platine 30 % Rhodium Elément (-) Platine 6 % Rhodium
Coefficient de Seebeck :	Entre 1000°C à 1600°C C = 10,6 UV/°C
Domaine d'emploi :	Service normal : 1000°C à 1700°C Exception : 1800°C
Comportement aux températures normales d'emploi - Atmosphère	Oxydante : Bonne Reductrice : Faible Récommandation : Oui
Tolérance d'interchangeabilité :	$\pm 5\%$ de la température en °C

Tableau n°2

## 3-b Table de correspondance : température/f.e.m

- Jonction de référence à 0°C

T°C "1948" :	0	200	400	600	800	1000	1100
f.e.m (mV) :	0	0,162	0,790	1,796	3,162	4,839	5,791
1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	
6,811	7,890	9,000	10,130	11,260	12,390	13,520	

Tableau n°3

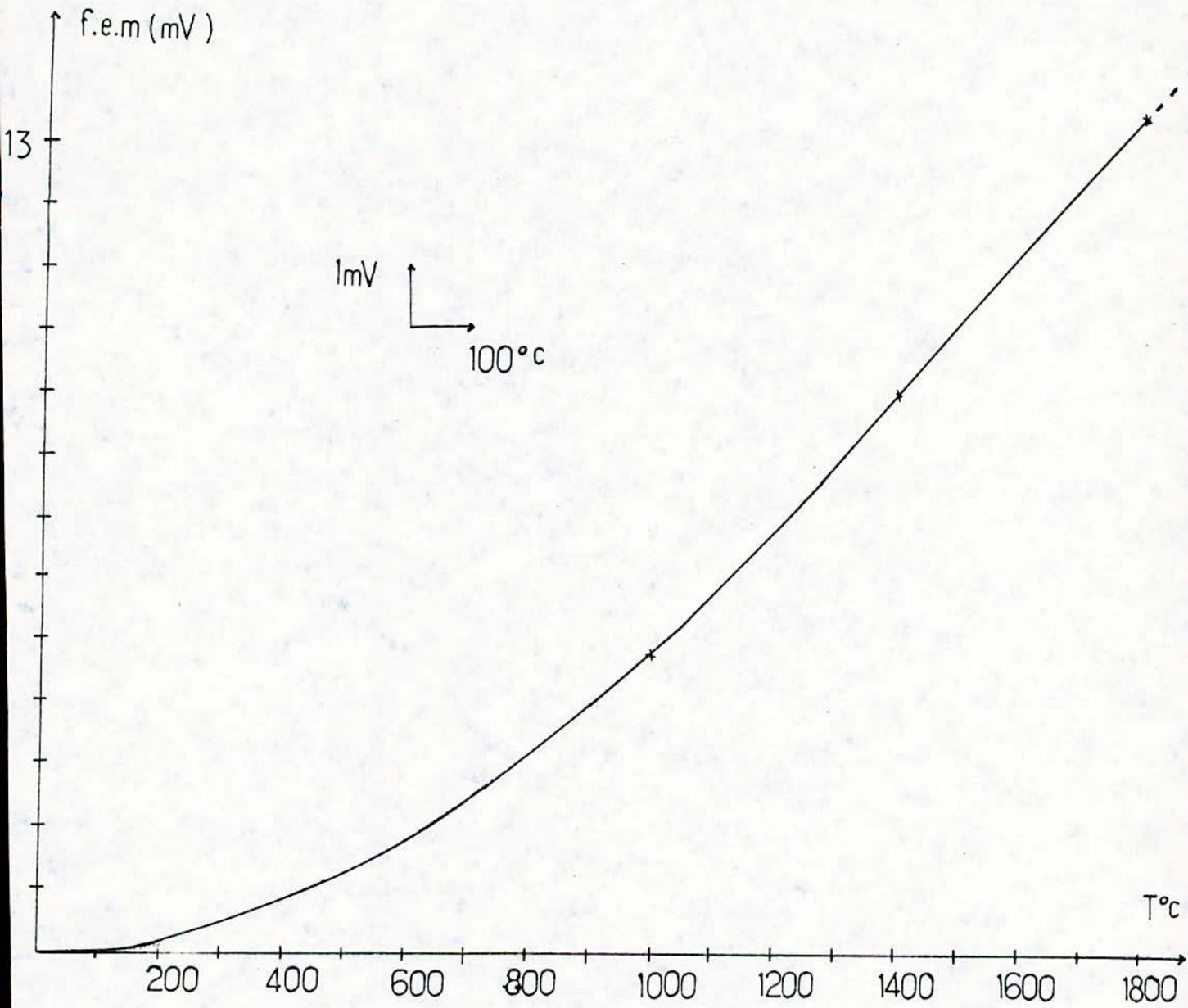


FIG-9

Force électromotrice en fonction de la Température  
 du couple  $P_t-R_h \setminus P_t-R_h$  EL 18 [13]

Tolérances admises pour le couple platine rhodié 10% / platine

selon [4]

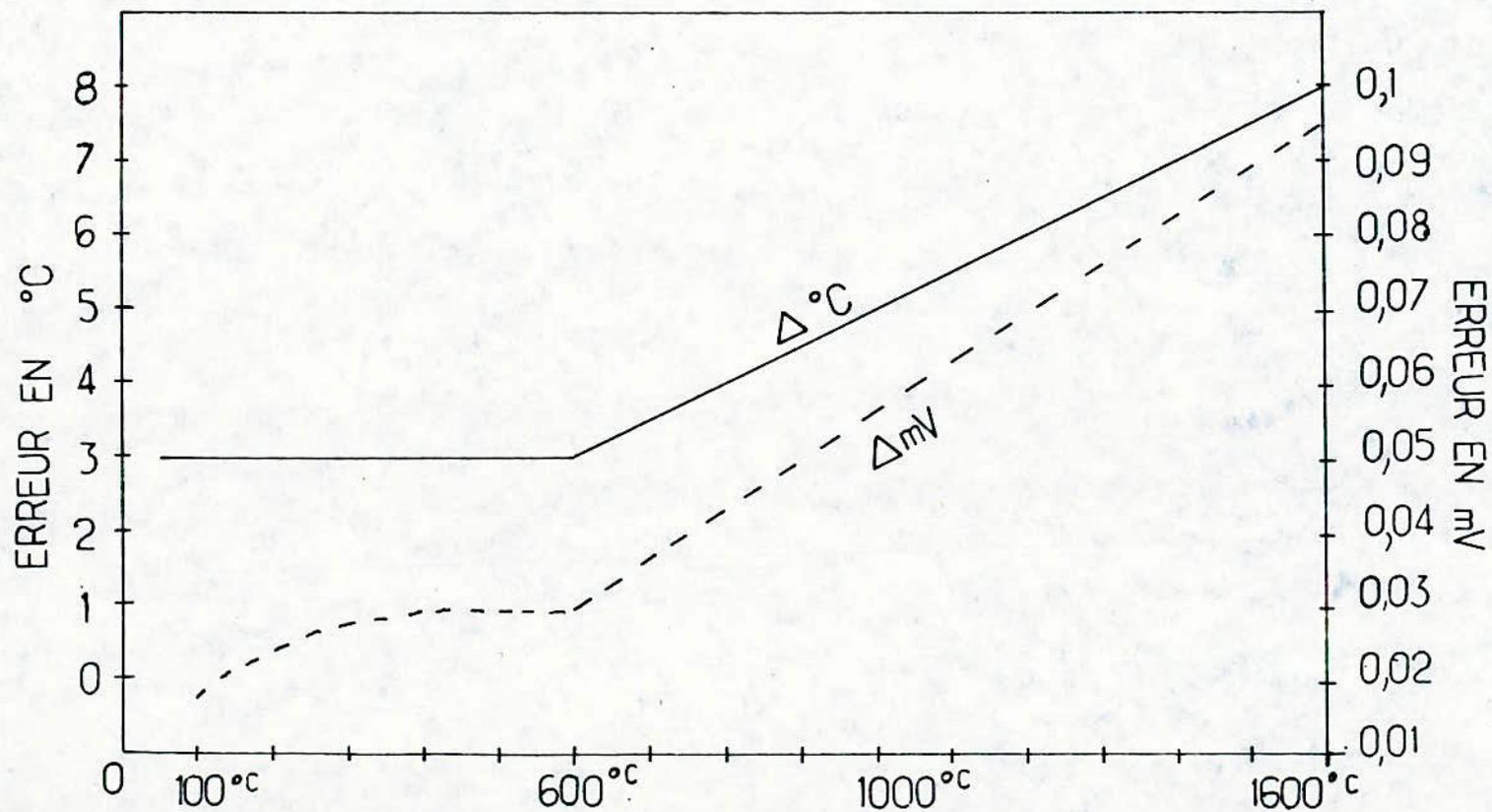


FIG-10

Toutefois, un contrôle et un étalonnage des thermocouples permettraient de réduire l'écart entre la valeur réelle et la valeur indiquée d'une température.

Les écarts maxima de f.e.m développée par un thermocouple que l'on peut rencontrer, ont été fixés après un contrôle statistique sur un grand nombre de couples. Malheureusement, les tolérances admises ne sont pas les mêmes dans tous les pays. Par exemple, elles sont plus serrées aux U.S.A qu'en France.

La FIG-10 représente graphiquement la norme allemande : DIN 43710/DEZ 57 dont les exigences se situent dans un juste milieu.

Il est difficile de déterminer à priori, le temps au bout duquel un couple thermoélectrique ne répond plus aux tolérances admises. La solution à adopter consiste à contrôler périodiquement les installations pyrométriques. Les opérations de contrôle se font généralement par comparaison avec un thermocouple étalon. L'opération d'étalonnage peut s'effectuer de différente façon :

#### 4-a Méthode des points fixes :

Les points de fusion, de solidification ou d'ébullition de certaines substances servent de repères thermométriques bien définis. Cette méthode est longue et délicate [ 1 ] .

#### 4-b Méthode de comparaison :

Elle consiste à placer côte à côte la ou les soudures chaudes des couples à étalonner avec celle du couple étalon, dans un four qui peut être stabilisé à différentes températures.

Les mesures des f.e.m sont faites au potentiomètre, et les températures déduites de la table d'étalonnage du couple étalon.

#### Remarque :

Si la soudure froide des thermocouples à étalonner est constituée par les bornes de l'appareil de mesure à la température ambiante  $T_A$ , alors que les tables de correspondance "f.e.m. - température" de l'étalon sont déterminées pour la source froide à 0°C, il y a lieu de faire une correction.

Cette correction se déduit de la loi des températures successives :

$$E(T_X - T_0) = E(T_X - T_A) + E(T_A - T_0)$$

Connaissant  $E$  avec précision, on lit sur la table  $E(T_A - T_0)$  la mesure donne

$E(T_X - T_A)$ , on en déduit  $E(T_X - T_0)$  puis  $T_X$  (Soudure chaude).

Les potentiomètres industriels sont munis d'un thermomètre de précision et d'un dispositif de compensation faisant automatiquement la correction de la soudure froide [1].

#### 4-o Méthode du thermocompensateur [15] :

Des appareils étalons peuvent être utilisés à cet effet, en l'occurrence le thermocompensateur :

Instruction manuel de référence

4101 GB 1D/E

qui est disponible au laboratoire de métallurgie.

L'étalonnage consiste donc :

- Soit à mesurer la f.c.m. développée par un thermocouple donné et la comparer à l'étalon.
- Soit à faire des mesures comparatives avec deux thermocouples de même sorte, afin de comparer à l'aide l'appareil les températures correspondantes respectives.
- On peut aussi effectuer la mesure de la f.c.m. développée par un couple, et faire la comparaison avec la valeur indiquée de la température sur le galvanomètre (millivoltmètre gradué directement en température)

Les Figures 11 et 12 montrent comment s'effectuent les mesures et comparaisons : Le sélecteur  $S_1$  (FIG-11) permet à la mise au point du courant auxiliaire qui alimente l'étalon. Il permet aussi la mise au point de la mesure. Le sélecteur  $S_2$  (FIG-11 et 12) permet de connecter successivement les thermocouples I et II, le millivoltmètre et le régulateur de tension.

Quand  $S_2$  (FIG-11) est sur la position 1,2, ou 3 l'appareil mesure les f.e.m correspondantes et les compare à l'étalon.

Quand  $S_2$  (FIG-12) est sur la position 1, le millivoltmètre est connecté à la Résistance de la ligne.

Sur la position 2, le millivoltmètre est alimenté (FIG-12)

Sur la position 3 ou 4, le millivoltmètre effectue la conversion mV en °C (FIG-12)

Enfin, l'étalonnage a donc pour but de corriger la valeur indiquée de la température, pour s'approcher dans la mesure du possible de la tolérance admise .

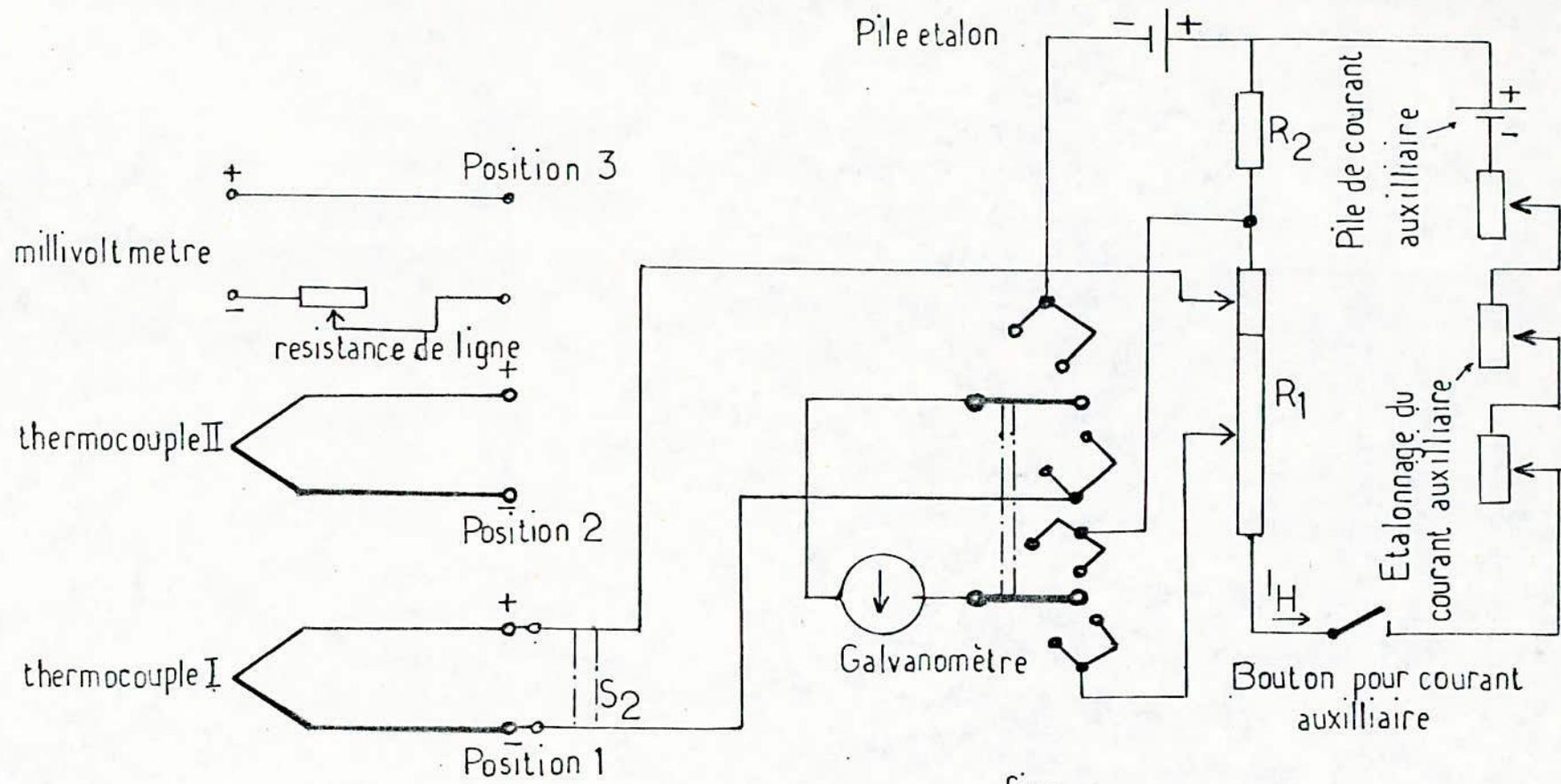
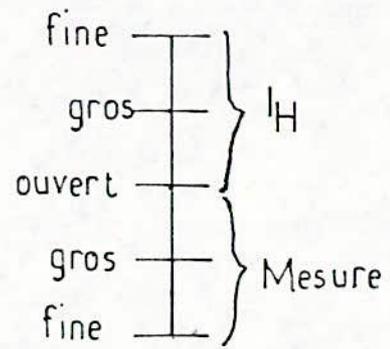


FIG 11 : Comparaison avec l'etalon



Le selecteur  $S_2$  permet une rapide permutation à une seconde mesure .

Et un avantage particulier de comparaison de mesure entre deux thermocouples //

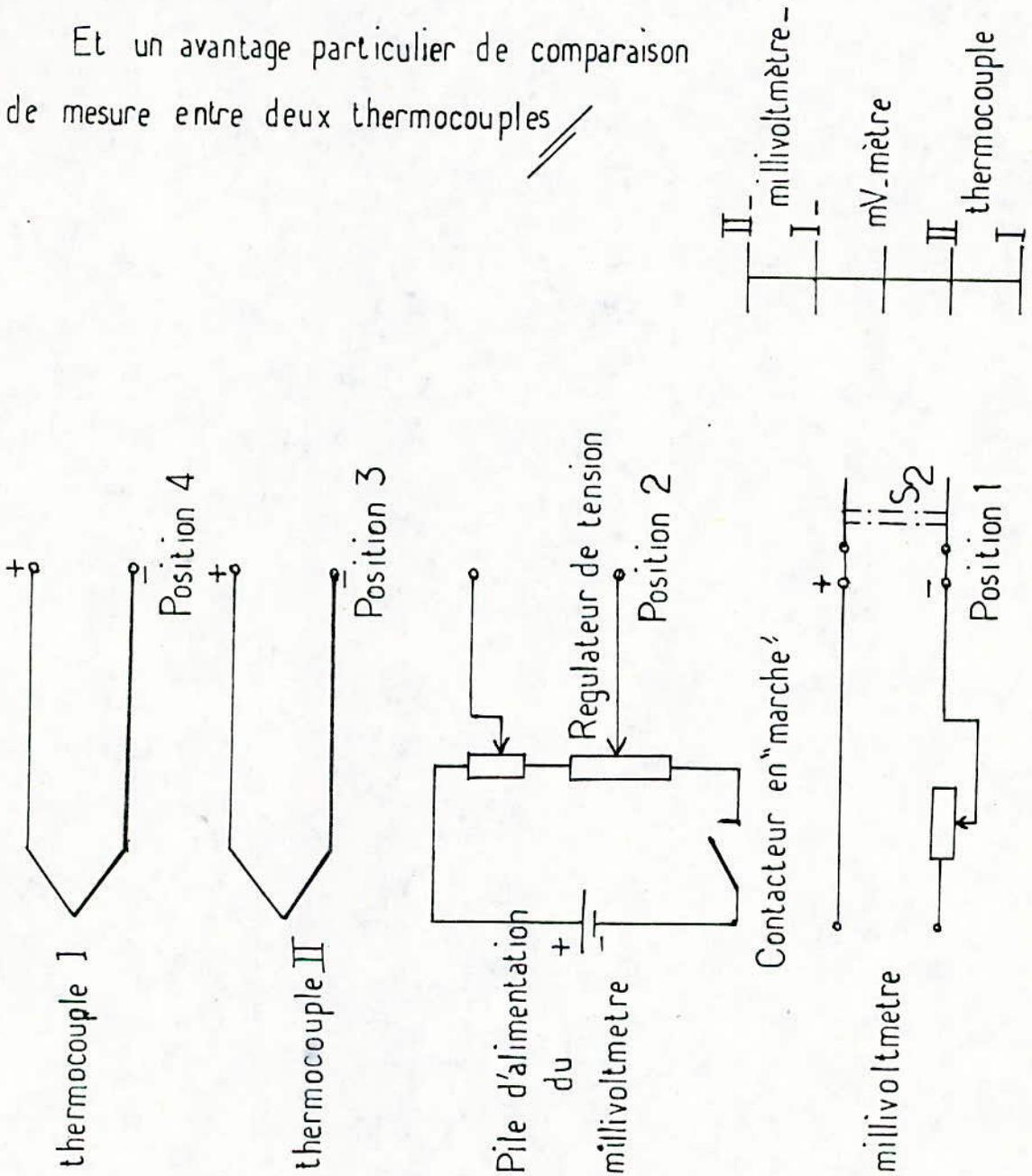


FIG 12 Comparaison de mesure

CHAPITRE-IV

-ETUDE DE REGULATION-

-REGULATION DE TEMPERATURE-

## IV- ETUDE DE REGULATION - REGULATEUR DE TEMPERATURE :

1<sup>ère</sup> Partie : Etude de régulation :1- Généralités :

La régulation est une opération qui utilise une rétroaction pour faire fonctionner un mécanisme de commande. La régulation automatique consiste à maintenir à une valeur déterminée une quantité ou une variable d'état en mesurant sa valeur actuelle et en la comparant avec la valeur prescrite dite : consigne. L'écart entre ces deux valeurs est traduit sous forme d'un signal d'action qui agira sur les organes de réglage (commande) chargé de rétablir la stabilité et l'état initial du système. Globalement, la régulation peut être représentée par le schéma de la Figure 13.

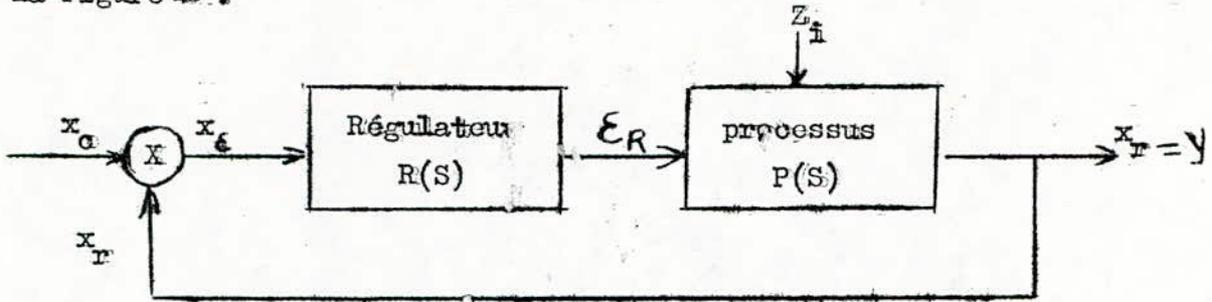


FIG-13 : Représentation schématique de l'opération de régulation

1-a Régulateur : Le régulateur est un dispositif ayant pour but de faire varier l'entrée  $e_R$  du processus de manière à réduire le plus possible l'écart  $x_e$  entre la grandeur d'entrée  $x_c$  et la grandeur de sortie  $x_r$  (grandeur réelle).

Les grandeurs  $Z_i$  symbolisent les perturbations extérieures que peut subir le processus (système à asservir).

2- Processus de régulation : L'opération de régulation se fait en plusieurs étapes, selon un processus bien déterminé. Ce processus peut être représenté par le schéma fonctionnel de la Figure 14.

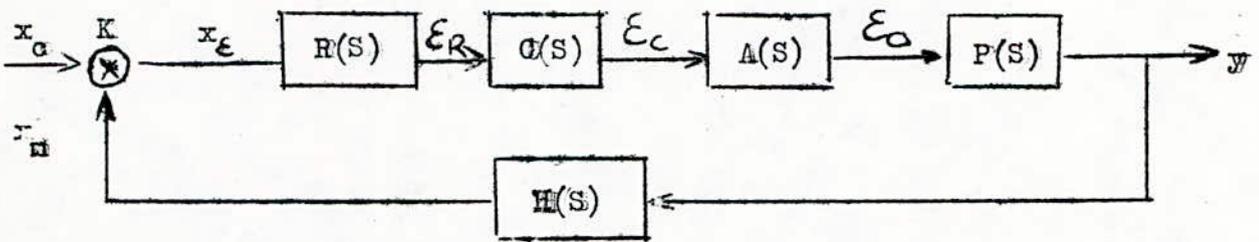


FIG-14 : Schéma fonctionnel de la régulation automatique

- $x_c$  : valeur prescrite ou consigne  
 $x_m$  : valeur actuelle (mesurée)  
 $x_e$  : signal d'écart  
 $\epsilon_R$  : grandeur réglante  
 $\epsilon_c$  : signal de commande  
 $\epsilon_o$  : grandeur asservie  
 $y$  : grandeur réglée  
 $K$  : comparateur  
 $R(S)$  : régulateur  
 $G(S)$  : élément de commande  
 $A(S)$  : élément à asservir  
 $P(S)$  : processus (élément du système)  
 $H(S)$  : élément de retour (de réaction)

### 2-a Définition :

- 1) Grandeur réglée : C'est la grandeur que le système de régulation a pour mission de maintenir constante.
- 2) Grandeur asservie : C'est la grandeur sur laquelle agiront les organes de réglage et dont la variation aura pour but de maintenir la grandeur réglée à une valeur constante.
- 3) Comparateur : Il est l'organe qui effectue la fonction de comparaison entre la valeur de consigne  $x_c$  et la valeur mesurée  $x_m$ .

4) Organe de commande :

Les organes de commande, appelés souvent organes de réglage, ont un rôle d'interface entre les régulateurs et le système à asservir. Comme organes de sortie, ils ont essentiellement la tâche d'amplification en puissance, de sorte que les signaux de sortie des régulateurs à faible puissance, correspondant à la tension de commande, puissent intervenir sur le système à régler.

5) Elément de retour ou de réaction : L'élément de réaction constitue une liaison entre l'entrée et la sortie du système. Il est matérialisé principalement de capteur de mesure.

3- Les différents régulateurs : En fonction des objectifs fixés et la nature de la grandeur réglée, différents types de régulateurs peuvent être mis en oeuvre. Ceux-ci sont généralement classés dans deux grandes familles :

- Les régulateurs continus où on peut citer les régulateurs P, PI, PID,....
- Les régulateurs discontinus : ce sont les régulateurs à deux ou trois positions

Ici nous nous limiterons à annoncer les caractéristiques des régulateurs discontinus qui feront l'objet de notre système de régulation.

3-a Les régulateurs discontinus : Les régulateurs continus sont caractérisés par le fait que les signaux d'entrée et de sortie sont des signaux analogiques, variant de manière continue entre les limites données. Lorsque le système exige une action tout ou rien à son entrée, on doit avoir recours à des régulateurs à action à deux ou trois positions : ce sont des régulateurs discontinus. Ces régulateurs sont en principe des dispositifs hybrides, car à l'entrée est appliqué un signal analogique sous forme de tension continue, tandis que le signal de sortie est du type digital. Ce dernier est formé d'un ou deux signaux binaires, selon que le régulateur est respectivement à deux ou trois positions.

1) Régulateur à action à trois positions :

Le régulateur à action à trois positions permet d'enclencher un dispositif selon deux modes différents :

par exemple : marche avant ou arrière d'un servomoteur à vitesse constante. En plus, il existe une position où ce dispositif est déclenché.

Le schéma de principe d'un régulateur à action à trois positions est représenté à la Figure -15.

L'organe à action à trois positions est composé de deux bascules de Schmitt, qui réagissent selon l'écart de réglage :

$$x_{\epsilon} = x_c - x_r$$

Le signal logique de sortie  $S_2$  est fourni par une sortie inversée.

Un circuit de réglage contenant un organe à trois positions possède normalement un point de fonctionnement stable, pour lequel on a  $S_1 = S_2 = 0$ .

Afin de ne pas compromettre la stabilité du système, il est indispensable que l'hystérésis des bascules de Schmitt soit aussi petit que possible.

Les points de basculement  $X_{\epsilon_1}$  et  $X_{\epsilon_2}$  pour les signaux  $S_1$  et  $S_2$  doivent être ajustables et symétriques par rapport à l'origine de  $X_{\epsilon}$ .

2) Régulateur à action à deux positions : Le régulateur à action à deux positions permet d'enclencher et de déclencher un dispositif, comme on en a besoin, par exemple pour un réglage de chauffage (brûleur enclenché ou déclenché) ou pour commander un variateur de courant continu (contacteur statique enclenché ou déclenché).

Le principe d'un régulateur à action à deux positions est représenté schématiquement à la Figure- 16.

La différence entre la valeur de consigne  $x_c$  et la valeur réelle  $x_r$  i.e. l'écart de réglage  $x_{\epsilon}$ , est appliquée à l'entrée d'une bascule de Schmitt qui fournit le signal logique  $S$ .

En augmentant  $x_{\epsilon}$ , le signal de sortie est  $S=1$  pour  $x_{\epsilon} \geq x_{\epsilon a}$

En diminuant  $x_{\epsilon}$ , le signal de sortie passe à  $S=0$  pour  $x_{\epsilon} \leq x_{\epsilon b}$

Les points de basculement  $x_{\epsilon a}$  et  $x_{\epsilon b}$  doivent être symétriques par rapport à l'origine de  $x_{\epsilon}$  [8]. La différence  $x_{\epsilon a} - x_{\epsilon b} = x_{\epsilon h}$  est appelé hystérésis.

Dans une boucle de réglage qui contient un régulateur à action à deux positions, le fonctionnement ne peut être que quasi-stationnaire [8]. Autrement dit, le système à régler est enclenché et déclenché à des intervalles réguliers.

La fréquence de cette commutation dépend d'une part du comportement dynamique du système à régler et, d'autre part, de l'hystérésis du régulateur à action à deux positions.

2<sup>ème</sup> Partie : Régulateur de température du four HERAEUS  
type ROR 2,5/30 1700°C :

La Figure-17 représente le schéma de principe du régulateur de température du four HERAEUS type ROR 2,5/30 1700°C

Dans ce régulateur, un détecteur de position joue le rôle de comparateur. Pour ce four, le régulateur de température est inséré dans le galvanomètre. Ce régulateur est aussi appelé régulateur galvanométrique. [9]

Le galvanomètre à cadre simple comporte en plus un repère mobile dont la position est fixée par l'opérateur en face de la graduation du cadran qui correspond à la température à maintenir i.e la consigne.

Lorsque l'aiguille franchit le repère, elle déclenche le système qui commande l'alimentation du circuit de commande : c'est l'arrêt du chauffage dans notre cas, la consigne est atteinte.

La position de l'aiguille par rapport au repère peut être signalée par voie optique, mécanique ou électromagnétique. Dans notre cas, c'est la voie électromagnétique qui est utilisée : L'aiguille du galvanomètre porte une palette en aluminium qui s'interpose entre deux bobines (solidaires au repère mobile) disposées face à face. Elles font partie d'un circuit oscillant et sont couplées négativement [9]. Leur couplage dépend de la position de la palette : c'est le détecteur de position.

1- Circuit oscillant :

1-a Détermination de la valeur des inductances des bobines :

Pour avoir la valeur de l'inductance de chaque bobine, nous avons mesuré à l'oscilloscope le signal aux bornes de chaque circuit LC.

Au moment précis où la palette est dehors (quitte sa position entre les deux bobines) c'est-à-dire quand l'impédance en HF (haute fréquence) totale du circuit est annulée, l'amortissement devient nul.

Des oscillations sinusoïdales prennent naissance et gardent une amplitude constante. Ces oscillations sont entretenues avec une pulsation  $\omega$  qui est celle du circuit LC.

- Pour le premier circuit oscillant, on peut observer à l'oscilloscope la courbe de la Figure-18. Ces oscillations n'apparaissent que pour la période:  $T = 12,5 \mu s$ . On peut donc dire que:  $f = 1/T$  est la fréquence d'accrochage d'oscillations du circuit LC.

On a donc :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

et  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$  (1)

comme :  $C_1 = 5,1 \text{ nF}$  on peut tirer la valeur de  $L_1$  à partir de (1)

$$\text{soit : } L = 1/4\pi^2 f^2 C \quad (2)$$

$$\text{où : } f = 80 \text{ KHZ}$$

$$\text{alors : } \underline{L_1 = 0,776 \text{ mH}}$$

- Pour le deuxième circuit oscillant, on observe la même courbe que celle de la Figure-18 seulement le niveau de tension est beaucoup plus faible. On a : 1,5 volts crête à crête

$$T = 12,5 \mu s$$

même raisonnement que précédemment, en appliquant (1) et (2) pour :

$$C_2 = 2,4 \text{ nF}$$

$$\text{on a alors : } \underline{L_2 = 1,65 \text{ mH}}$$

Remarque : Les deux circuits oscillants sont réglés exactement sur la même fréquence.

1-b Coefficient de couplage : Placées au voisinage l'une de l'autre, les bobines  $B_1$  et  $B_2$  offrent respectivement des coefficients de self-inductances  $L_1$  et  $L_2$ . La géométrie de l'ensemble étant invariable dans le temps, un courant électrique variable  $i_1$ ,

sinusoïdal de la forme  $i_1 = I_1 \sin \omega t$ , crée dans la bobine  $B_1$ , lorsqu'il parcourt ses spires, un flux variable  $\varphi_1$ . Les lignes de champ associées à ce flux, et concentrées à l'intérieur de  $B_1$ , se referment dans l'espace qui entoure cette bobine. Une partie d'entre elles traverse  $B_2$ , y créant un flux  $\varphi_2$  variable synchrone de  $\varphi_1$ , selon la FIG-19.

Le flux  $\varphi_2$  est proportionnel à l'intensité du courant  $i_1$  qui traverse  $L_1$  :  $\varphi_2 = m \cdot i_1$  où  $m$  est appelé inductance mutuelle des bobines  $B_1$  et  $B_2$ .

Le coefficient  $m$  caractérise symétriquement l'ensemble  $B_1, B_2$ .

L'inductance mutuelle  $m$  varie de 0 (quand il n'y a pas de couplage entre  $B_1$  et  $B_2$ ), à la valeur maximale  $M$  :

avec : 
$$M = \sqrt{L_1 L_2}$$

Dans notre cas,  $M = 1,13$  mH lorsque le flux engendré par l'une des bobines traverse intégralement l'autre.

Le coefficient de couplage  $K$  est défini par la relation :

$$K = m/M = m/\sqrt{L_1 L_2}$$

$K$  est un nombre sans dimension, compris entre 0 et 1. Il traduit, physiquement, le pourcentage de flux qui passe dans  $B_2$ , par rapport au flux maximum  $M$  que cette bobine pourrait capter.

En fait, le couplage entre les deux bobines  $B_1$  et  $B_2$  est entre-tenu par un transistor BC 147 selon la FIG-20.

Les oscillations sont entretenues grâce au renvoi sur la base d'une fraction de la tension collecteur, qui se trouve de nouveau amplifiée et ainsi de suite. L'énergie perdue dans les éléments dissipatifs étant ainsi compensée. L'entretien des oscillations par le transistor est possible par le fait que la capacité de jonction base-collecteur  $C_0$ , dont l'impédance  $1/C_0 \omega$  diminue avec la fréquence.

## 2- Influence de l'interposition de la palette entre les bobines :

On a vu précédemment que lorsque la palette est dehors, des oscillations prennent naissance dans le circuit LC et sont entretenues par le transistor. L'introduction de la palette entre les bobines, augmente l'impédance du circuit

Ceci a pour effet de réduire le couplage entre  $B_1$  et  $B_2$  : les oscillations disparaissent.

Le circuit de la FIG-17 se comporte donc comme une source de tension. Cette source prend deux valeurs différentes suivant que la palette se trouve entre les bobines ou non.

La FIG-21 montre comment varie le signal de sortie  $S$  en fonction de l'écart :  $x_E = x_0 - x_r$

Quand  $x_E > 0$  c'est-à-dire pour  $x_0 > x_r$

Le signal de sortie  $S = 16$  volts

Pour  $x_E \leq 0$  c'est-à-dire pour  $x_0 \leq x_r$

Le signal de sortie  $S = 7$  volts

Conclusion : Par analogie avec la figure-16, ce régulateur peut être classé parmi les régulateurs discontinus tout ou rien à action à deux positions. Il est noté que l'écart  $x_E$  est donné par la position de la palette par rapport aux bobines.

3- Source de tension additionnelle : A l'entrée du circuit de mesure une source de tension additionnelle est placée en série avec les fils du thermocouple selon la FIG-22.

La résistance  $r_2 = 20 \Omega$  est une résistance d'équilibrage. Elle sert à traduire la f.e.m. issue du thermocouple plus celle issue de la source de tension additionnelle, en courant qui fera dévier l'aiguille du galvanomètre.

Le schéma de principe de cette source de tension additionnelle est donné par la FIG-23.

Cette source est matérialisée par un multivibrateur astable. Le chronogramme de la FIG-24 illustre son principe de fonctionnement.

La tension  $v_{b1}$  tend vers  $E$  selon la loi :

$$v_{b1} = E (1 - 2 \exp(-t/R_{b1} C_2)) \quad (1)$$

De même que :

$$v_{b2} = E (1 - 2 \exp(-t/R_{b2} C_1)) \quad (2)$$

où  $R_{b_1}$  et  $R_{b_2}$  : résistances de base respective de transistors  $T_1, T_2$

$C_1$  : capacité de liaison entre collecteur de  $T_1$  et la base de  $T_2$

$C_2$  : capacité de liaison entre collecteur de  $T_2$  et la base de  $T_1$

a- Calcul de la période : En partant de  $T_1$  bloqué et  $T_2$  saturé l'astable bascule dès que la tension  $v_{b_1}$  devient négative, puis il rebascule à nouveau quand la tension  $v_{b_2}$  devient négative, ainsi de suite selon le chronogramme de la FIG-24.

Lorsqu'au bout du temps  $t_0$  la tension  $v_{b_1}$  passe au-dessous de 0, le transistor  $T_1$  change de l'état bloqué à l'état saturé :

d'après (1) : si  $v_{b_1} = 0$   $\exp(-t_0/R_{b_1} C_2) = 1/2$

d'où :

$$t_0 = R_{b_1} C_2 \text{Log} 2$$

$$t_0 = (51.10^3 \times 100.10^{-6}) \text{Log} 2$$

$$t_0 = 3,5\text{s}$$


---

Au deuxième basculement de l'astable on a :  $v_{b_2} = 0$

si  $t_1$  le temps qu'il faut pour que  $T_1$  revienne à l'état initial

d'après (2) :  $\exp(-t_1/R_{b_2} C_1) = 1/2$

$$t_1 = R_{b_2} C_1 \text{Log} 2$$

comme  $R_{b_1} = R_{b_2}$  et  $C_1 = C_2$

on trouve :  $t_1 = 3,5\text{s}$

---

La période de l'oscillation est donc :

$$T = t_1 + t_0$$

$$T = 7 \text{ s}$$

Le rapport cyclique :  $t_1/t_0 = 1$

Donc l'astable est symétrique .

b- Calcul de la sortie de la source de tension additionnelle :

La tension du collecteur de  $T_2$  mesurée à l'oscillo, pour la période d'oscillations  $T = 7\text{s}$  donne :  $v_{o_2} = 0\text{v}$   $T_2$  saturé

$$v_{o_2} = -11\text{v} \quad T_2 \text{ bloqué}$$

Pour avoir  $v_s$  on peut faire le raisonnement suivant :

La tension  $v_{o_2}$  alimente le circuit de sortie selon le schéma de la

Fig-25 . Par la suite, nous notons  $v_{o_2} = v_1$

1<sup>er</sup> cas :  $v_1 = E$  i.e sa valeur maximale

On a le schéma équivalent à la FIG-26

$$v_s = R_2 i_3 \quad (1)$$

$$R_1 i_2 = (R_2 + R_3) i_3 \quad (2)$$

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (3)$$

$$E = i_1 (R_1 // (R_3 + R_2)) + R_4 i_1 \quad (4)$$

$$\text{Posons : } R_1 // (R_2 + R_3) + R_4 = Z \quad (5)$$

$$(4) \text{ et } (5) \quad i_1 = E/Z \quad (6)$$

$$(2) \text{ et } (3) \quad R_1 (i_1 - i_3) = (R_2 + R_3) i_3$$

$$i_3 = (R_1 / (R_1 + R_2 + R_3)) i_1 \quad (7)$$

$$(1), (6), (7) \text{ donne : } v_s = \frac{R_1 R_2 E}{(R_1 + R_2 + R_3) Z}$$

2<sup>e</sup> cas :  $v_1 = 0$  i.e à la masse

On a le schéma équivalent à la FIG-27

$$v_s = R_2 i_3 \quad (1)$$

$$E = R_1 i_1 + (R_2 + R_3) i_3 \quad (2)$$

$$R_4 i_4 = (R_2 + R_3) i_3 \quad (3)$$

$$i_4 = i_1 - i_3 \quad (4)$$

$$(3) \text{ et } (4) \quad i_1 = ((R_2 + R_3 + R_4)/R_4) i_3 \quad (5)$$

(2) et (5), (1) donne :

$$v_s = \frac{R_2 R_4 E}{R_4 (R_2 + R_3) + R_1 (R_2 + R_3 + R_4)}$$

Application numérique :

$$R_1 = 20K, R_2 = 4,8, R_3 = 250K, R_4 = 18K, R_5 = 2,4K$$

$$\text{Pour } V_1 = E = -11V \quad \underline{V_{s1} = -92,5 \mu V}$$

$$\text{Pour } V_1 = 0V \quad \underline{V_{s2} = -83,2 \mu V}$$

Conclusion : La tension de sortie  $V_s$  oscille entre  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  avec la période  $T = 7s$

#### 4- Intérêt de cette source de tension additionnelle :

Les observations de l'aiguille de mesure lors de la montée en température a permis la constatation suivant :

L'aiguille de mesure effectue périodiquement des petites oscillations de 10 secondes environ. D'après la FIG-22, la source de tension additionnelle détermine ces oscillations.

Théoriquement, la montée en température d'un four à résistance équipé

d'une régulation classique " tout ou rien " pilotée par la température d'ambiance du four, se fait selon la courbe à la FIG-28.

La température du four évolue en dents de scie avec une période  $T$  autour d'une température moyenne  $\theta_m$ . La période  $T$  est déterminée par la constante de temps du four. Les résistances chauffantes auraient la même efficacité de chauffage que si elles étaient portées à la température constante. Toutefois, pour les fours présentant une bonne précision de température comprise entre  $\pm 5$  et  $\pm 10^\circ\text{C}$ , la période est de l'ordre de la minute [6].

On peut donc dire que les petites oscillations engendrées par la source de tension additionnelle, sont utilisées en prévision de la phase de régulation (i.e quand la température de consigne serait atteinte).

Et ceci pour :

- réduire la période  $T$ , donc pour augmenter la sensibilité du système, accélérer le processus de régulation afin d'avoir plus de précision sur température du four
- diminuer l'erreur statique, compenser les frottements des pivots du galvanomètre.

5- Caractéristique  $V'_s = f(R_s)$  : (FIG-17) et (FIG-29)

Le galvanomètre est prévu par conception pour une régulation par tout ou rien à cet effet, le constructeur y a prévu un relais électromagnétique d'impédance interne égale à  $500 \Omega$ . Cette caractéristique a été relevée pour comprendre l'utilité de ce relais qui semble être connecté aux bornes  $V'_s$ .  $R_s$  est une résistance qui peut prendre les valeurs :  $100 \Omega$  à  $1100 \Omega$ .

Conclusion :  $V'_s$  varie très peu avec  $R_s$ . A cause de la nature de la résistance chauffante qui impose une même valeur de courant au démarrage comme en régime établi, nous avons pu établir que le relais n'est pas nécessaire au fonctionnement du système. Il demeure donc hors circuit. Dans ce qui suit, on le considère comme tel/

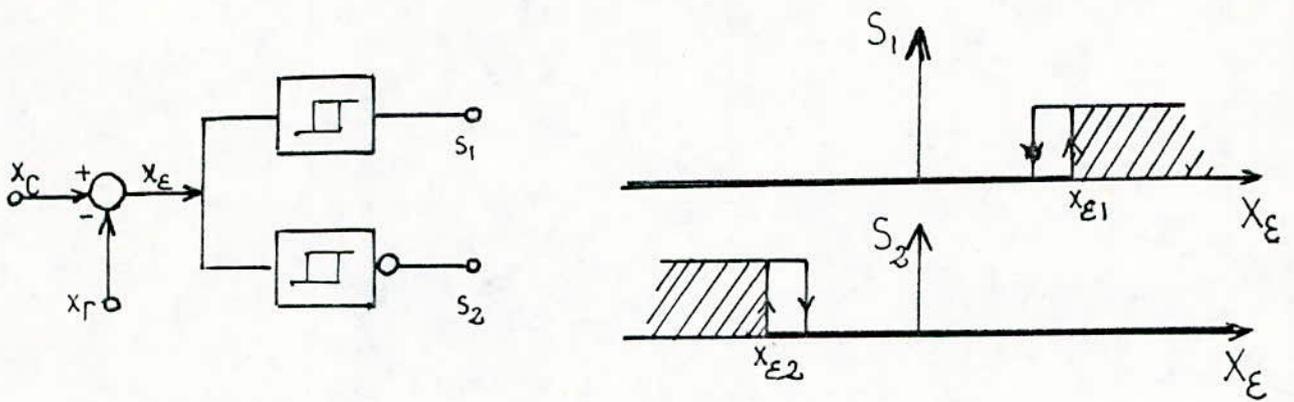


FIG 15 : Schema d'un regulateur à action à trois positions

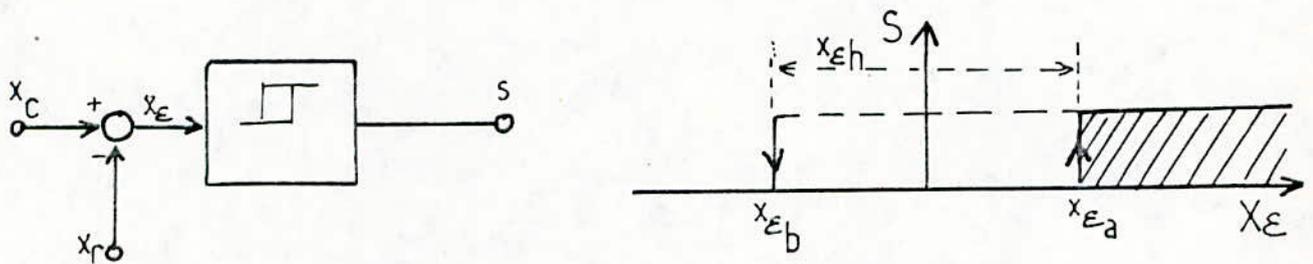


FIG 16 : Schema d'un regulateur à action à deux positions

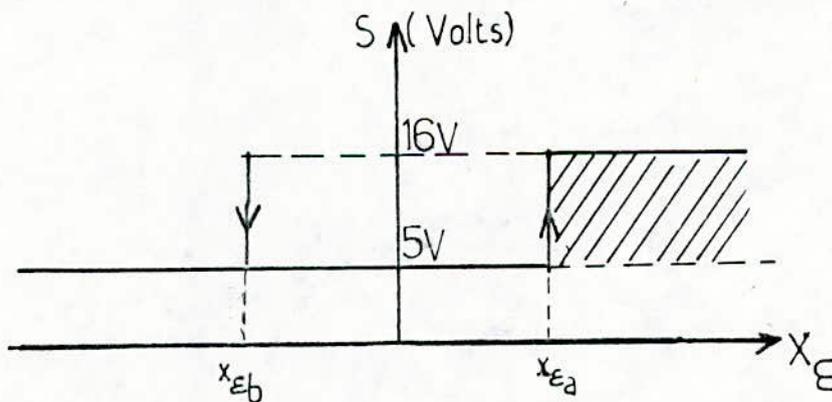


FIG 21 : Variation du signal de sortie S (fig 19)

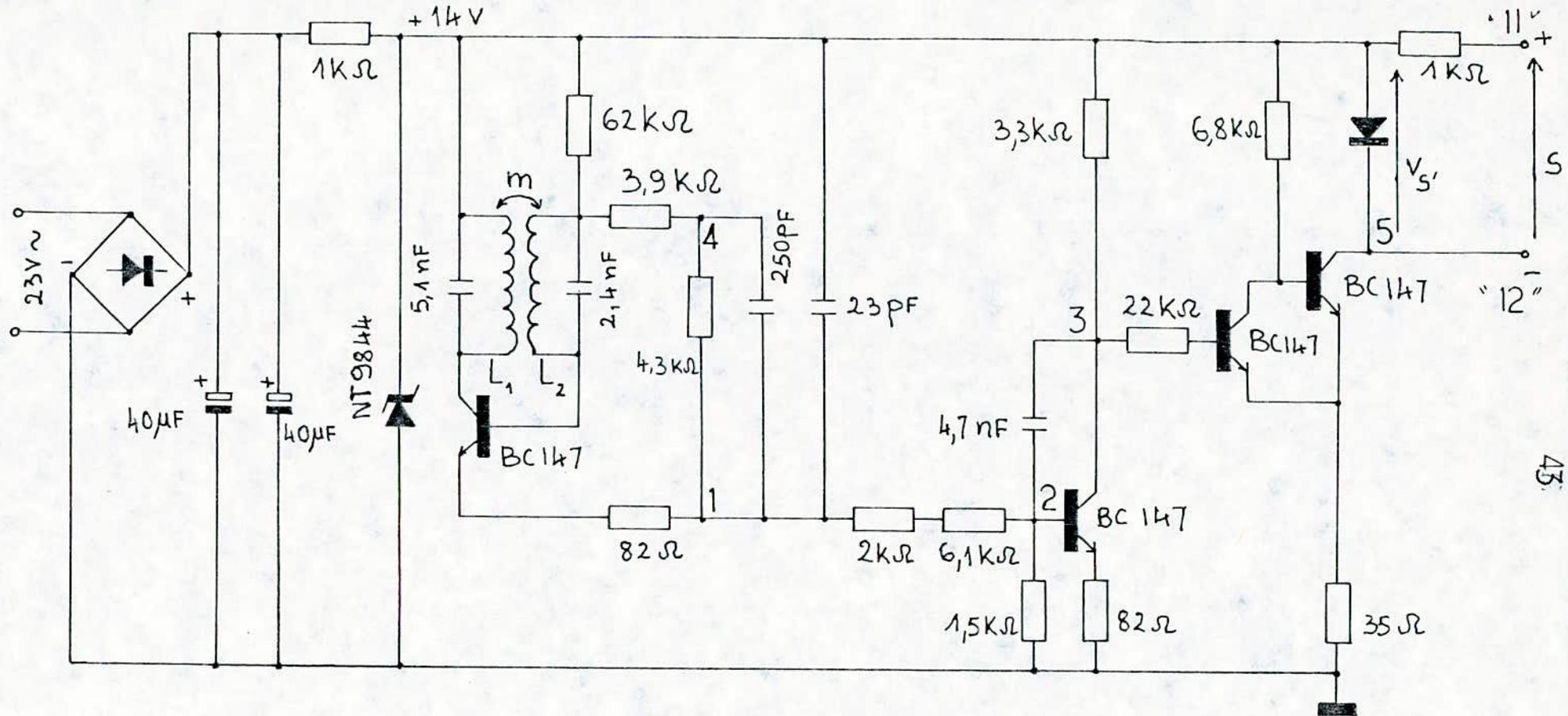


FIG-17 :

REGULATEUR DE TEMPERATURE

pour four HERAEUS type ROR 2,5 / 30 / 1700°C

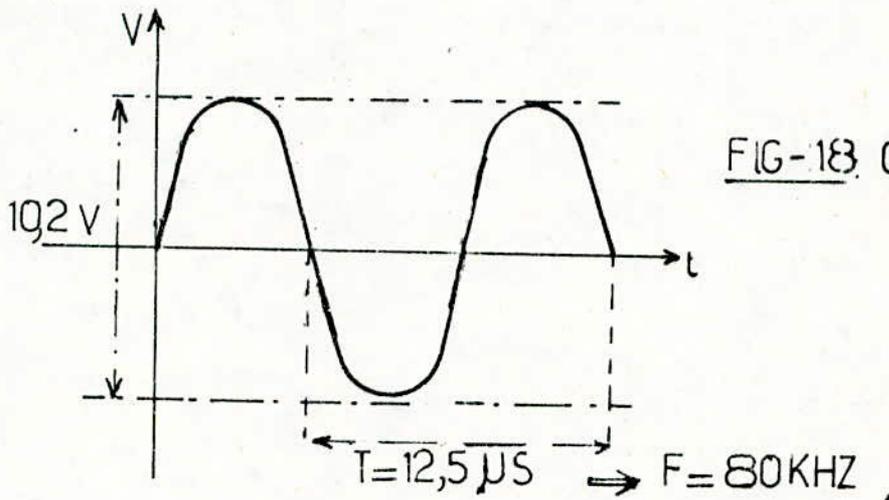


FIG-18. Oscillations des circuits LC

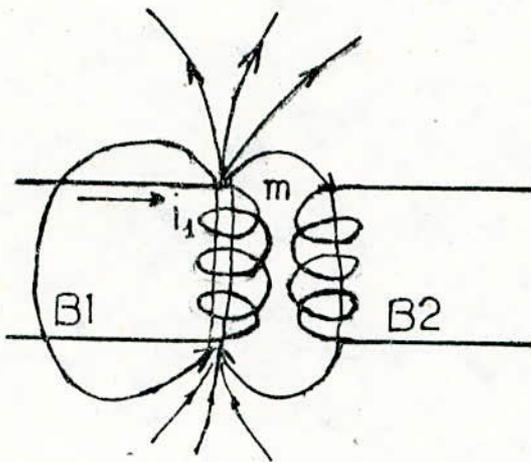


FIG-19 : Inductance mutuelle des bobines B1 et B2

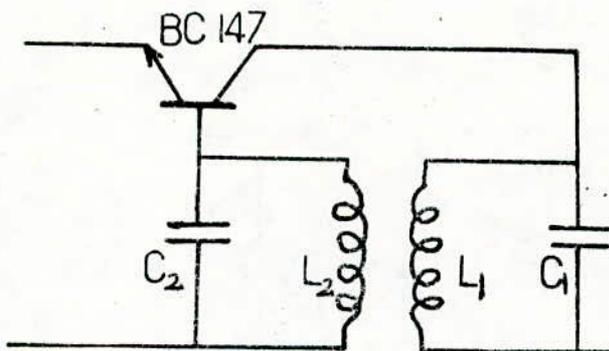
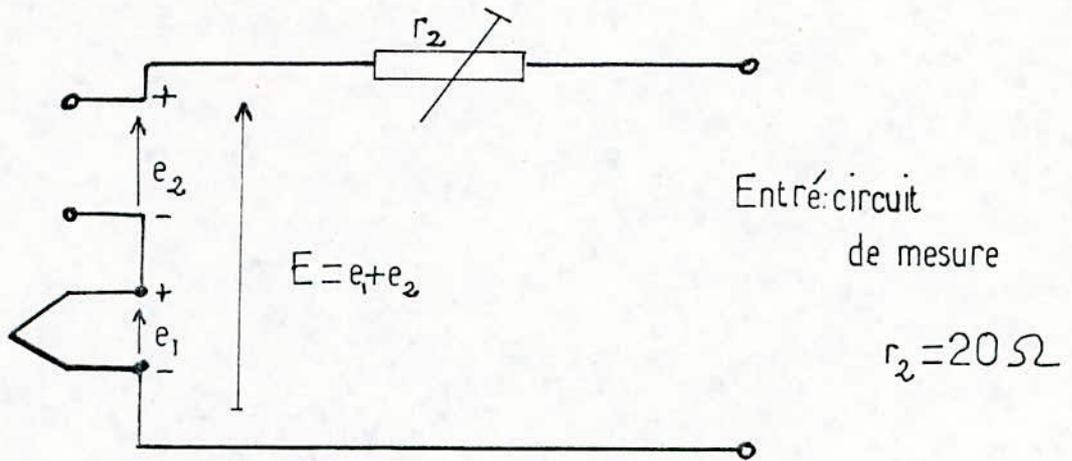


FIG-20: Couplage entretenu par le transistor

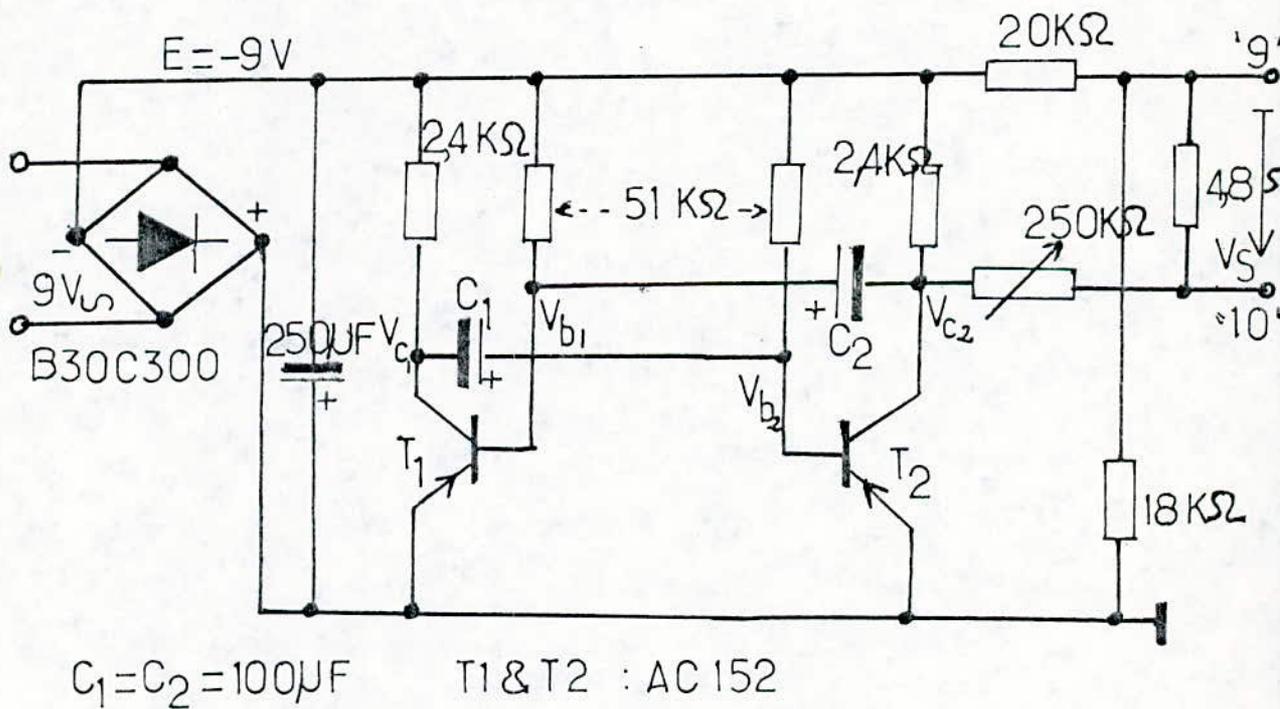


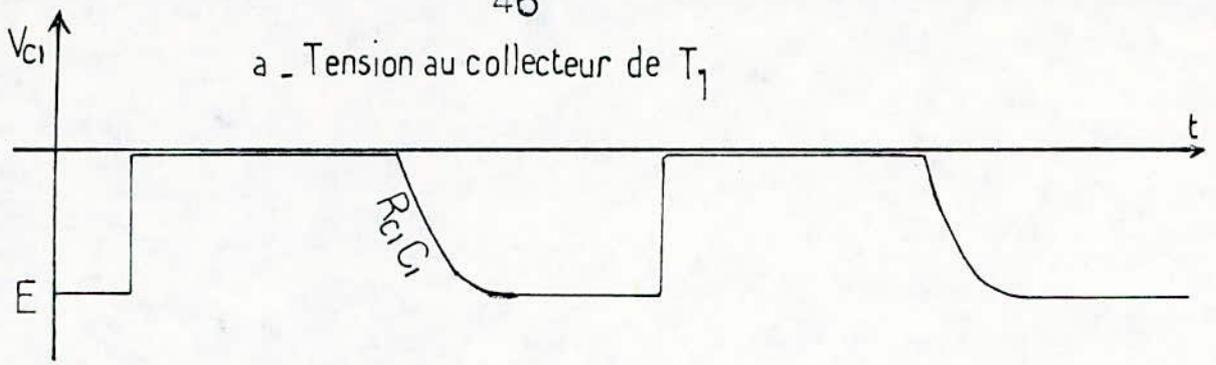
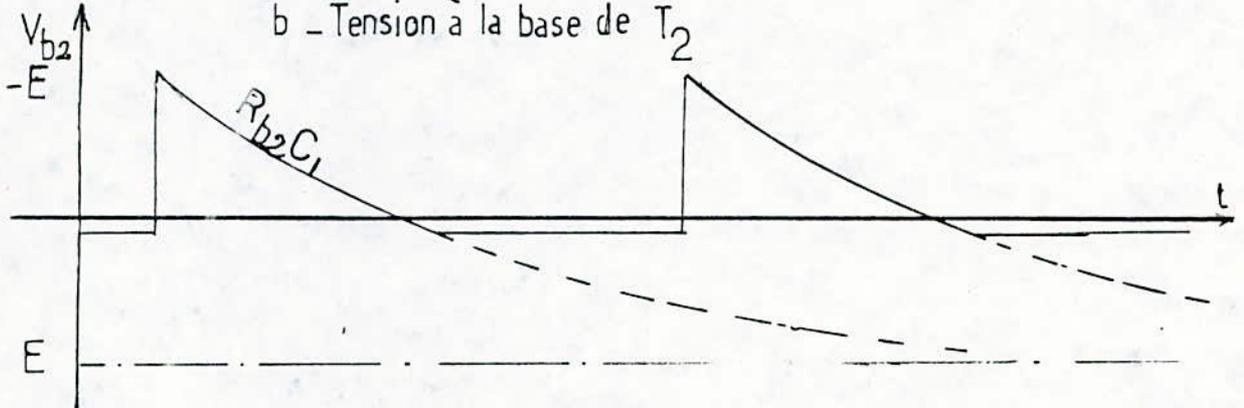
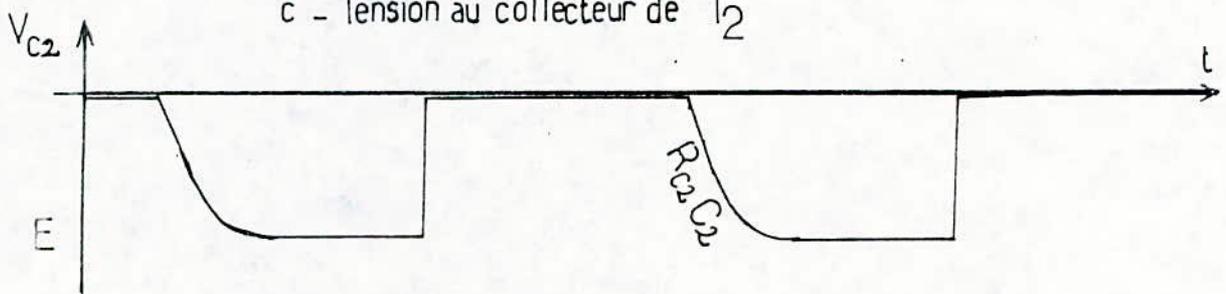
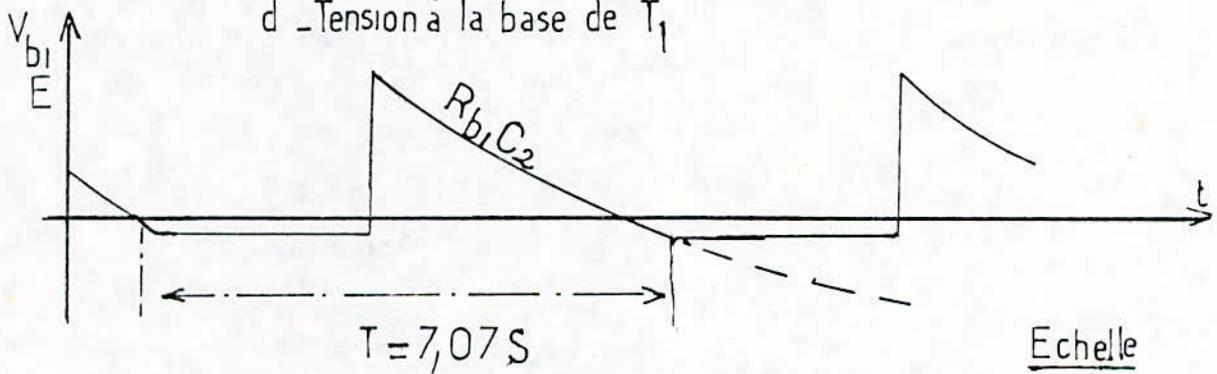
$e_1 = \text{f.e.m Thermocouple}$

$e_2 = \text{f.e.m Source additionnelle}$

FIG 22: Schema d'entré du circuit de mesure

FIG 23 : Schema de principe  
Source de tension additionnelle

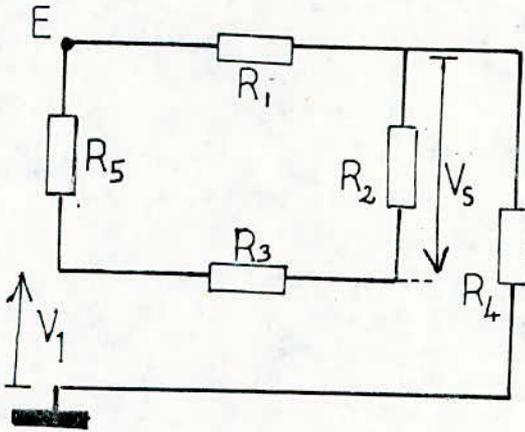


a - Tension au collecteur de  $T_1$ b - Tension à la base de  $T_2$ c - Tension au collecteur de  $T_2$ d - Tension à la base de  $T_1$ 

Echelle

 $1 \text{ cm} = 1 \text{ V}$   
 $1 \text{ S} = 1 \text{ cm}$ 

FIG-24: Chronogramme de fonctionnement de l'astable



On pose :

$$V_1 = V_{c2}$$

$$R_1 = 20 \text{ K} \Omega$$

$$R_2 = 4,8 \Omega$$

$$R_3 = 250 \text{ K} \Omega$$

$$R_4 = 18 \text{ K} \Omega$$

$$R_5 = 2,4 \text{ K} \Omega$$

FIG 25 : Circuit de sortie de la fig 25

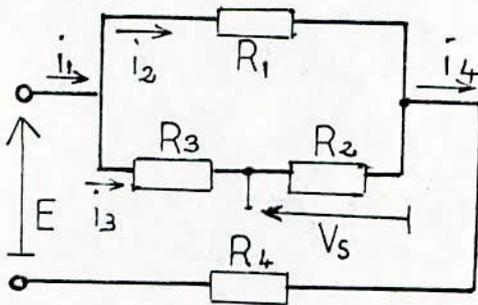


FIG 26 : Schema equivalent: pour  $V_1 = E$

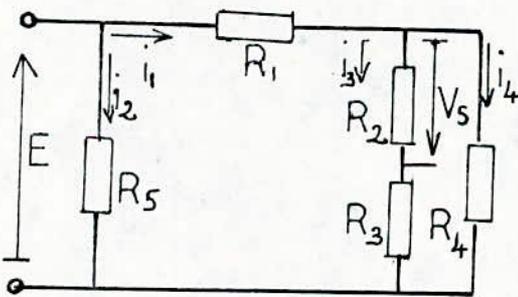


FIG 27 : Schema equivalent: pour  $V_1 = 0$

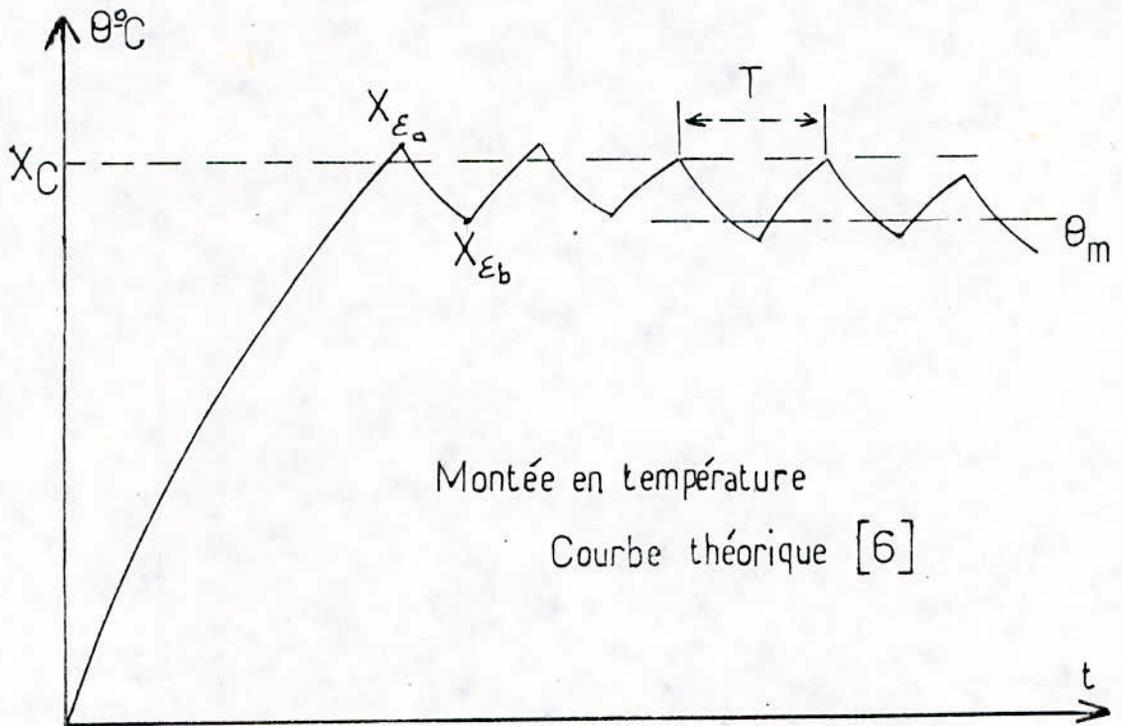


FIG-28

FIG-29

$V'_S$ (Volts)	26	27	27	27	27	27
$R_S$ ( $\Omega$ )	1100	1000	900	800	700	600

$V'_S$	27,5	27,5	28	28	28
$R_S$	500	400	300	200	100

Tableau : Caractéristique  $V'_S = f(R_S)$  : ( fig 17 )

CHAPITRE-V

-ETUDE DU CIRCUIT

DE COMMANDE-

## V- ETUDE DU CIRCUIT DE COMMANDE :

### V-1 Intérêt du circuit de commande :

Pour amorcer les thyristors du circuit de puissance, il est nécessaire d'appliquer des impulsions à leur gâchette. Ces impulsions sont fournies par deux générateurs d'impulsions à fonctionnement symétrique : c'est le circuit de commande.

En fonction du signal d'écart  $x_c$  (chap-4), le régulateur de température, par la variation du signal de sortie S (FIG-17), commande l'alimentation de ces générateurs d'impulsions.

### V-2 Principe de fonctionnement :

La Figure-30 représente le schéma de principe de ces deux générateurs d'impulsions.

Le chronogramme de fonctionnement est donné par la Figure-31.

Les deux générateurs sont alimentés par un transformateur travaillant à point milieu. La diode S34 assure le redressement simple alternance de la tension d'alimentation. Elle joue aussi le rôle de diode de protection qui empêche un retour éventuel de courant vers l'alimentation.

Le chronogramme de la FIG-32 permet de comprendre que les trois transistors  $T_1, T_2, T_3$  travaillent en commutation. Toutefois,  $T_3$  a aussi un rôle d'amplification (idem. pour  $T_4, T_5, T_6$ ).

Par l'intermédiaire de l'amplificateur  $T_3$  (AG 152), (resp.  $T_6$ ) et le transformateur d'impulsion, on obtient à la sortie (1 - 2) comme à la sortie (3 - 4) des impulsions aptes à amorcer les thyristors.

Le transformateur d'impulsion est un transformateur abaisseur de tension de rapport :  $3/26 \simeq 1/9$ . Il garantit une séparation galvanique entre le circuit de commande et la gâchette des thyristors.

La résistance  $50 \Omega$  et le condensateur  $c = 0,22 \mu F$  au secondaire du transformateur d'impulsion, permettent le maintien de la forme de l'impulsion. Le dépassement constaté au front descendant de chaque impulsion est dû à une décharge du condensateur à travers la résistance. Une partie de ce courant de décharge se trouve induit au primaire du transformateur d'impulsion.

En effet, quand la gachette du thyristor est amorcé, il se comporte comme une diode polarisée en direct (FIG-32). Après chaque impulsion, cette diode se bloque, on a donc un circuit ouvert.

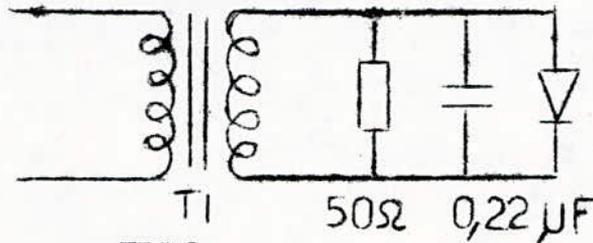


FIG-32

### V-3 Influence des tensions V(7-8) et V(5-6) :

On sait maintenant que le signal de sortie S du régulateur de température (chap-4) commande l'alimentation du circuit de commande. Ce signal S est appliqué entre les points (7-8) de la FIG-33.

On verra aussi dans le chapitre-6 qu'une partie du signal de sortie du circuit de puissance sera injectée à l'alimentation du circuit de commande.

Celui-ci est appliqué entre les points (5-6) de la FIG-33.

La FIG-33 montre comment se fait la commande de l'alimentation du circuit de commande. Celle-ci est déterminée par la maille AECD selon la FIG-33. Les actions des tensions  $V_{CD}$  et V(5-6), appliquées entre A et E, ont pour effet de bloquer ou de débloquent le transistor  $T_1$ .

Le calcul suivant montre que le courant de base du transistor  $T_1$  est fonction des variations de  $V_{CD}$  et V(5-6).

En vertu des lois de KIRCHOFF on peut écrire :

a- 1<sup>ère</sup> loi :

$$\text{Noeud A : } i_4 = i_1 + i_2 \quad (1)$$

$i_4$  : courant de décharge du condensateur  $C_5$

$$\text{Noeud B : } i_4 = i_6 \quad (2)$$

car  $I_5$  est le courant de polarisation du transistor  $T_1$

$$(1) \text{ et } (2) \text{ donne : } i_6 = i_1 + i_2 \quad (3)$$

2<sup>è</sup> loi :

$$\text{Loi de maille : } V_{AE} + V(6-5) + V_{CD} = 0 \quad (4)$$

$$\text{où : } V(6-5) = R_1 i_3 + i_3 / C_3 S = i_3 (1 + R_1 C_3 S) / C_3 S \quad (5)$$

$$V_{DE} = i_2 (1 + R_3 C_4 S) / C_4 S \quad (6)$$

$$V_{AE} = i_1 / C_2 S \quad (7)$$

où :  $S = j\omega$  dans la transformé de Laplace

$$(4) \text{ et } (7) \text{ donne : } i_1 = C_2 S (-V(6-5) - V_{CD}) \quad (8)$$

(3), (6) et (8) donnent :

$$i_6 = C_2 S V(5-6) + (C_2 S + C_4 S / (1 + R_3 C_4 S)) V_{DC}$$

En conclusion, on peut dire que le courant de déblocage du transistor  $T_1$  dépend de la variation des tensions  $V(5-6)$  et  $V_{DC}$  donc de  $V(7-8)$ . Autrement dit, le blocage et déblocage du  $T_1$  sont commandés par les tensions :

- $V(5-6)$  issue du circuit de puissance
- $V(7-8)$  issue du régulateur de température

La Figure-34 illustre l'influence de la variation de la tension  $V_{AE}$  sur l'état de conduction ou de blocage de  $T_1$ . Autrement dit, la mise en marche et l'arrêt du fonctionnement des générateurs d'impulsions est commandée par la variation de  $V(5-6)$  et  $V(7-8)$ . (FIG-33)

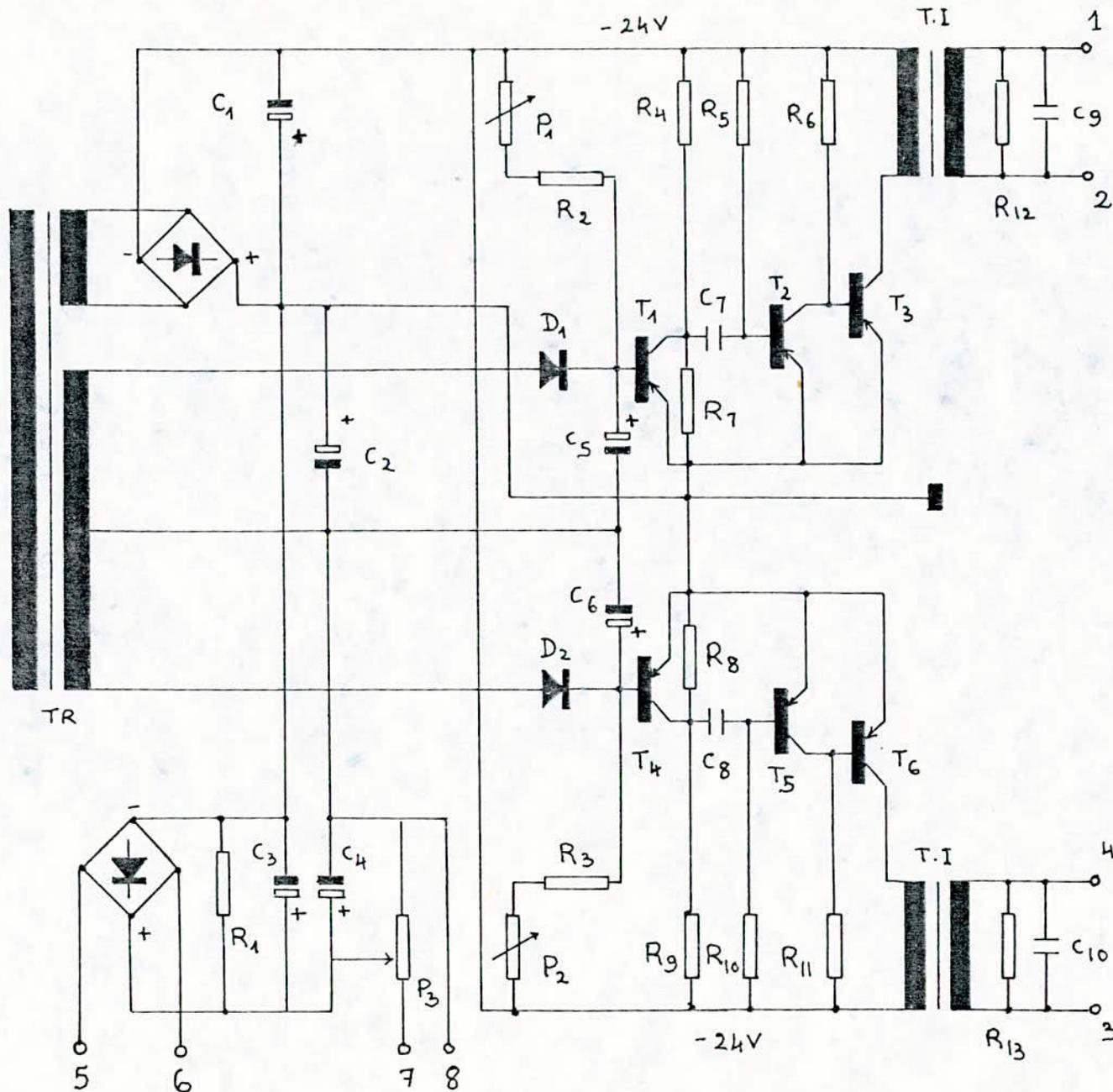


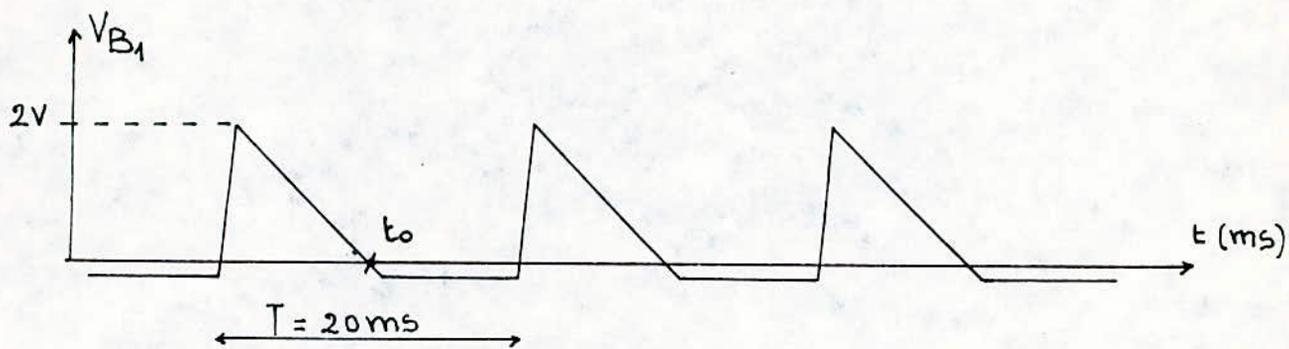
Fig. 30: Circuit de COMMANDE

- Composants :
- Résistances :
    - $R_1 = 100\Omega$
    - $R_3 = R_2 = 2,2K$
    - $R_9 = R_8 = R_7 = R_4 = 5,1K$
    - $R_{10} = R_5 = 30K$
    - $R_{11} = R_6 = 10K$
    - $R_{13} = R_{12} = 50\Omega$
  - Ajustables :
    - $P_3 = 1K$
    - $P_2 = P_1 = 10K$
  - Condensateurs :
    - $C_4 = C_3 = C_2 = C_1 = 500\mu F$
    - $C_6 = C_5 = 10\mu F$
    - $C_{10} = C_9 = C_8 = C_7 = 0,22\mu F$
  - Semi - Conducteurs :
    - Diodes  $D_1, D_2$  : 534
    - Transistors :
      - $T_1, T_2, T_4, T_5$  : AC151
      - $T_3, T_6$  : AC152
    - Pont de diodes : B30C300
  - Divers :
    - TR: Transfo d'Alimentation
    - T.I: Transfo d'Impulsions

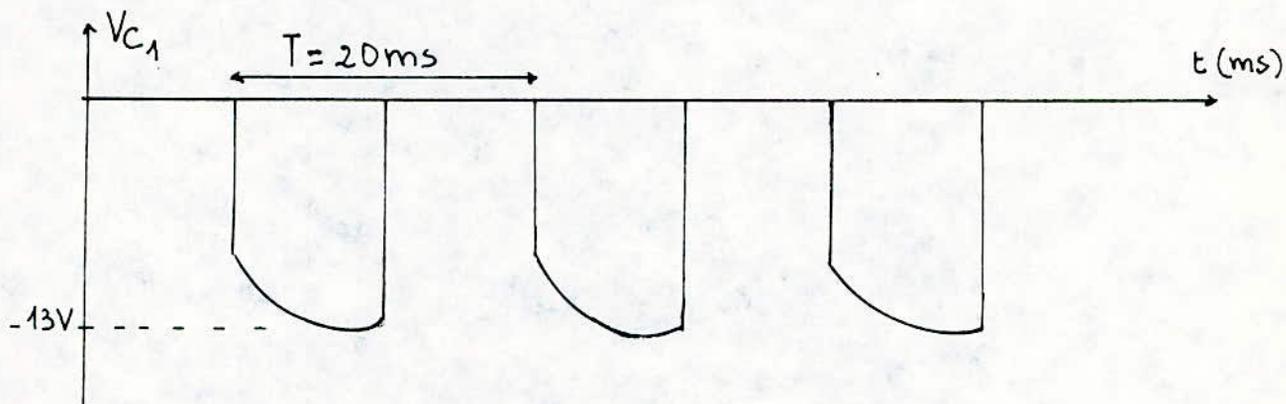
FIG-31:

Chronogramme de fonctionnement du générateur d'impulsions

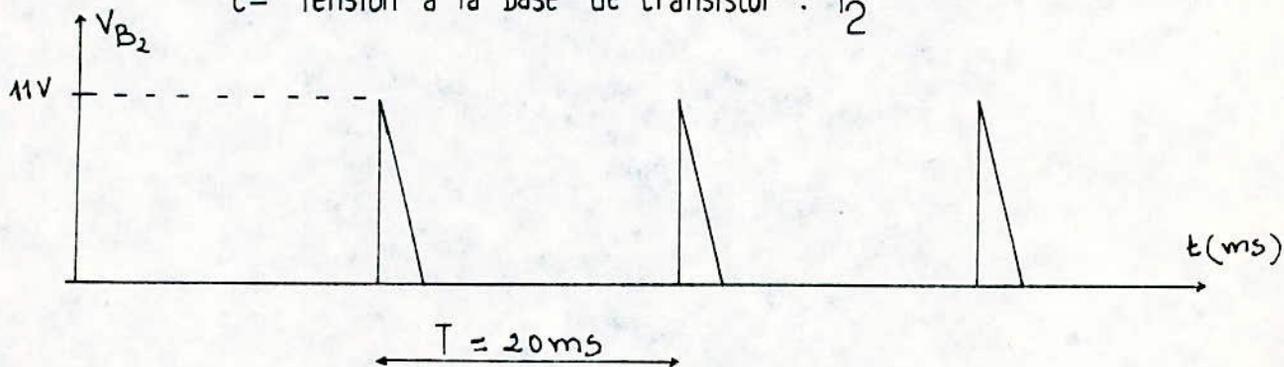
a- Tension à la base du transistor :  $T_1$

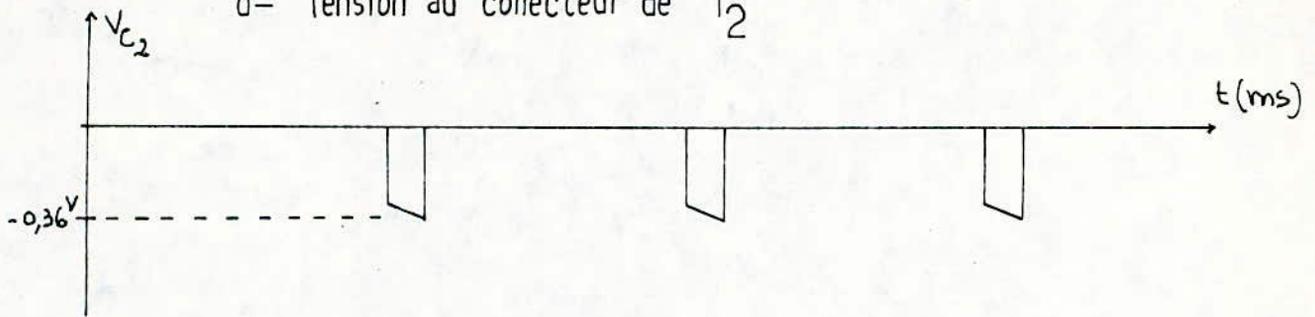
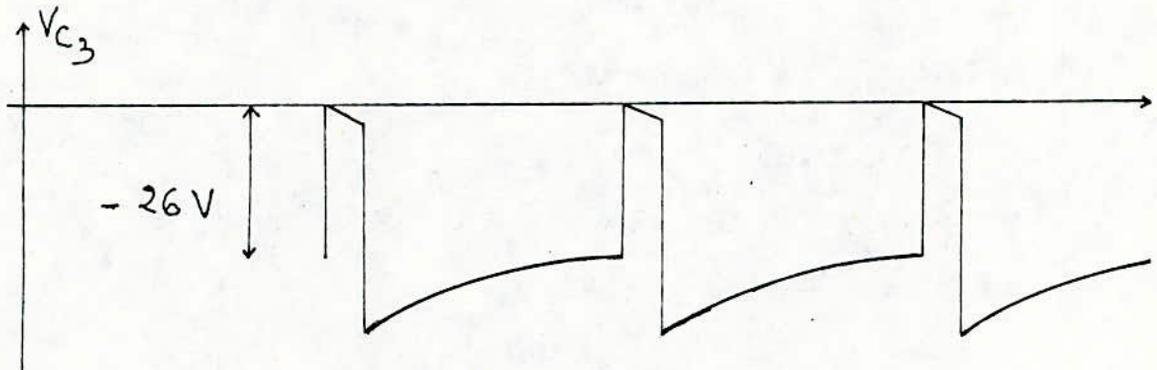


b- Tension au collecteur du  $T_1$

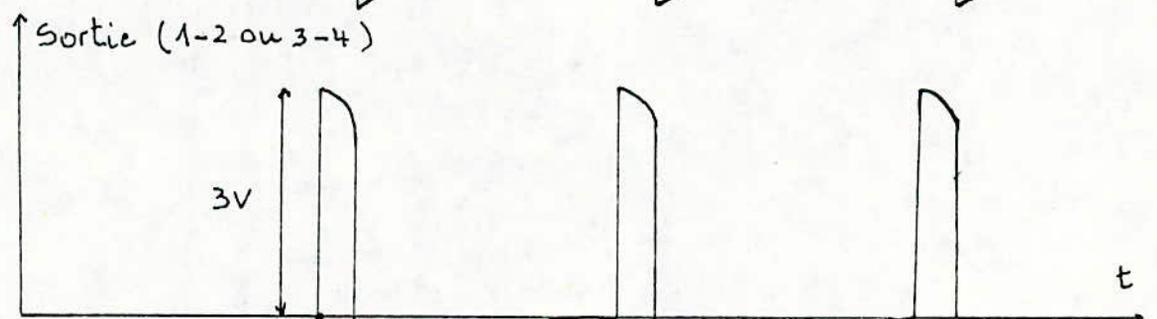
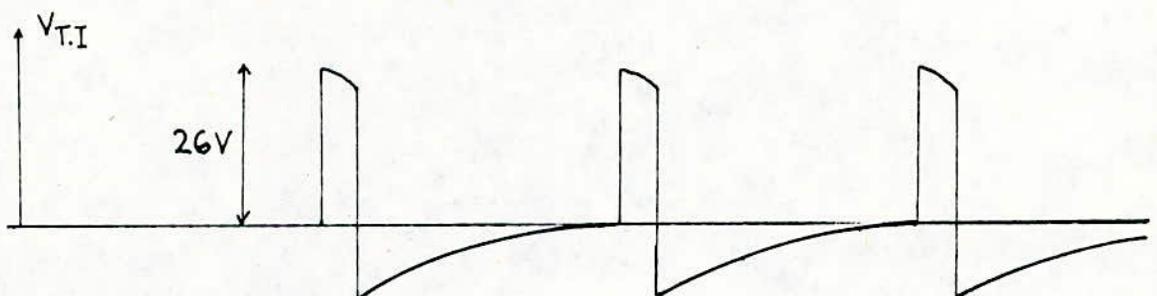


c- Tension à la base de transistor :  $T_2$



d- Tension au collecteur de  $T_2$ e- Tension au collecteur du transistor :  $T_3$ 

f- Tension à l'entrée du transformateur : T.I

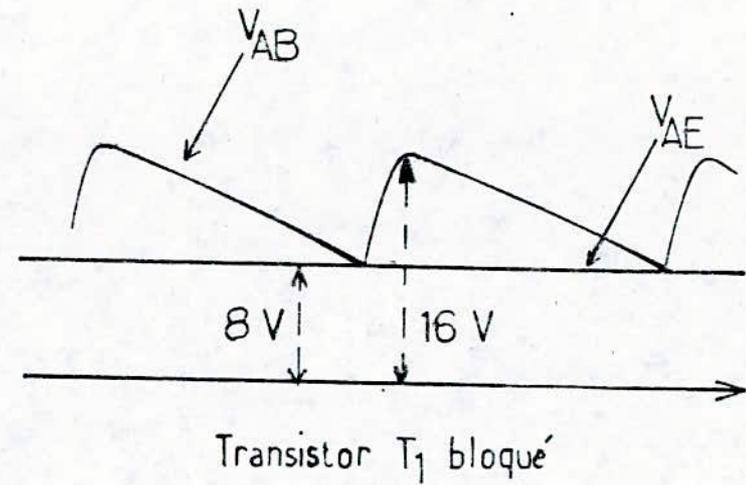
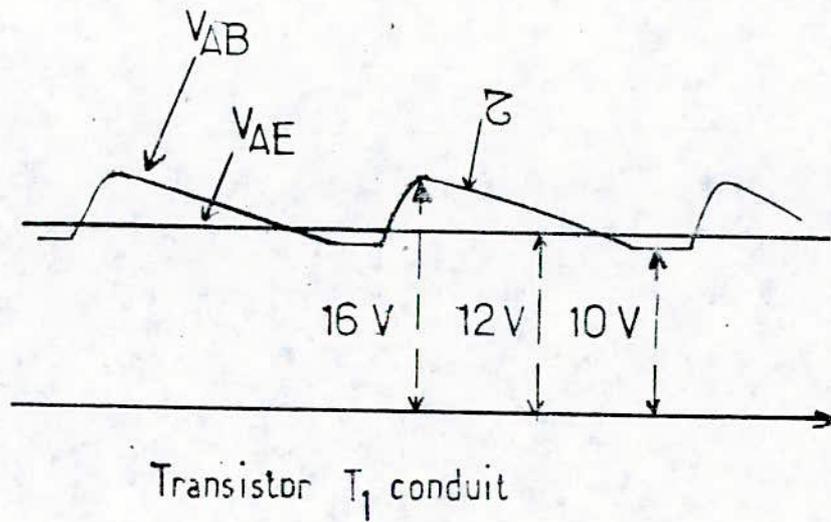


$$\leftarrow RC = 50 \times 0,22 \cdot 10^{-6} = 11 \mu s$$

courbe de décharge  
du condensateur  $C_g$  au  
 $C_{10}$

FIG 31. (suite)





$Z = C_5 (P_1 + R_2)$  : Constante de temps de décharge de  $C_5$  à travers  $P_1$  et  $R_2$

FIG 34: Influence de la variation de la tension  $V_{AE}$  sur le signal d'attaque de  $T_1$

NB : L'étude du 2<sup>ème</sup> générateur d'impulsion se déduit par symétrie

CHAPITRE -VI

- ETUDE DU CIRCUIT

DE PUISSANCE -

## VI- ETUDE DU CIRCUIT DE PUISSANCE :

### VI-1 Introduction :

On a vu dans le chapitre-précédent que le circuit de commande a essentiellement pour tâche d'élaborer des impulsions aptes à amorcer les thyristors du circuit de puissance. La FIG-35 nous donne le schéma de principe de ce circuit de puissance .

Le thyristor, appellation française de silicon controlled rectifier (S.C.R) , est un dispositif redresseur contrôlé, muni d'une électrode de commande de gâchette et constitué de quatre jonction PNPN .

Les thyristors peuvent être considérés comme trois diodes couplées en séries dont une avec polarité inverse par rapport aux deux autres. Le courant se trouve donc normalement bloqué dans les deux sens. Le dopage des couches centrales est en général moins important que celui des couches externes et cette couche se comporte comme une grille qui permet en la polarisant, d'obtenir sur la commande le passage du courant. Un montage équivalent à transistor nous est donné par la FIG-36 .

### VI-2 Principe et Fonctionnement :

Une régulation à thyristors est, dans son principe, relativement simple. Les thyristors sont placés dans le circuit d'alimentation des résistances chauffantes (FIG-35) et, commandent en fonction du signal d'écart émis par le régulateur de température, le passage du courant. Les thyristors jouent ici le rôle de contacteurs statiques dont les temps de réponse, très inférieurs à la période du courant alternatif fourni par le réseau de distribution de l'électricité [6] , permettent une modulation continue de la puissance injectée dans les résistances. Cette puissance est appelée au niveau d'une période du courant alternatif, pour la régulation par angle de phase, ou de quelques périodes, pour la régulation par trains d'ondes.

Dans le système de commande et de régulation du four HERAeus type ROR 2,5/30 1700°C, c'est la commande par angle de phase qui est utilisée .

## 2-a Commande par angle de phase :

Le signal d'écart provoque pour chaque alternance, par l'intermédiaire du circuit de commande l'allumage du thyristor avec un certain retard par rapport au passage à zéro de la tension d'alimentation. En fonction de ce déphasage, la puissance efficace sur une alternance est plus ou moins importante.

On a vu dans le chapitre 5 (FIG-37) que l'instant  $t_0$  qui marque le début de fonctionnement des générateurs d'impulsions, est déterminé par la constante de temps  $\tau = C_5(P_1 + R_2)$ . Autrement dit  $\tau$  fixe le point de fonctionnement du circuit de commande.

Les essais que nous avons effectués (FIG-37) montrent l'influence de la variation des ajustables  $P_1$  et  $P_2$  (FIG-38) sur la forme du signal de sortie, donc sur la variation de la puissance efficace injectée dans le four. La FIG-38 donne une illustration de la commande par angle de phase. En conclusion, on peut dire que le point de fonctionnement du circuit de commande peut varier si  $P_1$  et  $P_2$  varient. Les ajustables  $P_1$  et  $P_2$  doivent être réglés sur une même valeur pour un fonctionnement équilibré du système.

## 2-b Limitation de courant :

Dans le chapitre 5, nous avons dit que le circuit de puissance commande aussi l'alimentation du circuit de commande. Cette commande se fait par l'intermédiaire du transformateur de courant  $f_1$ . En régime de fonctionnement le courant induit dans le secondaire de  $f_1$  est utilisé comme une source qui alimente les bornes "5-6" (voir FIG-35 et 36) à travers la résistance  $R_3$ . L'existence de cette tension  $V(5-6)$  maintient le courant de sortie du circuit de puissance, à une certaine valeur : c'est la limitation de courant.

En effet, les FIG-33 et 34 du chapitre 5, mettent en lumière l'influence de la tension  $V_{AE}$  sur le retard d'allumage ~~et~~ donc du courant de sortie.

Comme :  $V_{AE} = V_{DC} - V(6-5)$

Si  $V(6-5)$  n'existait pas, la tension  $V_{AE}$  augmenterait. Ce qui a pour conséquence de diminuer  $\alpha$ , donc d'augmenter la puissance (le courant pour une valeur donnée des ajustables).

Conclusion : Les résistances  $r_1$  et  $r_2$ , et les condensateurs  $K_1$  et  $K_2$  servent de protection aux thyristors (FIG-40).  
Le déphasage  $\alpha$  varie si la tension  $V_{AE}$  varie. La puissance efficace fournie à la charge est inversement proportionnelle au déphasage  $\alpha$ . Et ceci conformément à la loi de Joule :

$$P = UI \cos \alpha \cdot K_f$$

où :  $P$  : puissance efficace en sortie

$U$  : tension efficace d'alimentation

$I$  : courant efficace fourni à la charge

$K_f$  : facteur de forme du courant

Ce mode de commande, qui permet de découper les alternances, peut conduire à une grande précision, puisque son temps de réponse est extrêmement court. En revanche, ce système engendre des parasites (création d'harmoniques) provenant d'une variation brutale de l'intensité de courant à l'amorçage des thyristors; et la variation de la puissance n'est pas linéaire avec la tension de commande [6].

Composants :

- $a_1$  : contacteur principal
- $e_1$  : fusible 50A(silicium)
- $e_2$  : fusible 50A(silicium)
- $f_1$  : transformateur de courant
- $m_1$  : transformateur 2KVA
- $n_1$  : thyristor
- $n_2$  : thyristor
- $k_1$  : condensateur 16 $\mu$ F
- $k_2$  : condensateur 1 $\mu$ F
- $r_1$  : résistance 18 $\Omega$
- $r_2$  : resistance 1 $\Omega$

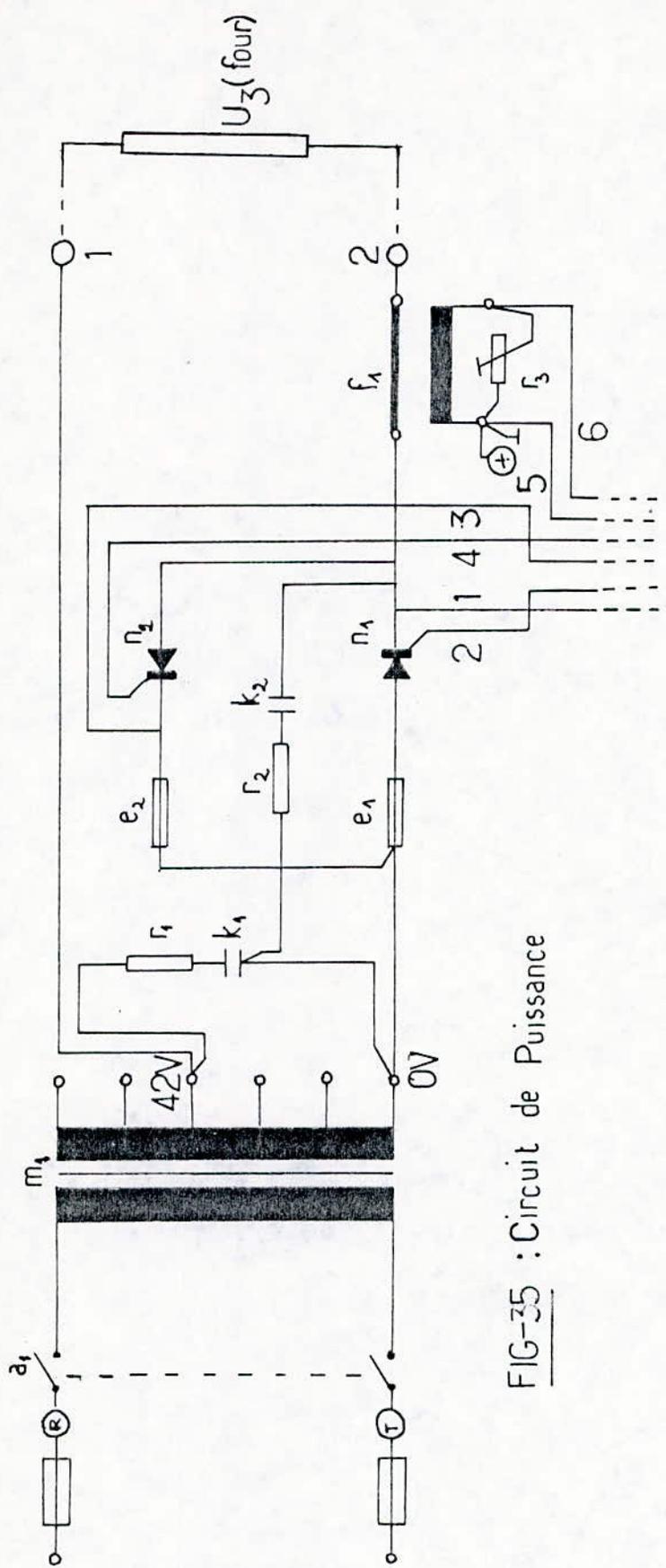


FIG-35 : Circuit de Puissance

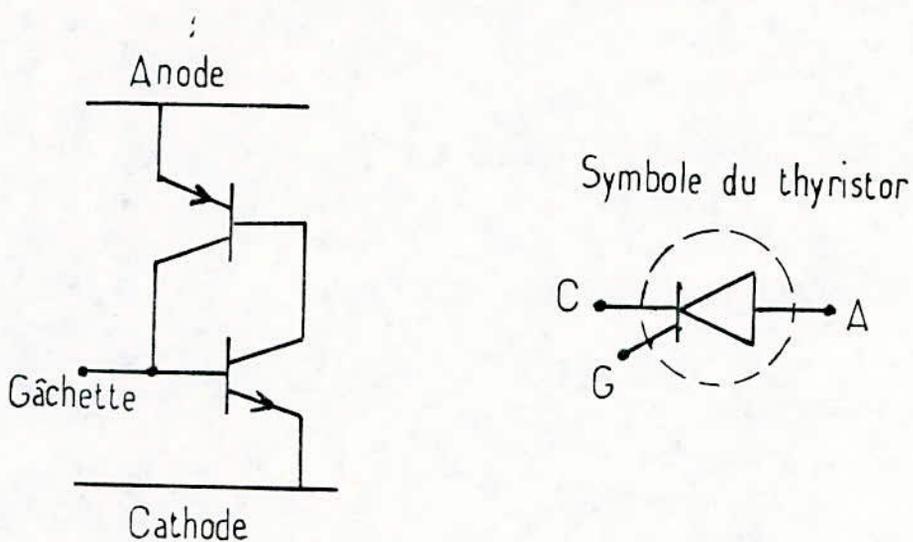
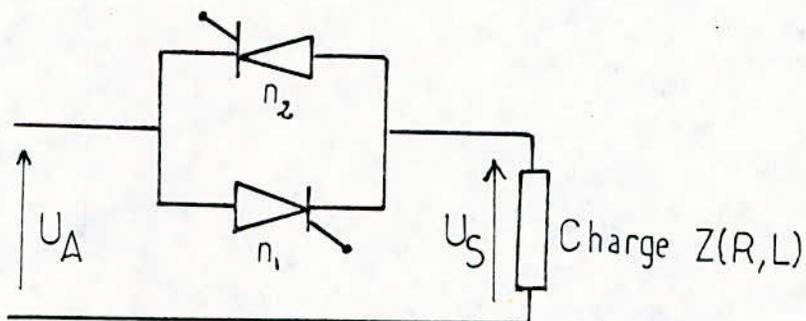


FIG 36 : Montage à transistors equivalent d'un thyristor



Alimentation d'une charge par contacteur statique à thyristors

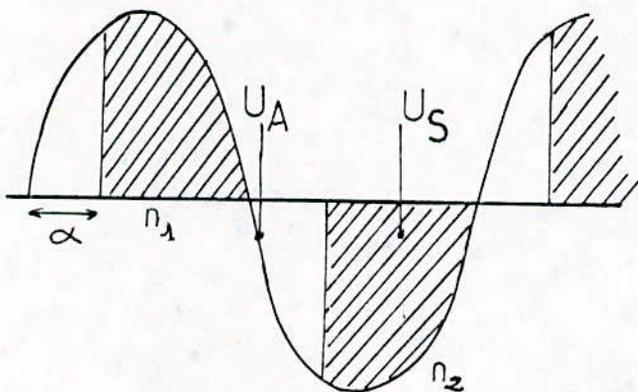


FIG 38 : Retard à l'allumage des thyristors avec une charge resistive

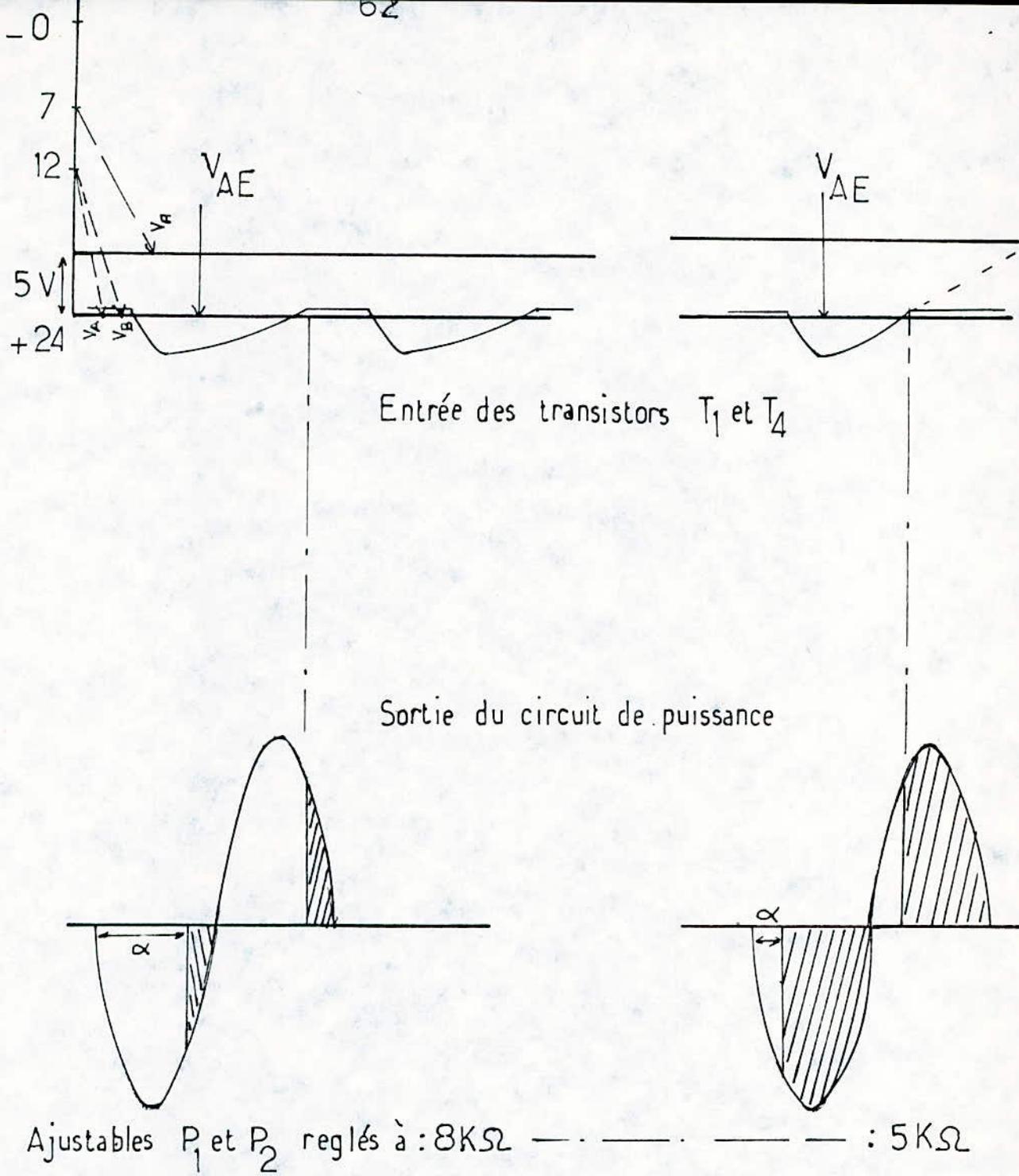


FIG 37 : Variation du signal de sortie en fonction des valeurs des ajustables

CHAPITRE - VII

- SYNTHÈSE SUR

LE FONCTIONNEMENT

DU GROUPE DE COMMANDE

ET DE RÉGULATION-

## VIII- SYNTHESE SUR LE FONCTIONNEMENT DU GROUPE DE COMMANDE ET DE REGULATION :

VIII-1 Introduction : On a vu dans les chapitres précédents le fonctionnement et le rôle joué par chaque constituant dans la commande et la régulation du four HERAUIS type ROR 2,5/30 1700°C.

Dans ce chapitre, nous considérons les actions et réactions de chacun des constituants vis à vis des autres. Ceci nous permettra d'avoir le fonctionnement de tout le système considéré comme un tout, et de comprendre comment agit la régulation sur le processus de chauffage du four. Pour ce faire on utilisera le schéma synoptique de la FIG- 39. Le schéma général sera donné hors texte. Le comportement de ce système varie suivant qu'on est en régime transitoire ou en régime établi.

VIII-2 Régime transitoire : Ici le régime transitoire est la phase de montée en température. Pendant la montée en température les circuits oscillants du régulateur de température conservent leurs oscillations. Le régulateur de température se comporte comme une source de tension continue de 16V.

Le circuit de commande reçoit en permanence le signal  $S = 16V$  et,  $V(6-5) = 5V$  issu du circuit de puissance. Les signaux de commande :  $S = V(7-8) = 16V$  et  $V(6-5) = 5V$  imposent au circuit de commande un régime de fonctionnement stable. Les générateurs d'impulsions délivrent à chaque fois des signaux amorçants périodiquement les thyristors du circuit de puissance. La puissance est donc appelée en permanence.

Le four commence donc à chauffer. En prévision de la phase de régulation, la source de tension supplémentaire placée en série avec les fils du thermocouple engendre des petites oscillations de l'aiguille de mesure.

En conclusion, on peut dire que la montée en température s'obtient en chauffant le four d'une façon continue.

VIII-3 Régime établi : Le régime établi peut aussi s'appeler phase de régulation. Car c'est à l'instant où la température de consigne est atteinte et où le processus de régulation commence.

Quand la consigne est donc atteinte :

-La palotte s'interpose entre les deux bobines du circuit oscillant. Ceci a pour effet de couper le couplage entre  $B_1$  et  $B_2$ , donc d'arrêter les oscillations. La valeur de  $S$  passe de 16V à 5V.

Le passage de  $S$  à 5V, bloque les transistors  $T_1$  et  $T_4$  du circuit de commande. Les impulsions disparaissent. Les gâchettes des thyristors n'étant plus excitées, ces derniers se ferment :

-ce qui a pour effet d'annuler le courant de sortie du circuit de puissance et par voie de conséquence  $V(5-6)$  passe de 5V à 0V, ce qui ne fait que maintenir le blocage des transistors  $T_1$  et  $T_4$ , et le signal de sortie disparaît. Alors c'est l'arrêt de chauffage du four.

Mais, comme les petites oscillations de l'aiguille de mesure persistent, celle-ci continue à osciller même quand la consigne est atteinte. Et dès que cette aiguille s'écarte de la valeur prescrite, le processus de chauffage reprend comme en régime transitoire, mais cette fois pendant une durée de dix secondes, et ainsi de suite.

En conclusion, on peut dire que les interruptions constatées, pendant ce régime, permettent le maintien de la température du four à la valeur désirée, c'est le but même de la régulation.

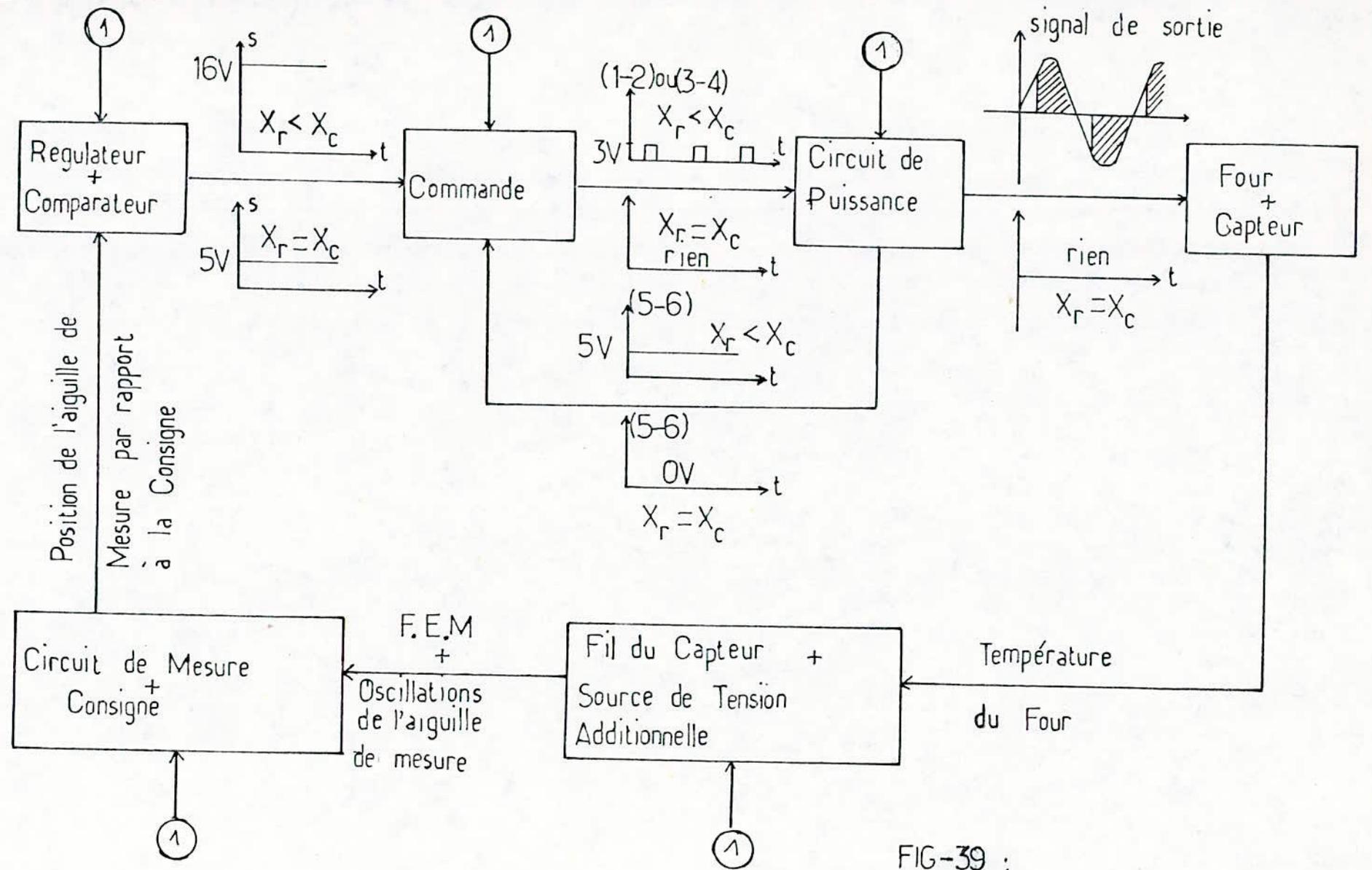


FIG-39 :

Schéma Synoptique du Fonctionnement General

N-B : (1) Alimentation sinusoïdale de 50HZ

CHAPITRE - VIII

- PLAN D'EXPERIENCES -

- UTILISATION -

- ET MAINTENANCE -

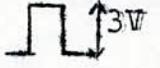
### VIII- PLAN D'EXPERIENCES - UTILISATION ET MAINTENANCE :

Pour aboutir aux différents processus de fonctionnement du système décrit dans les chapitres précédents, nous avons procédé à une analyse expérimentale : sous-système par sous-système. Ainsi nous sommes arrivés à :

- identifier chaque sous-système
- faire quelques simulations des phénomènes

#### VIII-1 Données prises lors des mesures :

Lors des différentes mesures que nous avons effectuées, nous sommes arrivés aux résultats suivants :

- sorties des générateurs d'impulsions, des signaux  3V, pour l'anorçage des thyristors.
- entrée (5-6), sortant du secondaire du transformateur de courant, une tension alternative variant de 0V à 5V.
- entrée (7-8), commande de l'alimentation du circuit de commande, une tension continue qui est égale soit à 16V soit à 5V, suivant que la palette est en dehors ou entre les deux bobines.
- rapport de transformation du transformateur de courant :  $n = 75/5 = 15$

#### VIII-2 Analyse de chaque sous-système :

2-a. Circuit de commande : Pendant les essais que nous avons fait sur le circuit de commande pour voir si on a bien des impulsions de 3V en sortie, nous avons constaté que le premier générateur d'impulsions ne donnait rien en sortie. Comme le deuxième marchait, nous avons pu, avec un oscilloscope faire des mesures comparatives entre les deux générateurs. Et ceci pour localiser la défaillance du premier générateur d'impulsions.

Ainsi donc nous avons pu établir qu'en fonctionnement normal on doit avoir :

- Alimentation, sortie "5-6" du secondaire du transformateur :

25V alternative

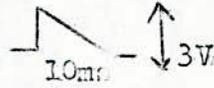
- Tension de polarisation :

- 24V continue

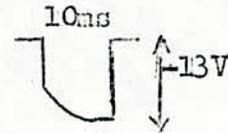
- Alimentation, sorties "7-6" et "8-9" du transformateur :

10V alternative

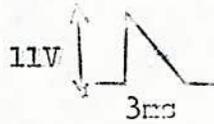
- Sortie de diode (S34) - masse :



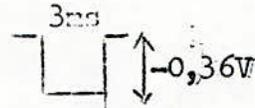
- Sortie collecteur-masse de  $T_1$  :



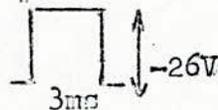
- Entrée base-masse de  $T_2$  :



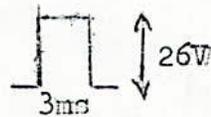
- Sortie collecteur-masse de  $T_2$  :



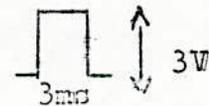
- Sortie collecteur-masse de  $T_3$  :



- Entrée du transformateur d'impulsion :



- Sortie "1-2" ou "3-4" :



- Entrée "7-8" : 16V continue

- Entrée "5-6" : 5V alternative

Quand l'aiguille de consigne coïncide avec l'aiguille de mesure  
il se quand la palette est entre les bobines on a :

- Tensions d'alimentation et de polarisation inchangées

- Sortie diode (S34)-masse :



- Sortie collecteur-masse de  $T_1$  : -16V continue
- Entrée base-masse de  $T_2$  : 0V
- Sortie collecteur-masse de  $T_2$  : 0V
- Sortie collecteur-masse de  $T_3$  : -30V continue
- Entrée transformateur d'impulsion : 0V
- Sortie "1-2" ou "3-4" : 0V (rien)
- Entrée "7-8" : 5V continue
- Entrée "5-6" : 0V

Simulation de la tension  $V(5-6)$  :

D'après le schéma du constructeur, nous savons que  $V(5-6)$  varie entre 0 et 5V alternative, mais pour établir sa fonction, nous avons simulé le secondaire du transformateur de courant i.e la source de tension que forme ce dernier avec la résistance  $r_3$ , par une alimentation stabilisée. Sa fonction est expliquée dans le chapitre 4.

2-b Source de tension additionnelle :

D'après les mesures que nous avons faites, on sait que :

- Alimentation, sortie "10-11" du secondaire du transformateur :  
9V alternative
- Tension de polarisation : 9V continue
- Sorties collecteur-masse des deux transistors, oscillations entre -11V et 0V continues avec une période de 7s.
- Sortie "9-10", basculement entre -92  $\mu$ V et -82  $\mu$ V avec la même période de 7s.

L'utilité de cette source de tension additionnelle est expliquée dans le chapitre 4. Toutefois, nous pouvons dire que ces mesures ont surtout été effectuées afin de pouvoir définir son rôle.

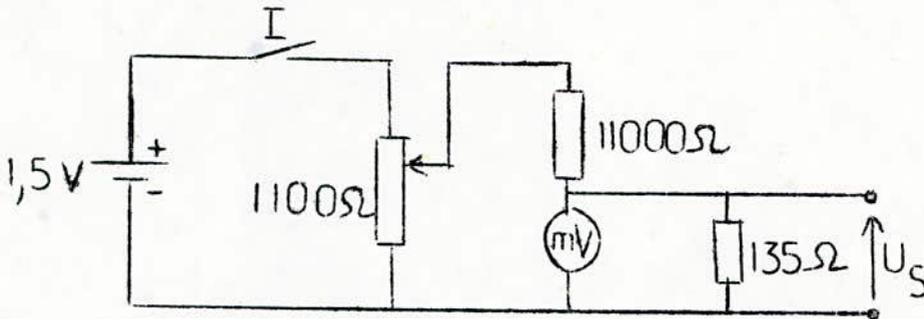
2-c Régulateur de température :

- Circuit de mesure :
- Simulation du thermocouple :

Par conception, le régulateur de température et le circuit de mesure sont liés par leur alimentation. De ce fait, ils ont été étudiés ensemble.

### 1) Simulation du thermocouple :

Connaissant la nature du thermocouple, on a pu à l'aide de table de correspondance standard (voir annexe) : température/f.e.m, avoir la plage de variation de la f.e.m générée par le couple, de 0. à 14 mV. Ceci nous a permis de simuler le thermocouple par une pile de 1,5V utilisée comme source dans le montage de diviseur de tension suivant.



#### Contrainte :

- Avoir à la sortie : de 0 à 14 mV
- Adaptation avec le galvanomètre d'impédance d'entrée 135 Ω

#### Intérêt :

- Faire fonctionner les circuits de régulation sans user d'un capteur qui se trouve à l'intérieur du four. Autrement dit, sans chauffer le four.

### 2) Circuit de mesure :

Avec la simulation du capteur, on a pu établir que le circuit de mesure fonctionne normalement :

- Alimentation alternative de 9V
- Re-constitution du schéma de principe non fourni par le constructeur.

### 3) Régulateur de température :

- Reconstitution du schéma de principe
- Etude de l'influence de l'interposition de la palette entre les deux bobines

- Alimentation : 23V alternative
- Tension de polarisation : + 14V continue

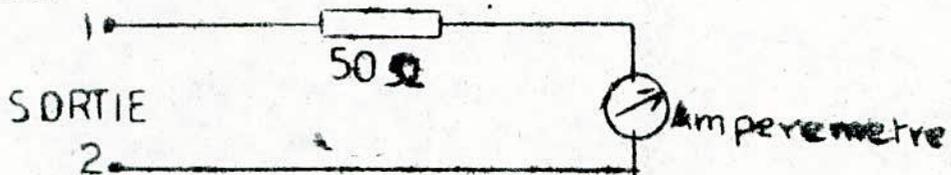
En fonctionnement normal i.e quand la palette est en dehors des bobines : ( $x_o > x_r$ ), des oscillations de  $f = 80$  KHZ sont entretenues dans les deux circuits LO.

Quand la palette est entre les deux bobines : ( $x_o = x_r$ ), les oscillations disparaissent.

Les variations de tension dans le circuit <sup>sont</sup>, données par les diagrammes (FIG-2), pour  $x_o > x_r$  et  $x_o = x_r$

#### 2-d Circuit de puissance :

Pour comprendre ce qui se passe dans le circuit de puissance, nous avons simulé le four par un rhéostat dans le montage suivant :



Cette simulation nous a permis aussi de comprendre le fonctionnement des thyristors.

Conclusion : Au cours de ces procédés d'identification et de simulation, nous avons rencontré des défaillances. A citer :

- La diode S34 du premier générateur d'impulsions était claqué. Elle a été remplacée par son équivalente une BAV 20.

- Le quatrième transistor (BC 147) du régulateur de température a claqué par court circuit entre émetteur et collecteur. Il a été remplacé par un autre BC 147.

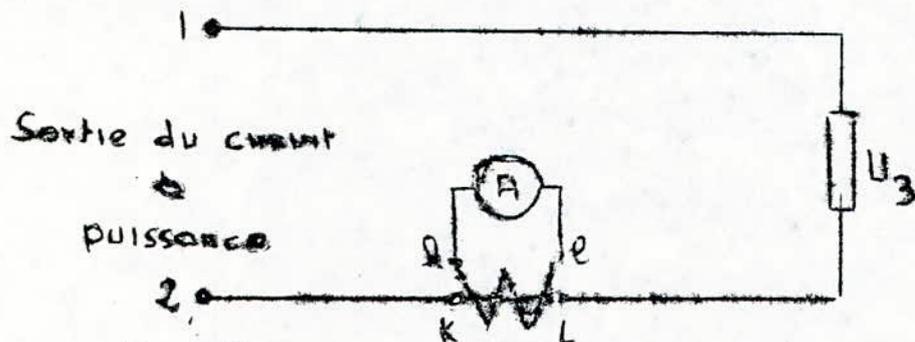
- Dans la fiche d'alimentation, la phase et le neutre ne correspondaient pas à ceux du réseau. Une correction a été faite.

#### VIII-3 Réglage avec le four :

Avant de brancher le four avec son système de régulation, des mesures à l'ohmmètre ont été effectuées pour vérifier

l'état de la résistance chauffante et du thermocouple i.e pour nous assurer que les fils ne sont pas coupés.

Pour régler le courant injecté dans le four à 40 A soit 2,6 A en secondaire du transformateur de courant ( $n=15$ ), nous avons effectué le montage suivant :



- $U_3$  : four
- A : ampèremètre ferrodynamique
- $T_1$  : transformateur d'intensité

Nous avons utilisé un ampèremètre ferrodynamique au lieu d'un ampèremètre magnétoélectrique qui contient un redresseur ( $\text{A} \rightarrow$ ), car ce dernier ne mesure donc pas de ce fait la valeur efficace vraie du courant alternatif, mais sa valeur moyenne.

De réglage a été possible, en observant le signal à la sortie "1-2" (circuit de puissance) à l'oscilloscope. La stabilisation n'est obtenue qu'en réglant les ajustables sur la même valeur, pour un fonctionnement symétrique et équilibré.

Les courbes de la FIG-43 nous donnent :

- Le signal qui attaque la base de  $T_1$  (circuit de commande)
- Le signal à la sortie "1-2" (circuit de puissance) i.e le signal injecté dans le four qu'on doit avoir pour un fonctionnement stable de tout le système.

#### VIII-4 Mise en marche :

Après le réglage effectué avec le four nous avons procédé à une mise en marche de tout le système, i.e on a chauffé le four jusqu'à  $1200^\circ\text{C}$ .

Pour ce faire, on a utilisé un deuxième thermocouple Pt-Rh/Pt-Rh que l'on a introduit dans la chambre de chauffe pour pouvoir comparer leur action.

Le tableau suivant donne les relevés des mesures faites lors de cette montée en température :

Temps :	13h21	13h26	13h36	13h44	13h55	14h05	14h12	14h21	14h29
T°C 1 <sup>er</sup> capteur:	0	0	0	20	100	200	400	600	700
T°C 2 <sup>e</sup> capteur:	20	100	200	280	400	480	540	620	700
courant (A)	2,80	2,75	2,70	2,70	2,70	2,65	2,65	2,65	2,65
V(5-6) : (V)	6,1	6	5,9	5,6	5,5	5,2	5,2	5	4,9
V <sub>CD</sub> : (V)	16	15,5	15,5	15	15	15	15	15	15
V <sub>AB</sub> : (V)	12	11,5	12	11,5	12	11,5	11,5	12	12
V <sub>AE</sub> : (V)	9	9,5	9,5	9,5	9,8	9,6	9,8	9,8	9,8

Temps :	14h38	14h47	14h55	15h03	15h13
T°C 1 <sup>er</sup> capteur:	800	900	1000	1100	1200
T°C 2 <sup>e</sup> capteur:	800	860	960	1040	1100
courant (A)	2,65	2,65	2,65	2,65	0
V(5-6) : (V)	4,8	4,6	4,5	4,4	0
V <sub>CD</sub> : (V)	15	15	15	14,8	7
V <sub>AB</sub> : (V)	11,5	11,5	12	11	11
V <sub>AE</sub> : (V)	10	10	10	10	8

En conclusion, on peut dire que l'emplacement de la soudure chaude du thermocouple par rapport à la résistance chauffante est déterminant pour son temps de réponse.

Le couple Pt-Rh/Pt-Rh HLL 18 met en moyenne dix minutes tous les 100°C.

Le courant demeure pratiquement constant.

La FIG-44 nous donne les courbes de montée en température du four, en fonction des valeurs données par les deux capteurs.

La FIG-45 donne la variation des tensions qui déterminent la commande lors de cette montée en température.

VIII-5 Utilisation :5-a Four tubulaire type ROR 2,5/30 1700°C

Fonctions : Expérimenter des matériaux métalliques et céramiques à hautes températures.

Contrôler et étalonner les thermocouples et pyromètres à disposition de filament, les pyromètres bichromatiques et à rayonnement total.

Conditions d'utilisation : [15]

- Température nominale 1700°C  
 - Température maximale d'emploi 1800°C, pour une utilisation de courte durée.

- Puissance nominale 1,7 KW

- Tension nominale 42 V

- Courant nominal 40 A

Caractéristique particulière :

L'élément chauffant subit des variations de résistance considérable pendant le chauffage :

La résistivité par degré est donnée par :

(résistivité à 0°C) x (coefficient de température de la résistivité)  
 ce qui nous donne :

5-b Groupe de commande et de régulation :

Utilisation : La consigne est fixée manuellement. Pour mettre le système

en marche : - le brancher sous 220 V

- tourner le bouton contacteur principal en position marche

- quand le système est sous tension, l'ampoule signalétique doit s'allumer

A partir de l'instant où le système est sous tension, il faut attendre environ vingt minutes avant que l'aiguille de mesure commence à devier. Après, il marquera 100°C tous les dix minutes.

Donc pour chauffer le four jusqu'à 1700°C, il faut attendre environ trois heures en marche continue .

#### VIII-6 Maintenance :

En cas de panne, le groupe de commande et régulation s'ouvre en dévissant les vis du devant et en tirant vers vous. Une panne peut avoir plusieurs causes possibles. Une recherche méthodique est nécessaire pour dépister la défaillance.

Comme la raison d'être de tous ces circuits est de fournir au four une puissance répondant à ses exigences propres et de maintenir sa température à la valeur désirée.

On doit toujours commencer par voir si le four chauffe ou pas; et remonter la chaîne comme le montre l'organigramme (FIG-46) .

La réparation consiste généralement à :

- suivre le circuit jusqu'à localisation de la panne
- remplacer l'élément défaillant
- ou bien rétablir un contact au cas où il y a un faux contact.

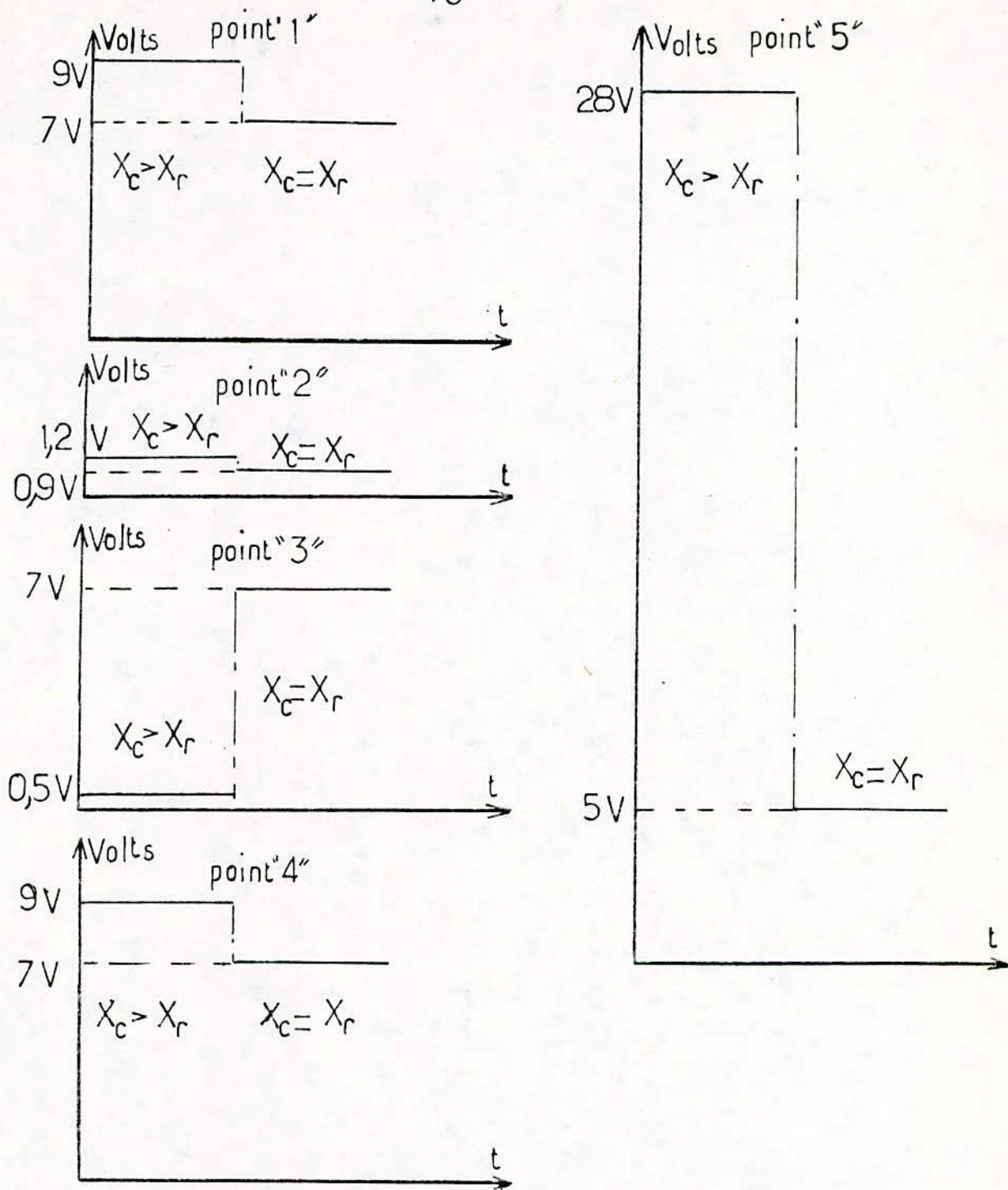


FIG 42 : Diagramme de fonctionnement  
du regulateur

NB : Pour les points: 1,2,3,4,5 voir fig 17

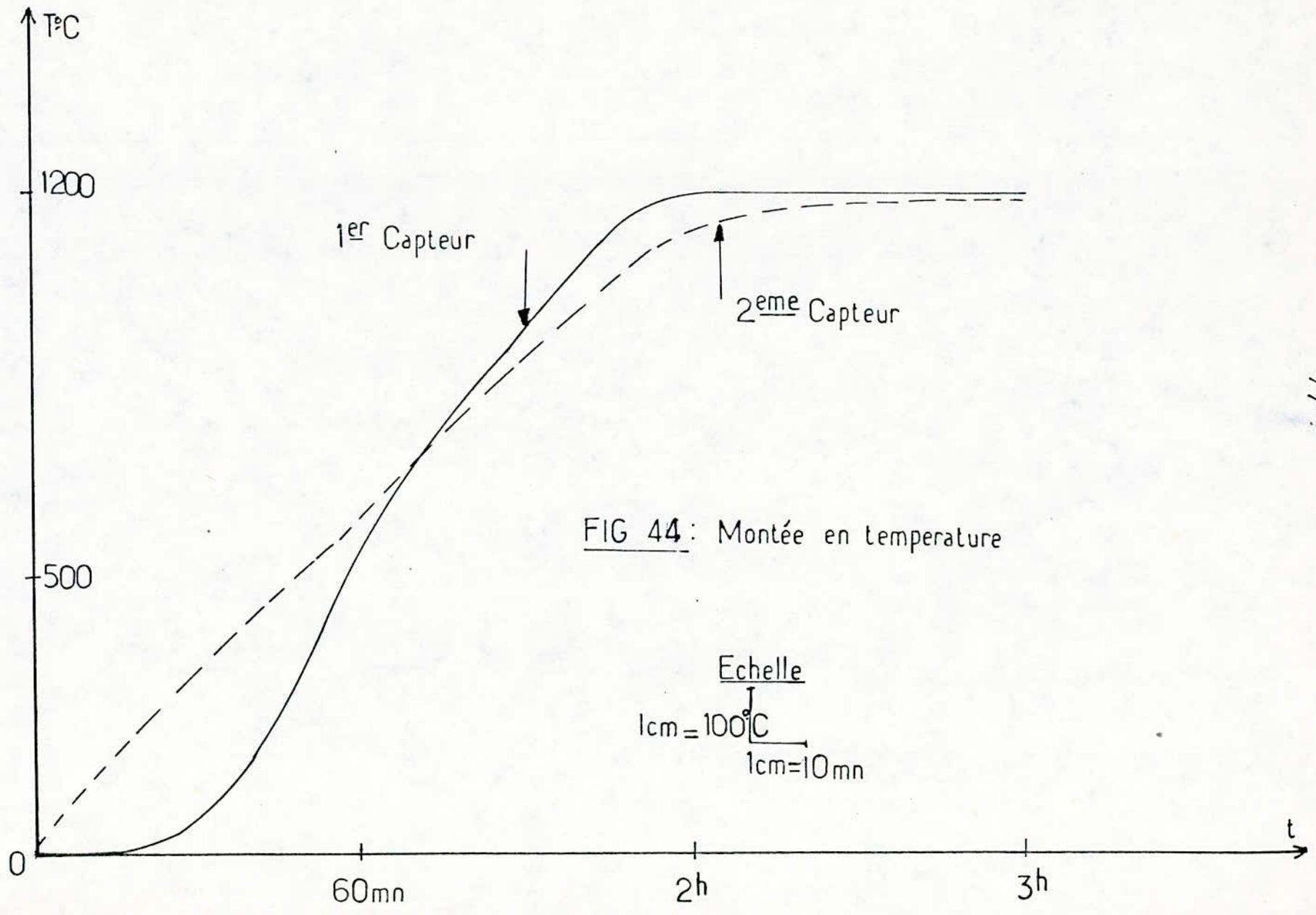
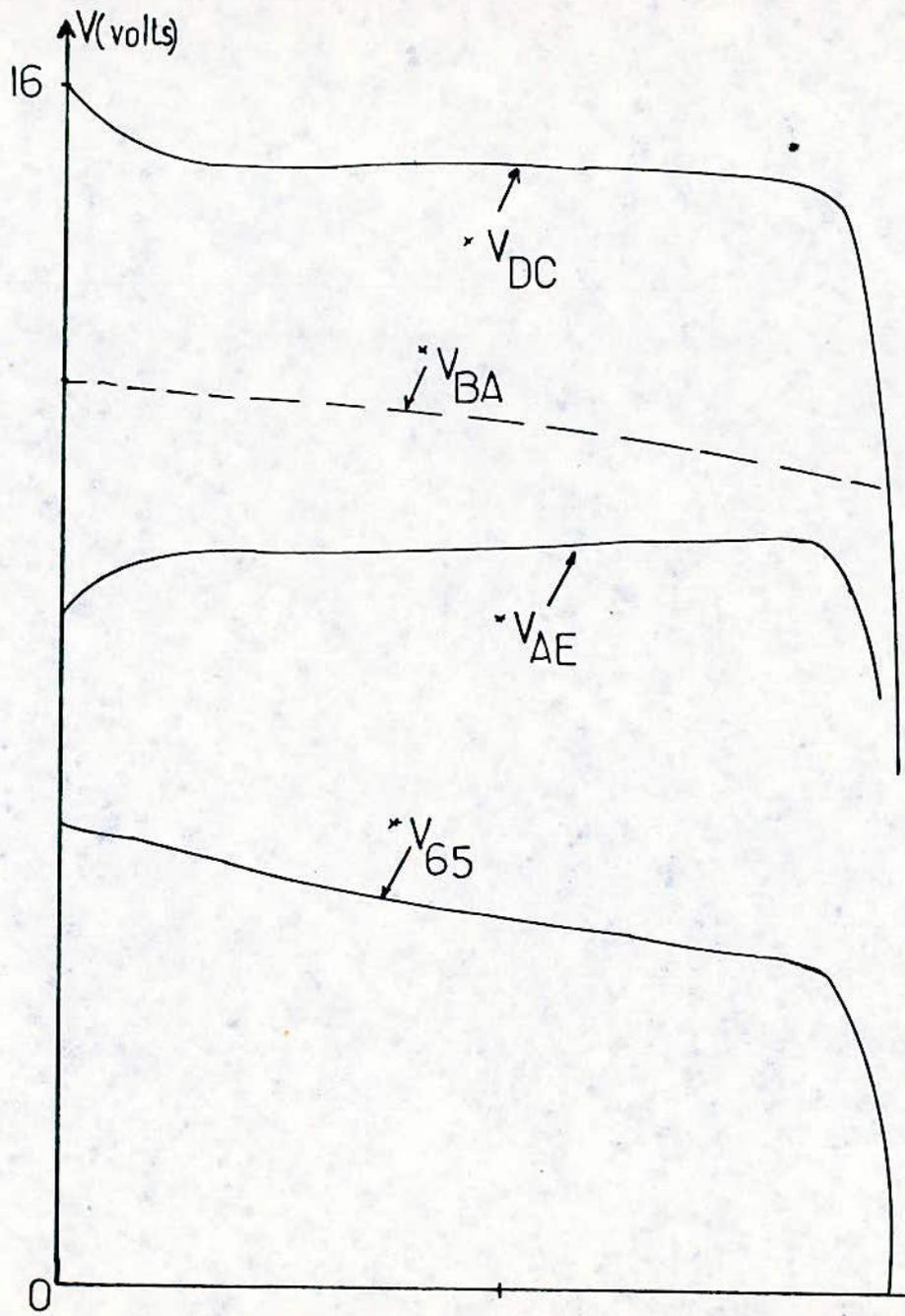


FIG 44: Montée en temperature

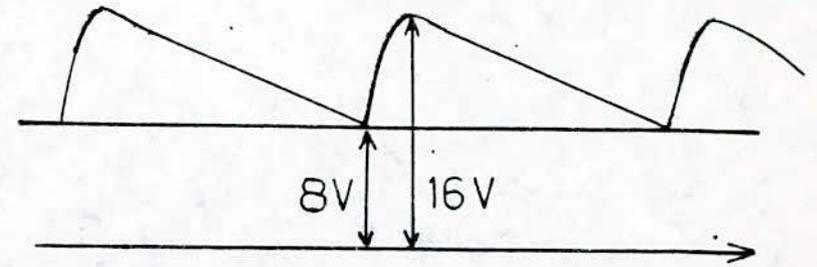
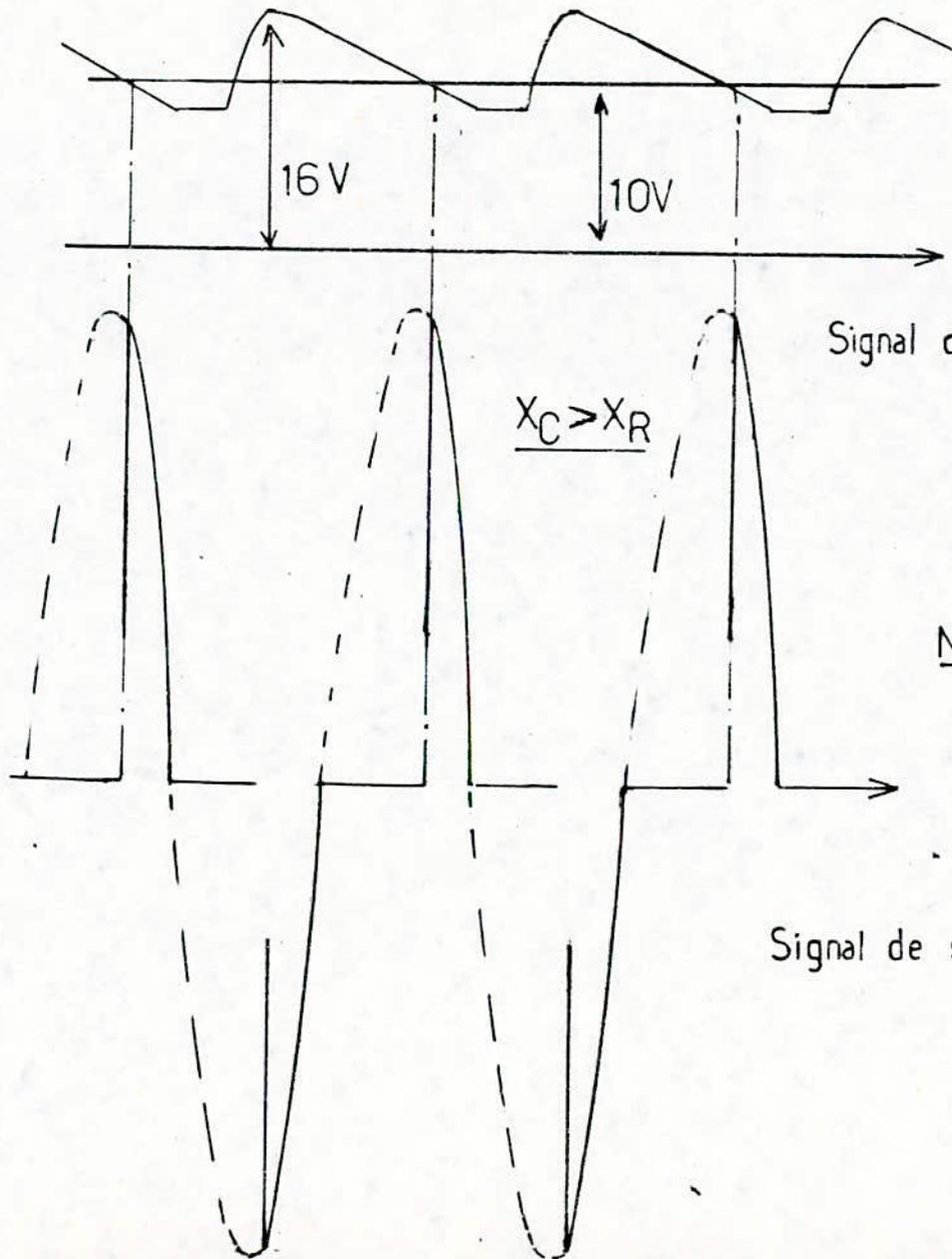
Echelle  
 1cm = 100°C  
 1cm = 10mn



\* Voir figure 33

FIG 45 : Variation des tensions de commande lors de la montée en température

Echelle  
 1cm=1V  
 1cm=10mn



NB: Le signal d'attaque de  $T_4$  se déduit par symétrie

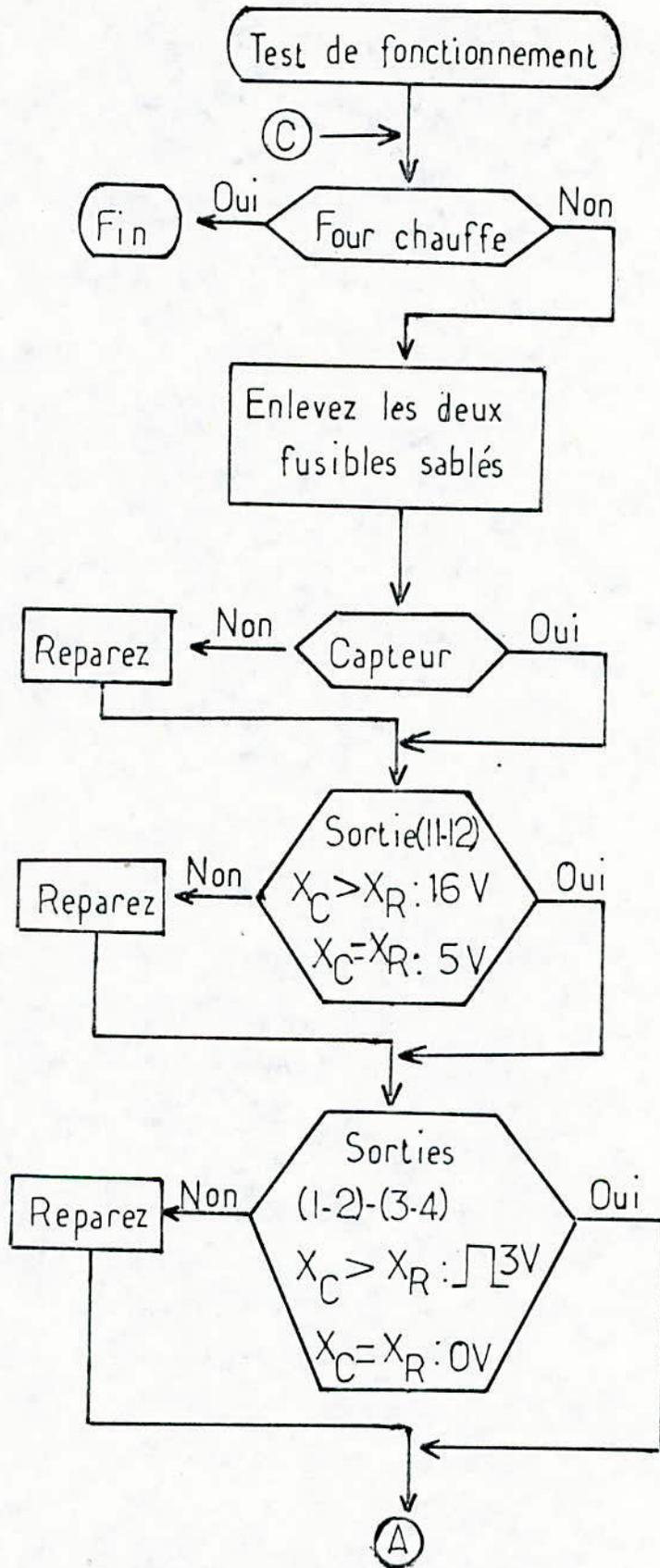
Echelle

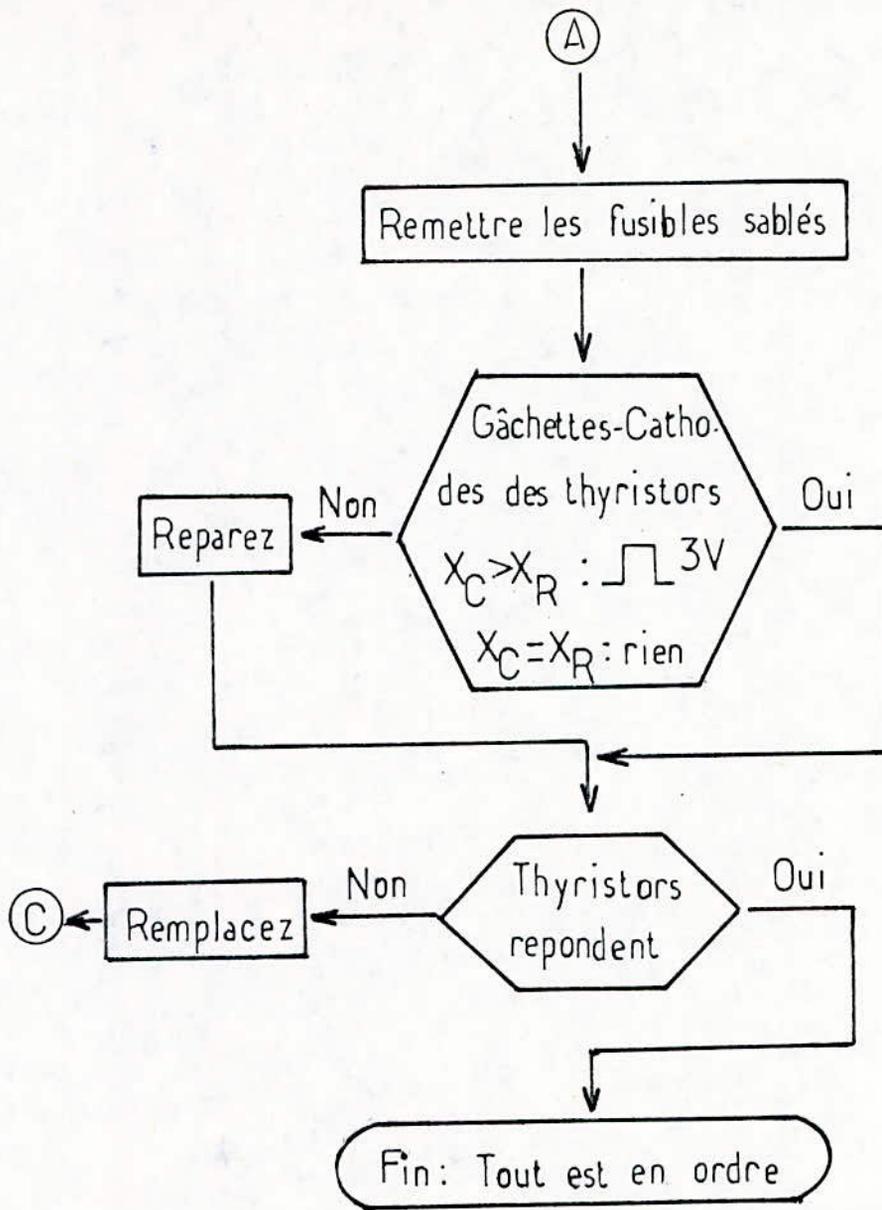
1 cm = 5V

1 cm = 5ms

FIG 43

FIG 47 : Organigramme de maintenance





NB : Sorties(11-12) : voir fig.17  
Sorties(1-2)(3-4) : voir fig 30

Arrivé au terme de ce travail, on peut dire que la commande et la régulation mises en oeuvre pour un four, dépend essentiellement du principe de chauffage utilisé.

Par exemple, pour les fours à résistances, le chauffage repose principalement sur la loi de Joule : où la puissance absorbée par la résistance chauffante est régie par la relation :  $P = U^2/R$ . La commande et la régulation se font donc par action au niveau de la tension d'alimentation du four.

Nous avons aussi constaté que la régulation par tout ou rien, bien qu'étant relativement simple, par son principe, les éléments chauffants ne puissent se trouver qu'alimentés à la tension maximale avec la puissance dissipée égale à la puissance installée ou hors tension.

La précision souhaitée et la nature des éléments chauffants nécessitent toutefois des circuits plus élaborés dans sa mise en oeuvre.

Ainsi, quoiqu'étant mis au point en 1966, l'équipement de commande et de régulation de ce four utilise quand même des techniques relativement récentes. A citer :

- techniques d'impulsions
- commande par thyristors

qui sont encore acceptables à ce jour.

Cet équipement répond convenablement aux exigences d'expérimentation et d'étalonnage : destinée de ce four, car :

- le thermocouple utilisé permet le fonctionnement du four dans une plage de températures assez vaste, jusqu'à 1800°C
- l'utilisation de la source de tension additionnelle qui réduit la période T (respectivement la constante de temps du four), permet l'augmentation de la précision du système.

Cependant, nous soulignons que les valeurs prises lors de la montée en température, sont valables jusqu'à 1200°C. Nous n'avons pu chauffer le four jusqu'à la température nominale 1700°C, car un thyristor a claqué.

82  
Il faudrait donc le remplacer par son équivalent, sinon les deux thyristors doivent être changés pour assurer un fonctionnement stable de l'équipement : ceci est nécessaire parce que ceux-ci sont montés en tête bêche dans le circuit de puissance .

Enfin, ce projet de fin d'études nous a permis de voir l'application de la théorie de la régulation industrielle sur un cas réel.

—ooo0ooo—

## ANNEXE :

Table de référence du couple thermoelectrique Pt 30% Rh/Pt 6% Rh  
(f.e.m en UV absolus, jonction de référence à 0°C)

Proposition C.E.I mai 1974

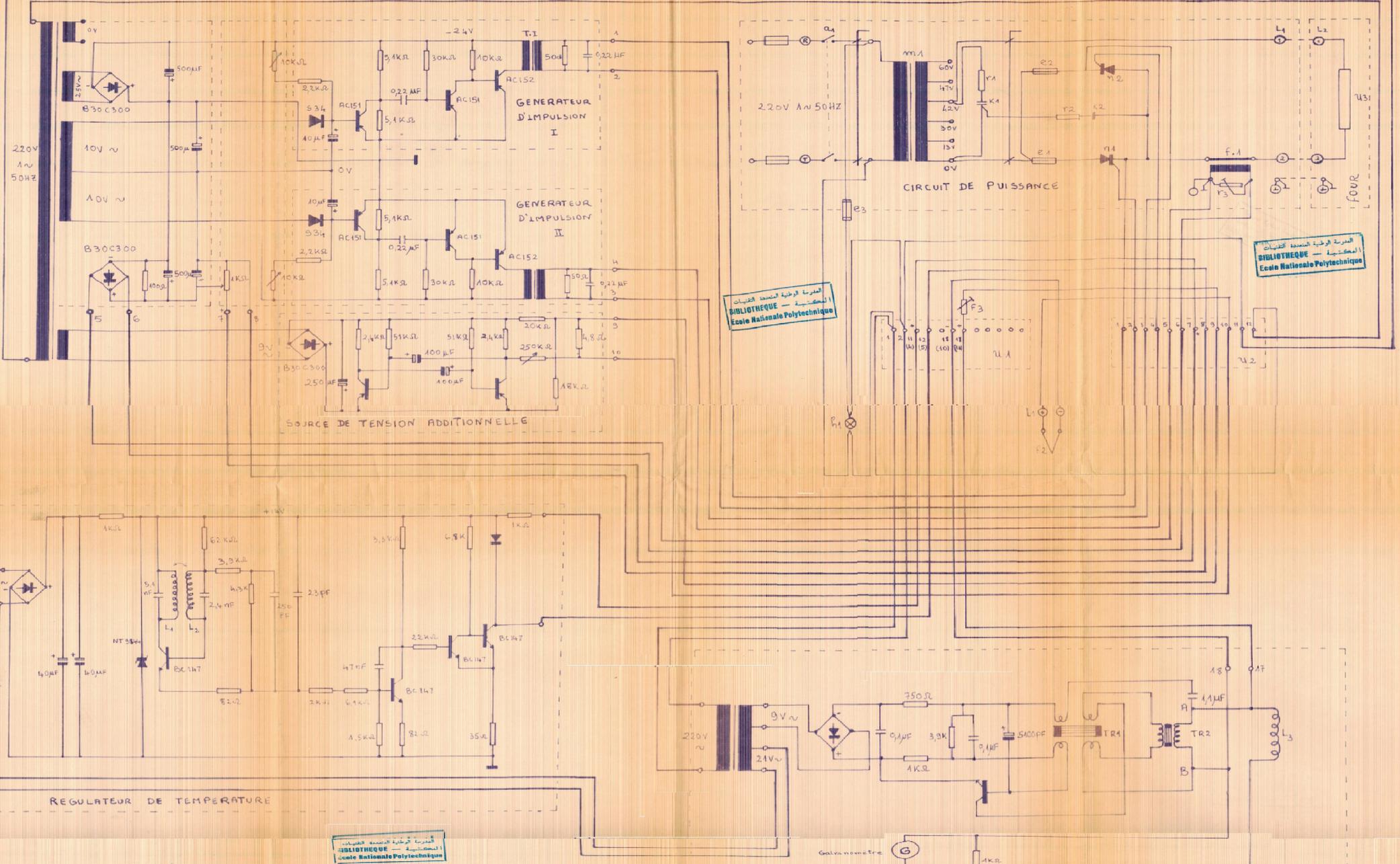
T°C "1968"	0	10	20	30	40	50
0	0	-2	-3	-2	0	2
100	33	43	53	65	78	92
200	178	199	220	244	266	291
300	431	462	494	527	561	596
400	786	827	870	913	957	1002
500	1241	1292	1344	1397	1450	1505
600	1791	1851	1912	1974	2036	2100
700	2430	2499	2569	2639	2710	2782
800	3154	3231	3308	3387	3466	3546
900	3957	4041	4126	4212	4298	4386
1000	4833	4924	5016	5109	5202	5297
1100	5777	5875	5973	6073	6172	6273
1200	6783	6887	6991	7096	7202	7308
1300	7845	7953	8063	8172	8283	8393
1400	8952	9065	9178	9291	9405	9519
1500	10094	10210	10325	10441	10558	10674
1600	11257	11374	11491	11602	11725	11842
1700	12426	12543	12659	12776	12892	13008
1800	13585	13699	13814			

Toc "1968"	60	70	80	90
0	6	11	17	25
100	107	123	140	159
200	317	344	372	401
300	632	669	707	746
400	1048	1096	1143	1192
500	1560	1617	1674	1732
600	2164	2230	2296	2363
700	2855	2928	3003	3078
800	3626	3708	3790	3873
900	4474	4562	4652	4742
1000	5391	5487	5583	5680
1100	6374	6475	6577	6680
1200	7414	7521	7628	7736
1300	8504	8616	8727	8839
1400	9634	9748	9863	9979
1500	10790	10907	11024	11141
1600	11959	12076	12193	12310
1700	13127	13239	13354	13470

## BIBLIOGRAPHIES :

- 1- Mesures électriques appliquées  
M. Abati - R. Cheveaux - A. Roix  
Edition Delagrave 1973
- 2- Electricité - Electronique  
Problèmes résolus T.2  
M. Abignoli - B. Agius  
Edition Delagrave 1973
- 3- Les transistors en régime d'impulsion  
G. Fontenne  
Edition Dunod Paris 1970
- 4- La mesure des températures en laboratoire  
et dans l'industrie  
M. Termy  
Edition Dunod
- 5- Radio plan n°431 octobre 1983
- 6- Electrothermie industrielle  
Maurice Orfeuill  
Edition Dunod 1981
- 7- Guide de mesure et de la régulation industrielle  
Robert Fardin  
Edition Eyrolles 1969
- 8- Electronique de réglage et de commande  
H. Bühler  
Dunod 1979

- 9- Les hautes températures et leurs utilisations  
en physique et en chimie ,T.2 Mesures physiques  
G. Chaudion - F. Trombe  
Edition Masson 1973
- 10- Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie  
J. Burton T.2  
Edition Dunod 1966
- 11- Le thyristor -Principe et caractéristiques  
F. Brichant  
Entreprise moderne d'édition Paris 1967
- 12- Techniques des impulsions - Circuits impulsionsnels  
et de commutation  
Dorval  
Mc Graw Hill,éditeurs 1983
- 13- Technique de l'ingénieur R. 2590
- 14- Norma - Instruction manuel thermocompensation  
4101 GB 1D/E
- 15- Catalogue HERAEUS sur les fours tubulaires  
EW-DI Edition 1973
- 16- Systèmes asservis Tome 2  
J.J Di Stefano - A.R. Stubberud - I.J. Williams  
Serie Schaum 1983
- 17- Revue Radio plan n°441 août 1984



المكتبة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

المكتبة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

المكتبة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

SCHEMA DE PRINCIPE  
DU GROUPE DE COMMANDE ET DE REGULATION  
DE TYPE RE HERAEUS

CIRCUIT DE MESURES

Galvanometre

G

30V  
50V