

77/696 .

UNIVERSITE DE NANCY I

Sc. N. 77/19<sup>B</sup>

---

# THESE

---

## CONDUITE PAR CALCULATEUR D'UN PROCESSUS DE REFROIDISSEMENT PAR PULVERISATION D'EAU

---

présentée devant l'Université de Nancy I

pour obtenir le titre de

Docteur de Spécialité en Automatique

par

**Gérard REMY**

Maître ès-Sciences



Soutenu le 24 Mars 1977 devant la Commission d'Examen

---

### JURY:

Messieurs

R. FAIVRE

Président

G. BECK

Examineurs

J.C. CHEVRIER

A. FRUHLING

C. HUMBERT

P. GAVARINI

Invité

**1977**

BIBLIOTHEQUE SCIENCES NANCY 1



D 095 181010 9

UNIVERSITE DE NANCY I

---

# THESE

---

## CONDUITE PAR CALCULATEUR D'UN PROCESSUS DE REFROIDISSEMENT PAR PULVERISATION D'EAU

---

présentée devant l'Université de Nancy I

pour obtenir le titre de

Docteur de Spécialité en Automatique

par

**Gérard REMY**

Maitre ès-Sciences

Soutenu le 24 Mars 1977 devant la Commission d'Examen

---

JURY:

|           |               |            |
|-----------|---------------|------------|
| Messieurs | R. FAIVRE     | Président  |
|           | G. BECK       | Examineurs |
|           | J.C. CHEVRIER |            |
|           | A. FRUHLING   |            |
|           | C. HUMBERT    |            |
|           | P. GAVARINI   | Invité     |

**1977**

A MES PARENTS.

## avant - propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au LABORATOIRE DE METALLURGIE de l'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE de la METALLURGIE et de l'INDUSTRIE des MINES de NANCY, associé au C.N.R.S. L.A. 159, sous la direction de Monsieur le Professeur René FAIVRE.

Nous prions Monsieur le Professeur René FAIVRE d'accepter nos plus vifs remerciements pour l'intérêt qu'il a porté à cette étude.

Une part importante de notre formation scientifique revient à Monsieur le Professeur Alfred FRUHLING, Directeur du LABORATOIRE D'ELECTRICITE et D'AUTOMATIQUE de NANCY. Nous l'assurons de notre reconnaissance pour l'enseignement qu'il nous a prodigué et pour avoir accepté de diriger et juger ce travail.

Nous sommes reconnaissant envers Monsieur le Professeur Claude HUMBERT, de la confiance et des encouragements qu'il nous a apportés tout au long de notre travail.

Notre gratitude s'adresse tout particulièrement à Monsieur Gérard BECK, Maître de Recherches au C.N.R.S., qui a bien voulu nous accepter dans son équipe de recherche. Nous lui adressons nos plus sincères remerciements pour l'apport scientifique et matériel dont nous avons pu ainsi bénéficier.

Nous devons à Monsieur Jean-Charles CHEVRIER, Maître-Assistant à l'Ecole des Mines de Nancy, notre initiation à la recherche. Par

## introduction

ses compétences dans le domaine de la thermique, par son dynamisme et sa critique constructive, il nous a permis de mener à bien ce travail et nous l'assurons de notre considération.

Nous remercions très sincèrement Monsieur Paul GAVARINI, Directeur Technique de la Société DATA GENERAL FRANCE d'avoir accepté d'examiner ce travail. Nous sommes très sensible à l'honneur qu'il nous fait en venant à Nancy pour se joindre à notre jury de thèse malgré les lourdes responsabilités dont il assume la charge.

Nous n'aurions garde d'oublier dans nos remerciements Messieurs José RAGOT et Michel ROESCH et plus particulièrement Messieurs Michel DUFALT et André SIMON dont la compétence et la patience nous ont été précieuses.

Messieurs HENNINGER et ses collaborateurs nous ont permis de mener à bien la construction de l'installation. Tous nos camarades chercheurs et techniciens, Messieurs Guy DIDIER et Robert VERNET, nous ont aidé dans ce travail.

Enfin Mesdames NOBLE, OME et SPIESS, ainsi que Monsieur Bernard COLLERET, ont participé à la présentation et à la mise en forme finale de ce mémoire.

Pratiquée depuis l'Antiquité, l'opération de trempe est restée très longtemps empirique, parfois même à caractère magique.

La connaissance scientifique précise des phénomènes intervenant dans le métal, dans le milieu de trempe, et surtout à la surface de contact entre ces deux milieux, ainsi que le développement technologique des instruments de mesure ont permis de développer de nouvelles techniques de refroidissement qui assurent la reproductibilité du traitement et la définition précise des gammes de vitesses de refroidissement accessibles.

L'évolution actuelle des alliages métalliques et de leur domaine d'emploi a nécessité une adaptation des méthodes de traitement thermique pour faire face à des problèmes de plus en plus complexes. La mutation s'est effectuée au sein même des équipes de recherche où interviennent maintenant plusieurs disciplines scientifiques telles que la métallurgie, la thermique et même parfois l'automatique.

Des études ont été menées<sup>(1,2,3)</sup> autant sur les milieux de trempe que sur des revêtements déposés à la surface du métal afin de maîtriser les transferts de chaleur métal-liquide de trempe.

Toutefois, la technique de trempe par immersion est restée un processus "en boucle ouverte". Les différents paramètres tels que : nature du liquide de trempe, épaisseur et nature du dépôt sont fixés avant l'immersion en fonction du refroidissement à obtenir, et aucune action correctrice ne s'effectue pendant la durée de l'opération de trempe. De plus, les moyens d'intervention sur les variations de la vitesse de refroidissement en fonction de la température sont tout à la fois limités et rarement industrialisables.

Une étude sur le refroidissement par pulvérisation d'eau a montré que l'on pouvait obtenir des conditions de transfert de chaleur modifiables au cours même du refroidissement du solide<sup>(6)</sup>.

En effet, le refroidissement obtenu dépend de variables commandables, telles que la pression d'air injectée dans les pulvérisateurs ou le débit du liquide de refroidissement.

L'avantage de ce système réside dans la possibilité de moduler les paramètres du jet diphasique donc d'agir sur le refroidissement du métal à traiter. Un intérêt supplémentaire apparaît par l'implantation d'un calculateur qui tient compte à chaque instant du comportement de la pièce traitée pour générer la variation appropriée des paramètres de commande. Il est alors possible de contrôler le traitement thermique et d'imposer au métal la loi de refroidissement optimale qui lui confère les propriétés mécaniques souhaitées.

Nous nous proposons, dans le cadre de ce travail, d'identifier les différents paramètres qui interviennent au cours du refroidissement et de déterminer un modèle du système de refroidissement par pulvérisation d'eau. Puis, dans une seconde étape, nous faisons un bilan des contraintes de pilotage, inhérentes à l'environnement temps-réel, et aux processus physiques mis en jeu. Ensuite, nous en déduisons les algorithmes de commande indispensables au fonctionnement correct du système. Enfin, nous exposons quelques résultats d'applications thermiques et métallurgiques que permet d'obtenir le contrôle en temps réel du refroidissement.

## notations

|                                |                                                                |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $\rho$                         | masse volumique                                                |
| $c$                            | chaleur massique                                               |
| $\lambda$                      | conductivité thermique                                         |
| $\alpha$                       | diffusivité thermique                                          |
| $h$                            | coefficient de transfert de chaleur                            |
| $R$                            | rayon de l'éprouvette                                          |
| $H$                            | hauteur de l'éprouvette                                        |
| $S$                            | surface de l'éprouvette                                        |
| $m$                            | masse de l'éprouvette                                          |
| $x, y$                         | espace cartésien                                               |
| $r, \omega$                    | espace cylindrique                                             |
| $t$                            | variable de temps                                              |
| $dx, dy, dt$                   | accroissements infiniment petits des variables espace et temps |
| $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ | accroissements finis des variables espace et temps             |
| $N$                            | nombre d'intervalles $\Delta x$                                |
| $M$                            | nombre d'intervalles $\Delta t$                                |
| $\theta_s$                     | température de la surface de l'éprouvette                      |
| $\theta_c$                     | température du centre géométrique de l'éprouvette              |
| $\theta_L$                     | température du milieu de tremp                                 |
| $\phi/S$                       | densité du flux de chaleur                                     |
| $\theta_r$                     | température de référence                                       |
| $\epsilon_\theta$              | écart de température entre la consigne et la mesure            |

chapitre I

Position du problème

A - ASPECT METALLURGIQUE

- 1 - La trempe, procédé industriel de durcissement
- 2 - La trempe, traitement thermique pour conserver à basse température l'état structural stable à haute température.

B - ASPECT THERMIQUE

- 1 - Trempe par immersion
- 2 - Trempe par pulvérisation
- 3 - Comparaison des comportements des deux systèmes.

C - ASPECT AUTOMATIQUEI - POSITION DU PROBLEMEA - ASPECT METALLURGIQUE

Les traitements thermiques ont pour but de donner à un alliage, l'état structural dans lequel il procurera le meilleur comportement devant les sollicitations auxquelles il sera soumis au cours de son emploi. Ils consistent toujours en un double contrôle de la nucléation des phases et du processus de diffusion atomique par l'intermédiaire de la maîtrise du cycle thermique parcouru.

Dans le cas particulier de la trempe, nous pouvons considérer les deux finalités du traitement :

1 - La trempe, procédé industriel de durcissement

L'acier à traiter subit un refroidissement, à partir du domaine austénitique, à une vitesse plus grande que la vitesse critique de trempe, de telle sorte que les transformations de phase par germination et croissance par diffusion soient évitées, pour que la martensite apparaisse.

On cherche généralement ainsi à obtenir la dureté maximale pour chaque nuance d'acier.

2 - La trempe, traitement thermique pour conserver à basse température l'état structural stable à haute température

Ce cas est, en particulier, celui des alliages d'aluminium, des aciers inoxydables ou de certains alliages de titane.

En étudiant la cinétique des transformations de phase et en traçant notamment les courbes TRC, le métallurgiste détermine la loi de refroidissement qui lui permet de conférer à l'alliage traité, les caractéristiques mécaniques requises.

En fait, cette analyse fixe une valeur minimum de la vitesse de refroidissement à réaliser à chaque température, donc l'allure générale de la courbe de refroidissement la plus lente qui donne le résultat métallurgique attendu.

Il apparaît une autre limite sur la vitesse, imposée par le risque d'apparition de défauts de trempe, comme par exemple les déformations résiduelles ou les tapures qui surviennent quand le refroidissement est trop rapide. Le métallurgiste doit donc choisir le refroidissement optimal, compromis grâce auquel le métal acquiert les caractéristiques mécaniques désirées sans qu'il n'apparaisse de défauts de trempe (figure 1). Quand il existe, ce compromis exige souvent une grande précision de refroidissement

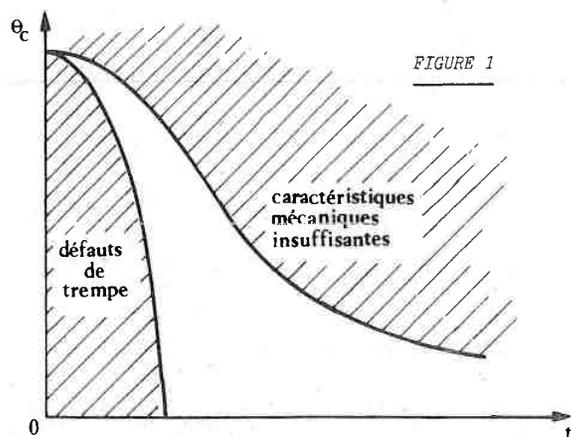


FIGURE 1

Dans le cas des alliages légers de hautes caractéristiques à base d'aluminium, ARCHAMBAULT (4) a mené une étude qui permet de définir l'allure d'un refroidissement optimal. Cette loi de refroidissement conduit à l'obtention d'un alliage libre de toute contrainte résiduelle mais dont la limite élastique est la plus élevée possible.

Toutefois, l'incompatibilité des deux critères :

- caractéristiques mécaniques maximales
- contraintes résiduelles de trempe faibles,

impose une évolution de la vitesse de refroidissement en fonction de la température qui dépend de la nature de l'alliage et des dimensions de l'éprouvette.

La figure suivante représente les domaines permis de variation de la vitesse de refroidissement en fonction de la température. Nous y avons tracé, pour exemple, des lois de refroidissement obtenues grâce à des moyens conventionnels.

Pour obtenir une loi de refroidissement optimale (courbe de type ③), il est nécessaire de contrôler les variations de la vitesse de refroidissement en fonction de la température du métal, au cours même du traitement thermique.

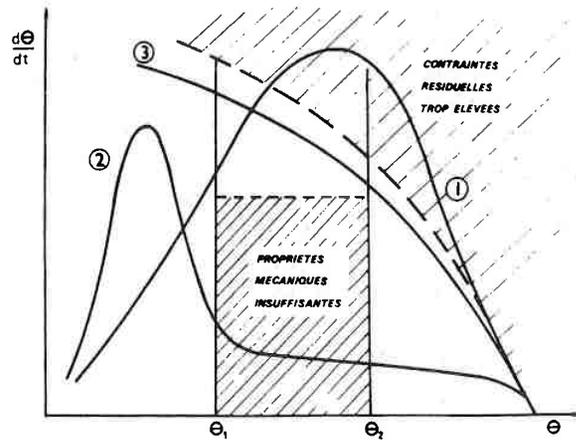


FIGURE 2

Evolution schématique de la vitesse instantanée de refroidissement en fonction de la température.

- 1 - Trempe eau froide
- 2 - Trempe eau chaude
- 3 - Refroidissement optimal.

#### B - ASPECT THERMIQUE

##### 1 - Trempe par immersion

Les conditions expérimentales sont les suivantes :

- l'éprouvette est portée à une température de 800°C, puis trempée dans de l'eau distillée prise à différentes températures (de 20°C à 100°C).

- dans le réseau des courbes représenté sur la figure 3, le paramètre qui varie est la température de l'eau.

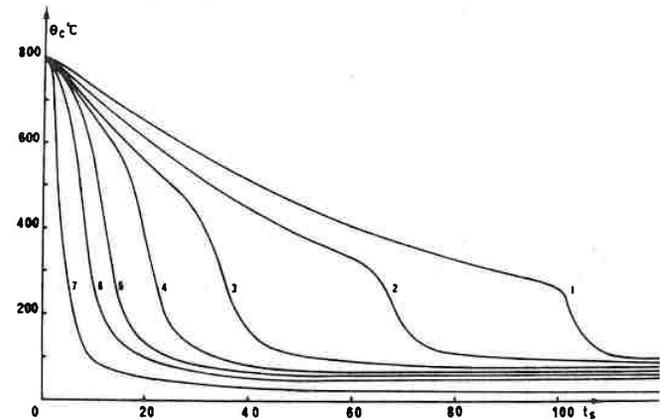


FIGURE 3

Variations en fonction du temps de la température au centre d'une éprouvette cylindrique en nickel de 16 mm de diamètre et de 48 mm de hauteur trempée depuis  $\theta = 800^\circ\text{C}$  dans l'eau prise à différentes températures :

- |           |           |
|-----------|-----------|
| 1 - 100°C | 4 - 70°C  |
| 2 - 90°C  | 5 - 60°C  |
| 3 - 80°C  | 6 - 50°C  |
|           | 7 - 20°C. |

##### 2 - Trempe par pulvérisation

Il s'agit de placer le solide à refroidir dans un jet diphasique constitué de fines gouttelettes d'eau portées par un gaz, en général de l'air.

- l'éprouvette est à une température initiale de 800°C
- l'eau pulvérisée est à la température de 20°C
- le paramètre variable est la pression d'air (de 1 à 6 bars).

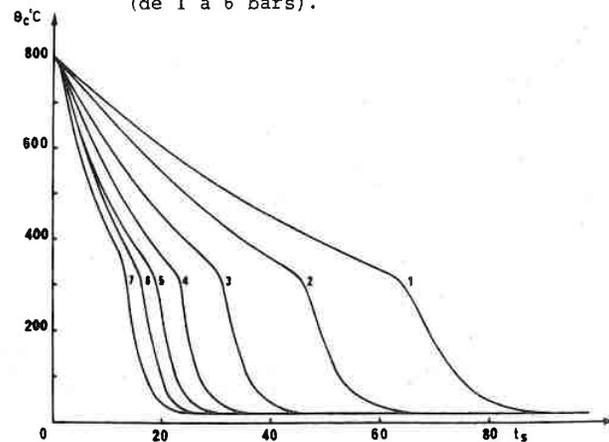


FIGURE 4

Variations en fonction du temps de la température au centre d'une éprouvette cylindrique en nickel de 16 mm de diamètre et de 48 mm de hauteur, refroidie par pulvérisation d'eau à 20°C sous une pression d'air de :

|             |            |
|-------------|------------|
| 1 - 1 bar   | 4 - 3 bars |
| 2 - 1,5 bar | 5 - 4 bars |
| 3 - 2 bars  | 6 - 5 bars |
|             | 7 - 6 bars |

### 3 - Comparaison des comportements des deux systèmes

La trempe au bain dans un liquide vaporisable présente des températures de transition entre régime non mouillant-régime mouillant, essentiellement variables en fonction de la température du bain.

Par contre, la trempe par pulvérisation présente des températures de transition que l'on peut considérer comme indépendantes des variations de pression.

Il apparaît que le comportement dynamique du système de refroidissement par pulvérisation présente des aspects comparables à ceux du refroidissement par immersion.

L'intérêt de la pulvérisation réside dans le fait que, s'il est impossible, au cours d'une opération de trempe, d'agir de façon rapide sur la température de l'eau, il est par contre facile de commander la pression d'air afin de contrôler la vitesse de refroidissement au cours même du transfert de chaleur.

### C - ASPECT AUTOMATIQUE

Pour que le traitement thermique procure les effets souhaités, la courbe de refroidissement doit se situer dans la plage fixée par le métallurgiste.

Dans le plan  $(\theta_c, t)$ , figure 5, le point S, représentatif de l'état du système, à un instant  $\tau$ , doit toujours se situer entre  $\theta_{max}$  et  $\theta_{min}$ .

Le rapport  $\frac{\delta\theta}{\delta t}$ , c'est-à-dire la vitesse de refroidissement à l'instant  $\tau$ , fixe la position future du point S, en S'.

Toutefois, il convient d'agir avec précaution sur cette vitesse de refroidissement, car des accélérations trop

brutales risquent de provoquer des défauts de trempe.

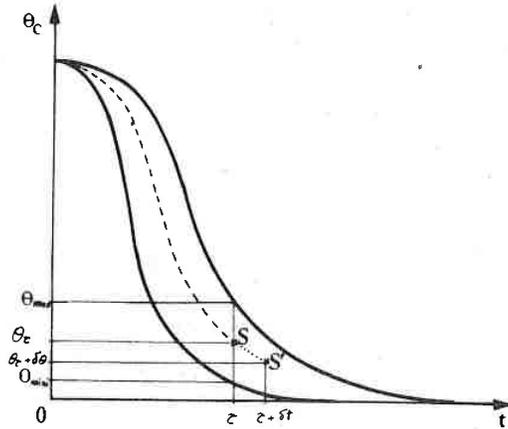


FIGURE 5

Représentation de l'évolution d'un refroidissement à l'intérieur du domaine autorisé.

Les courbes dérivées  $\dot{\theta} = \frac{\delta\theta}{\delta t}$  ont l'allure représentée sur la figure 6.

Nous agissons donc, en temps réel, sur la vitesse de refroidissement qui est directement liée au transfert de chaleur caractérisé par le flux échangé par unité de surface  $\phi/S$ .

De plus,  $\phi/S$  dépend de la pression du fluide porteur de l'agent refroidissant ainsi que de la température du métal à l'instant considéré.

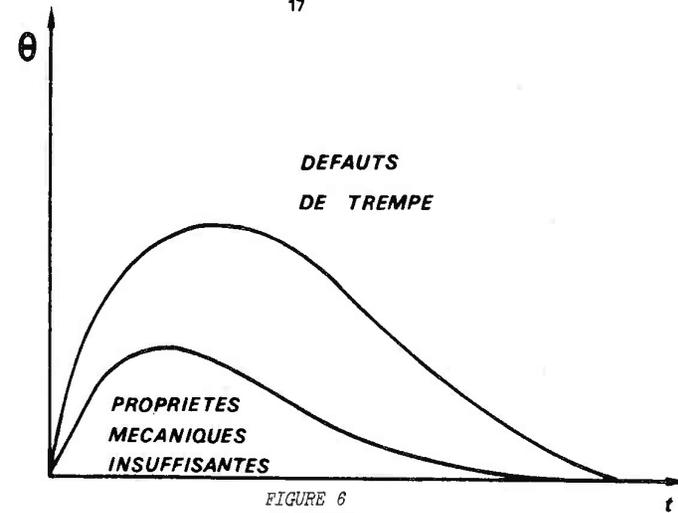


FIGURE 6

Allure des courbes de vitesse de refroidissement.

Nous devons donc étudier les différents paramètres thermiques.

## chapitre II

### Paramètres thermiques

A - COURBES DE REFROIDISSEMENT

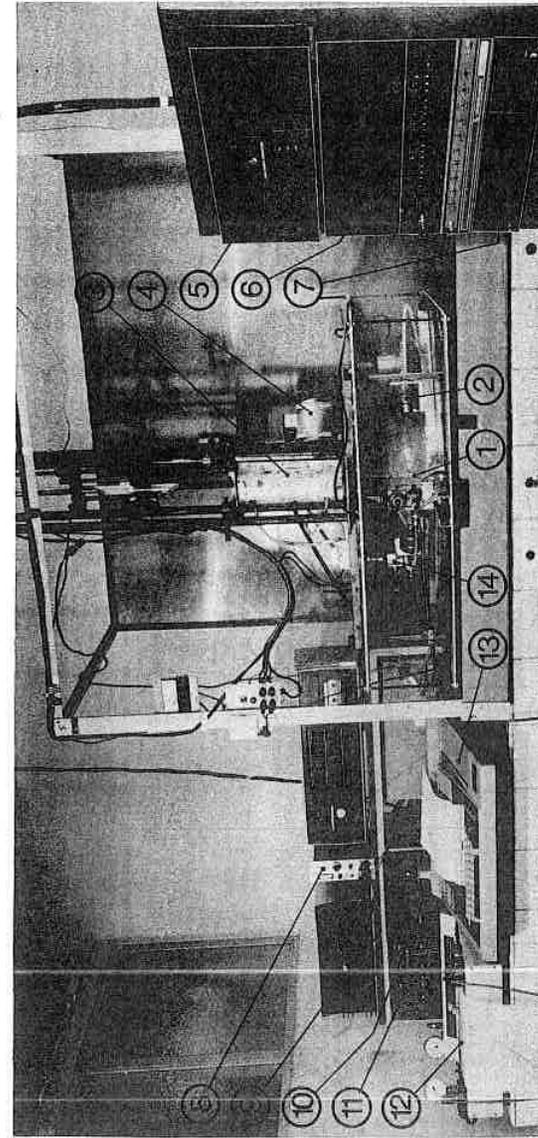
- 1 - Dispositif de trempe par pulvérisation
- 2 - Courbes de refroidissement

B - DETERMINATION DU FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE L'EPROUVETTE

- 1 - Equation de la chaleur ; cas général
- 2 - Expression en coordonnées cylindriques
- 3 - Conditions aux limites
- 4 - Organisation des calculs
- 5 - Résultats du calcul

C - EXPRESSION POLYNOMIALE DU FLUX EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE ET DE LA GRANDEUR DE COMMANDE.

- 1 - Etude de la zone correspondant au régime mouillant
- 2 - Etude de la zone correspondant au régime non mouillant
- 3 - Etude de la zone correspondant à la transition entre les régimes non mouillant-mouillant.
- 4 - Cas des refroidissements effectués à l'air seul.



- ① éprouvette ; ② pulvérisateur ; ③ four ; ④ moteur du chariot porte-échantillon ; ⑤ lecteur de ruban  
 ⑥ calculateur NOVA-8 ; ⑦ convertisseurs A/D - D/A ; ⑧ Amplificateur pour thermocouple ; ⑨ bloc de puissance  
 de la vanne d'air ; ⑩ Bloc d'alimentation du capteur infra-rouge ; ⑪ Système de contrôle de l'environnement ;  
 ⑫ enregistreur ; ⑬ console de service ; ⑭ électrovanne d'alimentation en eau ;

## II - PARAMETRES THERMIQUES

### A - COURBES DE REFROIDISSEMENT

#### 1 - Dispositif de trempe par pulvérisation

Nous avons utilisé le montage (représenté sur la photo) dont nous rappelons les caractéristiques principales :

##### a) - Four de trempe

L'éprouvette est fixée au bout d'une tige mobile dont le mouvement vertical est commandé par un moteur électrique : il est donc facile de passer rapidement de la zone de chauffe à la zone d'action des pulvérisateurs.

##### b) - Eprouvette de trempe

Eprouvette cylindrique en nickel (D = 16 mm ; H = 48 mm), ne présentant pas de transformations allotropiques dans le domaine des températures parcourues (900°C à 20°C).

##### c) - Liquide pulvérisé

Eau distillée prise à 20°C.

##### d) - Pulvérisateurs

Au nombre de 3, ils sont disposés dans le plan médian de l'éprouvette, répartis à 120 degrés et placés à 10 cm de la surface de l'éprouvette.

e) - Mesure de la température au centre de l'éprouvette

Le capteur de température est constitué par un couple thermoélectrique chromel-alumel, chemisé d'inconel de 1 mm de diamètre extérieur.

La prise de température s'effectue au centre de l'éprouvette.

2 - Courbes de refroidissement

a) - En régime diphasique (air + eau)

L'enregistrement de l'évolution de la température en fonction du temps a été effectué pour différentes valeurs de la pression d'alimentation en air des pulvérisateurs, correspondant à des valeurs bien définies de la tension de commande.

La figure 7 représente le réseau des courbes obtenues.

b) - Dans le cas du régime air seul

Nous avons effectué des essais de refroidissement sur le même système en coupant l'alimentation en eau des pulvérisateurs.

Nous obtenons les lois de refroidissement de la figure 8.

Ces refroidissements, sensiblement plus lents que ceux qu'on obtient avec un jet diphasique, permettent d'étendre la gamme des vitesses de refroidissement proposées pour ce système.

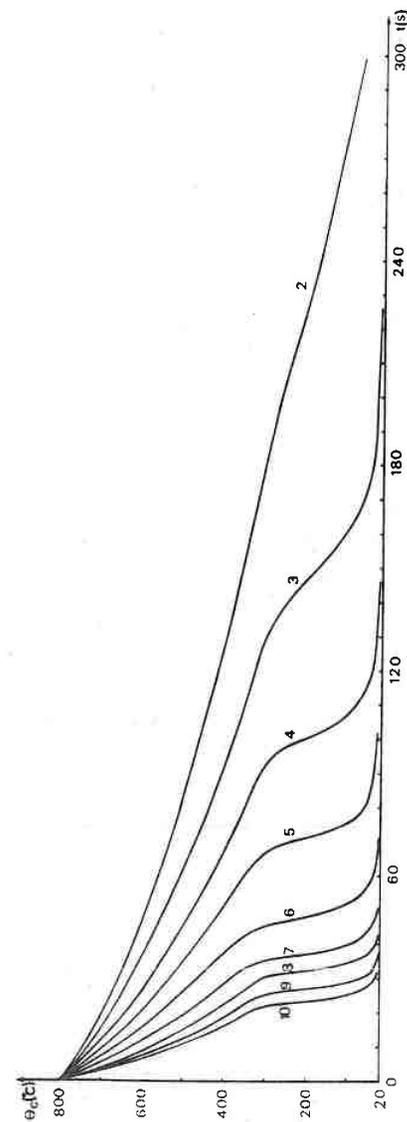


FIGURE 7

Réseau des courbes de refroidissement par pulvérisation d'eau obtenues pour différentes valeurs de la tension de commande exprimée en volts.

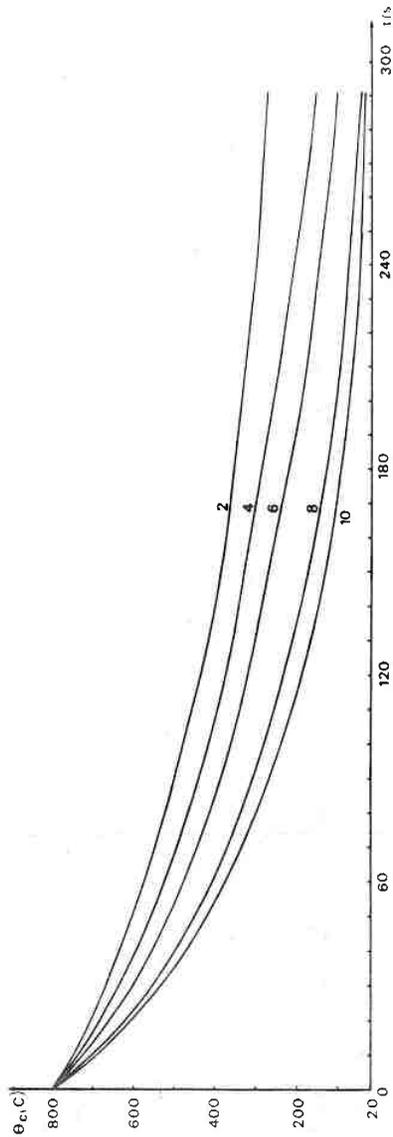


FIGURE 8  
Réseau des courbes de refroidissement en régime air seul obtenues pour différentes valeurs de la tension de commande exprimée en volts.

## B - DETERMINATION DU FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE L'EPROUVETTE

Nous avons utilisé une méthode numérique aux différences finies exprimée à l'aide d'un schéma explicite particulier (5).

### 1 - Equation de la chaleur ; cas général

La conduction de la chaleur au cours de la trempe est un phénomène variable dans le temps.

En considérant que le problème peut se ramener au cas de l'écoulement unidirectionnel, l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\lambda}{c\rho} = \begin{cases} \text{diffusivité} \\ \text{thermique du} \\ \text{solide} \end{cases}$$

et où  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ , représentent respectivement la conductivité thermique, la chaleur massique et la masse volumique du solide en cours de refroidissement.

En passant des accroissements infiniment petits aux accroissements finis en  $x$  et  $t$  (espace et temps) et en prenant les conventions suivantes :

$N$  = nombre d'intervalles d'espace  $\Delta x$  dans l'épaisseur de la pièce

$M$  = nombre d'intervalles de temps  $\Delta t$

$\theta_{(K,L)}$  = température au temps  $t_K = K\Delta t$ , au point d'abscisse  $X_L = L\Delta x$

Nous avons alors

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{K,L} = \frac{\theta_{(K+1,L)} - \theta_{(K,L)}}{\Delta t}$$

et

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right)_{K,L} = \frac{\theta_{(K,L+1)} - 2\theta_{(K,L)} + \theta_{(K,L-1)}}{\Delta x^2}$$

d'où la nouvelle expression de l'équation de la chaleur sous forme d'équation aux différences finies :

$$\theta_{(K+1,L)} - \theta_{(K,L)} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left[ \theta_{(K,L+1)} - 2\theta_{(K,L)} + \theta_{(K,L-1)} \right]$$

Afin d'assurer la convergence et la stabilité<sup>(15)</sup>, nous imposerons la condition suivante sur  $\Delta x$  et  $\Delta t$  :

$$\frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} = \frac{1}{2}$$

d'où

$$\theta_{(K+1,L)} = \frac{\theta_{(K,L+1)} + \theta_{(K,L-1)}}{2}$$

Cette expression montre que, connaissant les températures de 2 points d'indice  $(L+1, L-1)$  au temps  $K$ , nous pouvons calculer la valeur de la température du point d'indice  $L$  à l'instant suivant, de manière très directe.

## 2 - Expression en coordonnées cylindriques

L'équation de la chaleur s'écrit, en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

en prenant les conventions de la figure et en explicitant, il vient :

$$\frac{\theta_{(K,L-1)} - 2\theta_{(K,L)} + \theta_{(K,L+1)}}{\Delta r^2} + \frac{1}{2(L-1)\Delta r^2} \left[ \theta_{(K,L+1)} - \theta_{(K,L-1)} \right] = \frac{1}{\alpha \Delta t} \left[ \theta_{(K+1,L)} - \theta_{(K,L)} \right]$$

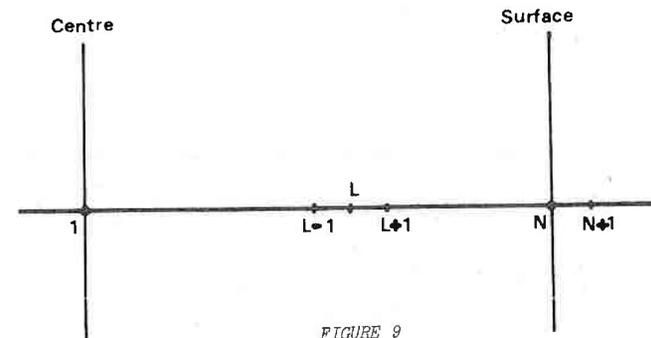


FIGURE 9

Répartition des pas d'espace utilisés dans le calcul.

et, en utilisant la condition de stabilité :

$$\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \cdot \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{1}{2}$$

il vient l'expression de la température au temps  $K + 1$ , en fonction de la température au temps  $K$  :

$$\theta_{(K+1,L)} = \frac{\theta_{(K,L-1)} \times \left[1 - \frac{1}{2(L-1)}\right] + \theta_{(K,L+1)} \times \left[1 + \frac{1}{2(L-1)}\right]}{2}$$

### 3 - Conditions aux limites

Du fait de la symétrie des répartitions de température dans l'éprouvette, nous avons au centre un gradient de température nul,

d'où

- au centre : pour  $L = 1$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad \text{soit} \quad \theta_{(K,0)} = \theta_{(K,2)}$$

et on élimine ainsi  $\theta_{(K,0)}$ , ce qui nous donne une expression particulière pour l'équation discrétisée au centre.

- en surface

comme le passage de la chaleur obéit à la loi de Newton, nous avons pour  $L = N$  :

$$\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_S = -h(\theta_S - \theta_L)$$

## 2 - Expression en coordonnées cylindriques

L'équation de la chaleur s'écrit, en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

en prenant les conventions de la figure et en explicitant, il vient :

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{(K,L-1)} - 2\theta_{(K,L)} + \theta_{(K,L+1)}}{\Delta r^2} + \frac{1}{2(L-1)\Delta r^2} [\theta_{(K,L+1)} - \theta_{(K,L-1)}] \\ = \frac{1}{\alpha \Delta t} [\theta_{(K+1,L)} - \theta_{(K,L)}] \end{aligned}$$

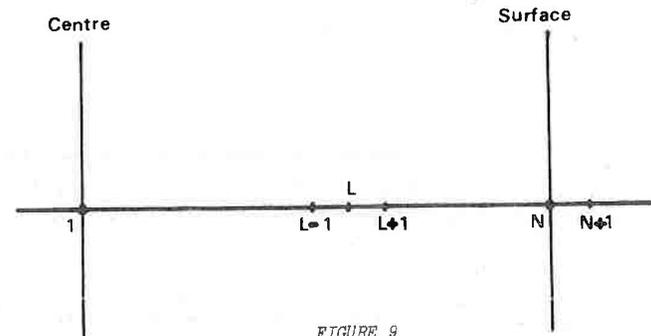


FIGURE 9

Répartition des pas d'espace utilisés dans le calcul.

et, en utilisant la condition de stabilité :

$$\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \cdot \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{1}{2}$$

il vient l'expression de la température au temps  $K + 1$ , en fonction de la température au temps  $K$  :

$$\theta_{(K+1,L)} = \frac{\theta_{(K,L-1)} \times \left[1 - \frac{1}{2(L-1)}\right] + \theta_{(K,L+1)} \times \left[1 + \frac{1}{2(L-1)}\right]}{2}$$

### 3 - Conditions aux limites

Du fait de la symétrie des répartitions de température dans l'éprouvette, nous avons au centre un gradient de température nul,

d'où

- au centre : pour  $L = 1$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad \text{soit} \quad \theta_{(K,0)} = \theta_{(K,2)}$$

et on élimine ainsi  $\theta_{(K,0)}$ , ce qui nous donne une expression particulière pour l'équation discrétisée au centre.

- en surface

comme le passage de la chaleur obéit à la loi de Newton, nous avons pour  $L = N$  :

$$\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_S = -h(\theta_S - \theta_L)$$

avec

$h$  = coefficient de transfert de chaleur

$\theta_S$  = température superficielle de l'éprouvette

$\theta_L$  = température du liquide

### 4 - Organisation des calculs

La méthode de calcul du profil de températures consiste à déterminer pas à pas les températures des différentes tranches, en allant du centre vers la surface de l'éprouvette.

Une fois connue la valeur de la température de surface, nous pouvons calculer le coefficient de transfert  $h$ , puis le flux  $\frac{\phi}{S}$ , ramené à l'unité de surface.

Un développement plus complet figure dans l'organigramme ci-après (figure 11).

### 5 - Résultats du calcul

Nous obtenons le réseau de courbes représenté sur la figure 10 qui rend compte des variations du flux de chaleur, en fonction de la température de surface de l'éprouvette, et cela pour différentes valeurs de la pression d'air injecté dans les pulvérisateurs.

### REMARQUE

Le caractère anguleux de ces courbes ainsi que les segments de droite représentant les différentes zones ne reflètent pas exactement une réalité physique, mais résultent d'une

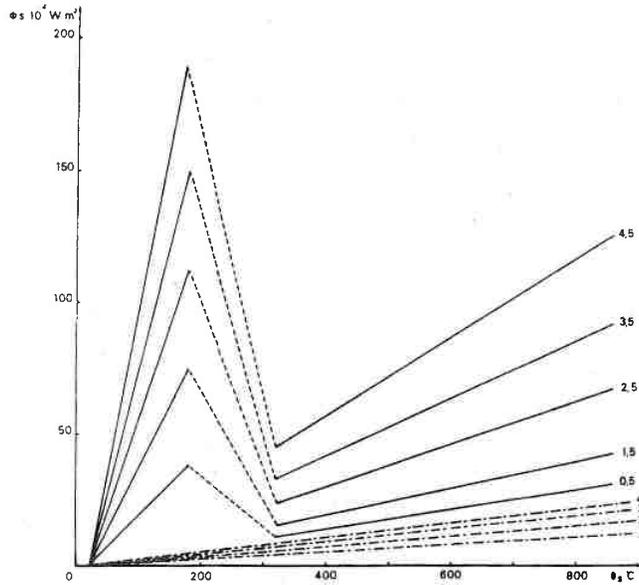


FIGURE 10

Variations de la densité de flux de chaleur, en fonction de l'évolution de la température de surface de l'éprouvette, pour différentes valeurs de la tension de commande exprimée en volts.

— régime air + eau  
 --- régime air seul.

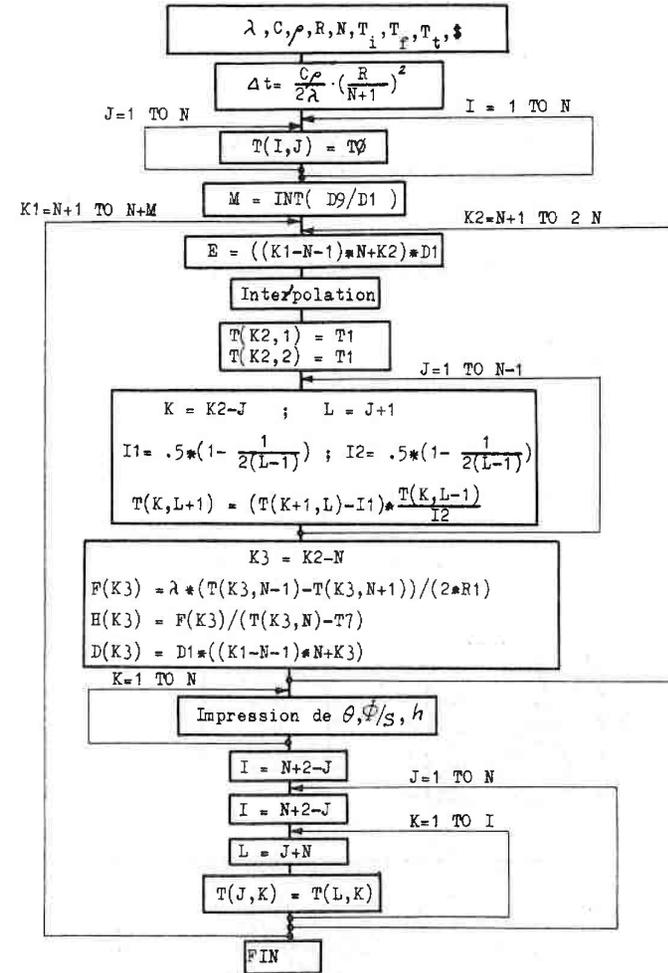


FIGURE 11

Organigramme du calcul de la température de surface de l'éprouvette, de la densité de flux de chaleur et du coefficient de transfert de chaleur.

$D9$  = Durée du refroidissement  
 $N9$  = Nombre de données  
 $D1$  =  $t$   
 $M$  = Nombre d'itérations  
 $R1$  =  $R$

avec  $\delta$  tel que

linéarisation préliminaire, indispensable pour l'étape suivante du traitement de ces données.

C - EXPRESSION POLYNOMIALE DU FLUX EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE  $\theta_S$  ET DE LA GRANDEUR DE COMMANDE p

Le réseau des courbes représentant la fonction

$$\frac{\phi}{S} = f(\theta_S) \cdot g(p)$$

exprime une des non-linéarités du système.

Nous avons donc un système du type suivant :

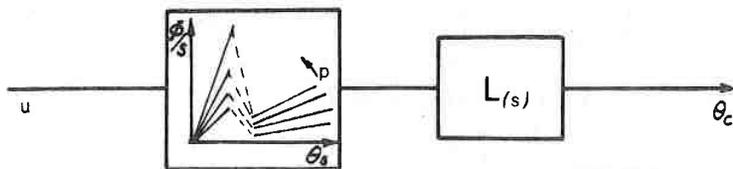


FIGURE 12

L'allure générale du réseau nous permet de reconnaître les différents régimes de transfert de chaleur, tels que :

- caléfaction (ou régime non mouillant) :  
800°C → 320°C
- transition : 320°C → 200°C
- ébullition nucléée (ou régime mouillant) :  
 $\theta_S < 200^\circ\text{C}$

Afin de pouvoir exploiter ces résultats, nous exprimons les valeurs du flux sous forme polynomiale dans chacune des zones définies ci-dessus.

1 - Etude de la zone correspondant au régime mouillant

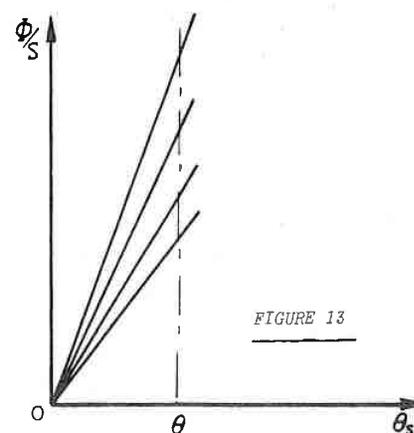


FIGURE 13

Les valeurs de  $\frac{\phi}{S}$  sont décrites par une fonction linéaire de  $\theta_S$ , pour une valeur fixée de la commande.

En nous plaçant à une température arbitraire  $\theta$ , déterminons les variations de  $\frac{\phi}{S}$  en fonction de  $p$ , la grandeur de commande, ici, la pression d'air injecté dans les pulvérisateurs.

Le flux de chaleur échangé entre l'éprouvette et le milieu refroidissant dépend de différents paramètres tels que le débit d'eau, la pression d'air injecté dans les pulvérisateurs, ou même, de la dénivellation bac à niveau constant-pulvérisateurs qui conditionne le diamètre moyen des gouttes d'eau dans le milieu diphasique<sup>(6)</sup>.

L'avancement des travaux de BIETH<sup>(6)</sup> ainsi qu'une simplification d'ordre technologique, nous ont permis d'utiliser

la pression d'air injecté dans les pulvérisateurs comme paramètre de référence pour exprimer les variations du flux en fonction de la grandeur de commande  $p$  pour une valeur donnée de la température de l'éprouvette.

Nous avons fait une approximation polynomiale de cette fonction à l'aide de la méthode des moindres carrés.

En posant  $p$  (pression d'air) comme grandeur de commande, il vient l'expression de la densité de flux de chaleur, en  $W/cm^2$ , de la forme :

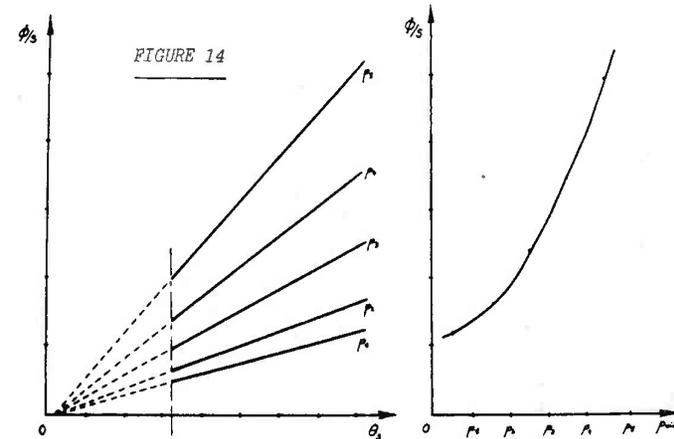
$$\frac{\phi}{S} = a + bp + cp^2 + \dots$$

Ce polynome représente l'évolution de  $\frac{\phi}{S}$ , pour différentes valeurs de  $p$ , à une température  $\theta$  fixée arbitrairement à  $180^\circ C$ . Les variations du flux étant linéaires dans chacun des domaines, nous obtenons l'expression de la valeur de la densité de flux de chaleur en fonction de la température  $\theta_S$  et de la pression d'air  $p$ , injectée dans les pulvérisateurs.

$$\frac{\phi}{S} = \left( \frac{\theta_S - 20}{180} \right) (37,5 p + 18)$$

## 2 - Etude de la zone correspondant au régime non mouillant ( $\theta_S \geq 320^\circ C$ )

Pour des températures supérieures à  $320^\circ C$ , les densités de flux de chaleur subissent les variations représentées ci-après :



Par le même procédé de calcul, nous avons déterminé l'expression du flux, en  $W/cm^2$ , de la forme :

$$\frac{\phi}{S} = f(\theta_S, p)$$

d'où, en fonction de la température et de la pression d'air, l'expression :

$$\frac{\phi}{S} = \left( \frac{\theta_S - 20}{100} \right) (3,29 + 0,717 p + 0,424 p^2)$$

## 3 - Etude de la zone correspondant à la transition entre les régimes mouillant et non-mouillant

Les variations de la densité de flux de chaleur qui apparaissent pendant le régime de transition sont mal connues.

Toutefois, dans une première approche et de façon à simplifier les algorithmes de commande, nous avons considéré de manière un peu arbitraire que la densité de flux de chaleur varie linéairement entre les états extrêmes correspondant aux régimes non-mouillant et mouillant.

Il apparaît sur la figure suivante que ce réseau de courbes a un point commun (H).

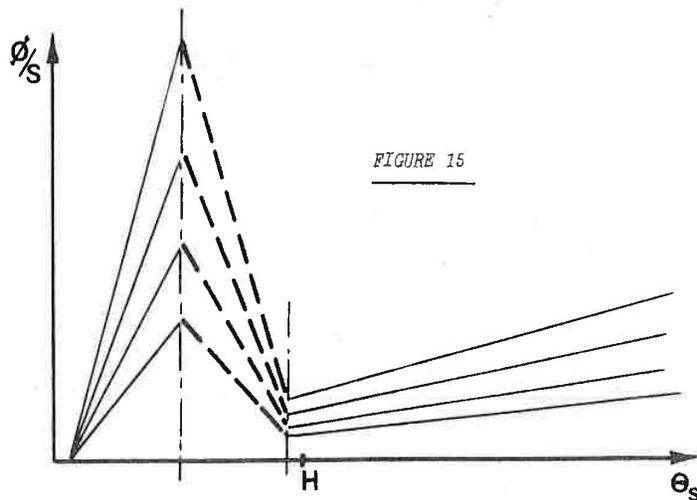


FIGURE 15

Nous obtenons donc l'expression du flux  $\frac{\phi}{S}$ , en fonction de la température  $\theta_s$  et de la pression d'air  $p$ , qui permet

d'écrire directement la fonction réciproque :

$$p = (0.02667 \varphi - 0.48) \cdot \left( \frac{360 - \theta_s}{180} \right)$$

#### REMARQUE

Les variations de densité de flux de chaleur ont des comportements numériquement différents selon le domaine de température considéré.

Il apparaît donc la nécessité de connaître à chaque instant la température du solide à refroidir, de façon à faire agir l'une ou l'autre fonction représentative du flux, à l'intérieur même de l'algorithme de commande du processus.

#### 4 - Cas des refroidissements effectués à l'aide d'air pulsé seul

L'aspect physique de ce type de refroidissement est bien connu. Pour déterminer les variations de la densité de flux de chaleur en fonction de la température de surface de l'éprouvette et cela pour différentes valeurs de la pression d'air injecté, nous avons utilisé le fait que le coefficient de transfert de chaleur  $h$  est constant (loi de Newton).

Nous obtenons le réseau de courbes représenté sur la figure ci-après.

Nous explicitons donc les variations de la densité de flux de chaleur :

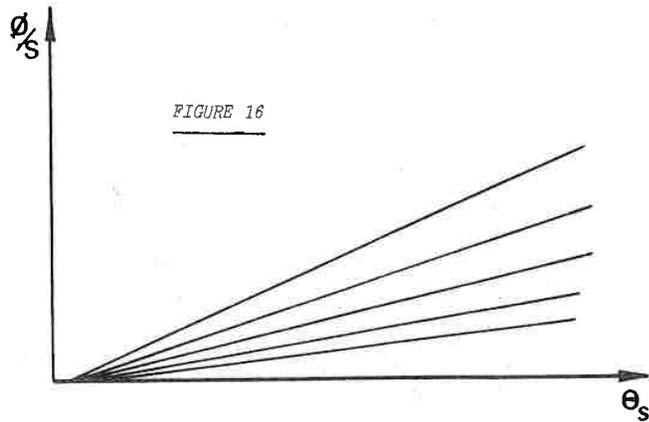


FIGURE 16

$$\frac{\phi}{S} = (\theta_s - 20) (57.55 + 84.4 p - 7.1 p^2) \cdot 10^{-4}$$

L'analyse du refroidissement d'un échantillon métallique par pulvérisation d'eau nous a permis de mettre en évidence les variations de la densité de flux de chaleur en fonction de la température de surface du métal et de la pression d'air injecté dans les pulvérisateurs.

Ceci nous conduit à la mise en oeuvre d'un système qui permet à la fois d'appréhender la thermocinétique du refroidissement de l'échantillon et d'agir sur le déroulement de son traitement thermique.

### chapitre III

## Etude du système

A - IMPLANTATIONB - PRESENTATION ET IDENTIFICATION DES  
DIFFERENTS ORGANES

- 1 - Pulvérisateurs
- 2 - Bac à niveau constant
- 3 - Vanne asservie en position
- 4 - Capteurs de température (thermocouple  
ou capteur infrarouge)
- 5 - Convertisseurs numériques-analogiques  
et analogiques-numériques
- 6 - Calculateur
- 7 - Périphériques d'entrée-sortie

C - TRAITEMENT DES INFORMATIONS

- 1 - Linéarisation de la température mesurée  
par un thermocouple
- 2 - Linéarisation de la température mesurée  
par le capteur infrarouge
- 3 - Acquisition de la courbe de référence
- 4 - Entrée des données sur téléimprimeur
- 5 - Test de l'environnement
- 6 - Test de la température initiale
- 7 - Vérification de la mise en place de  
l'éprouvette.

D - CONTRAINTES DE PILOTAGE

- 1 - Valeurs limites de la pression d'air
- 2 - Valeurs limites des vitesses de refroidissement  
et améliorations possibles
- 3 - Valeurs limites des accélérations du  
refroidissement
- 4 - Valeur optimale de la fréquence d'échantillonnage.

Le système de pulvérisation conçu et réalisé dans le cadre de cette étude, est formé d'un ensemble diversifié d'appareillages dont les lois de fonctionnement appartiennent à des domaines très variés de la physique. Nous n'avons pas fait ici d'études exhaustives en ce qui concerne les principes de physique mis en oeuvre, mais nous nous sommes attaché à déterminer quelles sont les conditions optimales de fonctionnement de chacun des organes, dans un environnement temps-réel.

Après une vue générale de l'installation que schématise le synoptique, nous étudions successivement chacun des sous-systèmes indispensables au bon fonctionnement de l'ensemble. Nous présentons ensuite les restrictions du processus décrites en l'occurrence par les contraintes de pilotage, puis nous mettons en évidence les traitements de l'information nécessaires à l'obtention d'un comportement fiable du système réalisé.

A - IMPLANTATION

Le système de refroidissement par pulvérisation d'eau peut se représenter schématiquement de la manière suivante :

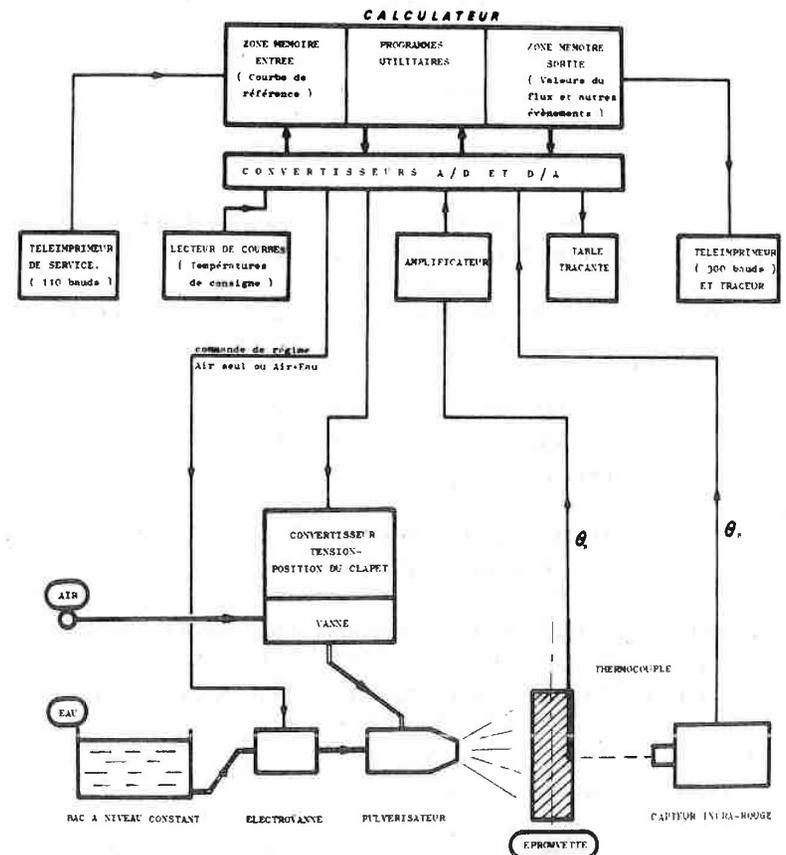


FIGURE 17

Nous disposons d'une éprouvette métallique à laquelle nous nous proposons de faire subir une loi de refroidissement imposée.

Quand l'échantillon arrive dans la zone de travail, sa température de surface est captée suivant l'option choisie :

- soit par un thermocouple dont le signal est amplifié puis transmis au calculateur par l'intermédiaire du convertisseur analogique-digital
- soit par le pyromètre infrarouge qui attaque directement le convertisseur.

L'information est traitée par un algorithme et une commande double est générée :

- une tension de pilotage de la vanne qui permet de moduler la pression d'air envoyée dans les pulvérisateurs.
- un signal qui autorise ou non l'alimentation en eau de ces pulvérisateurs.

L'opérateur n'a pas accès à ce système de commande, mais il dispose de divers périphériques afin d'imposer une loi de refroidissement et de contrôler la validité des résultats obtenus.

Ces organes de communication homme-machine sont :

- un téléimprimeur de service (vitesse 110 bauds)
- un lecteur de courbes pour l'acquisition de la consigne

- une table traçante destinée à visualiser la courbe de refroidissement effectivement subie par l'éprouvette.
- un téléimprimeur pour la sortie des résultats et le tracé des courbes de flux (vitesse : 300 bauds).

## B - PRESENTATION ET IDENTIFICATION DES DIFFERENTS ORGANES

### 1 - Pulvérisateurs

Nous utilisons 3 pulvérisateurs de type industriel dans lesquels l'atomisation du liquide se fait par centrifugation du jet d'air à l'intérieur de la buse.

Une électrovanne placée en tête de chaque pulvérisateur permet ou non son alimentation en eau, à partir d'une commande délivrée par le calculateur.

Le jet diphasique est en forme de cône plein de section ronde.

### 2 - Bac à niveau constant

D'après le principe même du fonctionnement des gicleurs, il est nécessaire de conserver un niveau de réserve d'eau constant de façon à obtenir des tailles de goutte constantes.

Nous avons fait des essais avec le bac placé à une dénivellation de 50 cm, (dénivellation préconisée par le constructeur) mais il s'est produit des aléas de fonctionnement.

En effet, si pour des raisons de pilotage, la pression doit prendre une valeur inférieure à 1,5 bar, il se produit un désamorçage et le jet n'a plus un comportement compatible avec la bonne marche du système.

Pour remédier à cet inconvénient, nous avons donc positionné le plan d'eau du bac et les pulvérisateurs au même niveau.

### 3 - Vanne motorisée asservie en position

#### a) - Vanne

Nous utilisons une vanne de type industriel à corps droit, dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- orifice : 10 mm
- clapet en forme de paraboloïde de révolution
- compensation des jeux de fonctionnement par ressort
- pertes de charges dans le corps de la vanne :  
une alimentation à une pression d'air de 6 bars permet d'obtenir 4,5 bars en sortie de la vanne.

#### b) - Asservissement en position du clapet de vanne

Les déplacements du clapet sont obtenus grâce à un système bielle-manivelle dont le mouvement est assuré par un moteur à courant continu à faible inertie, muni d'un réducteur de rapport important.

% de levée de course

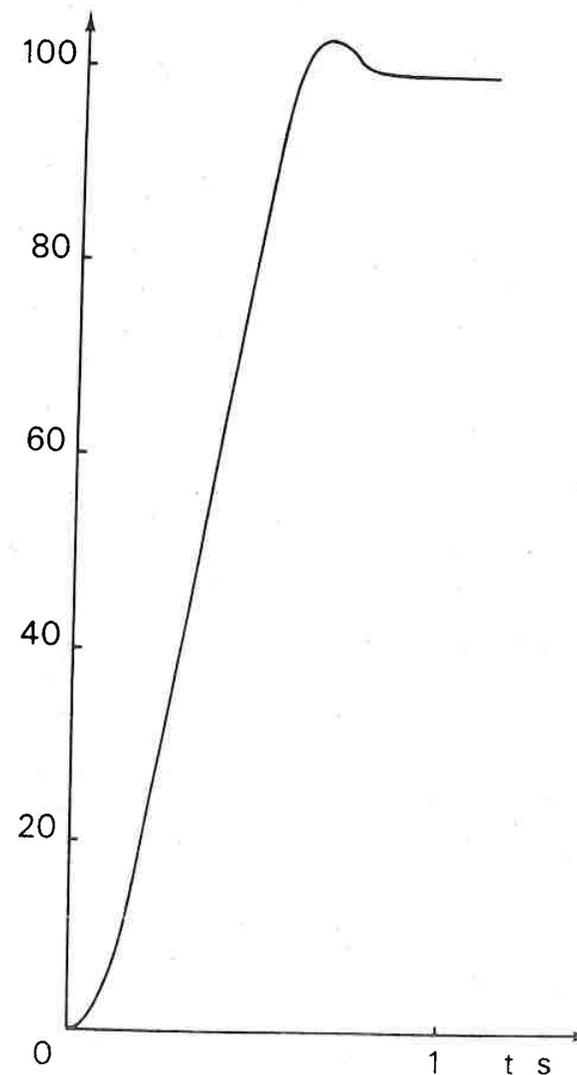


FIGURE 18

Réponse indicielle de la vanne asservie en position.

L'ensemble réalisé forme un module indépendant, asservi en position, de rapidité suffisante compte tenu des conditions d'utilisation. L'analyse indicielle donne un temps de réponse de 0,5 seconde, avec un dépassement de 5 %, pour un signal d'entrée de 10 volts d'amplitude (figure 18).

c) - Identification de l'ensemble convertisseur-vanne

Nous avons représenté sur la figure suivante (figure 19) la variation de la pression d'air en sortie de vanne en fonction de la tension de commande envoyée sur le convertisseur tension-position du clapet.

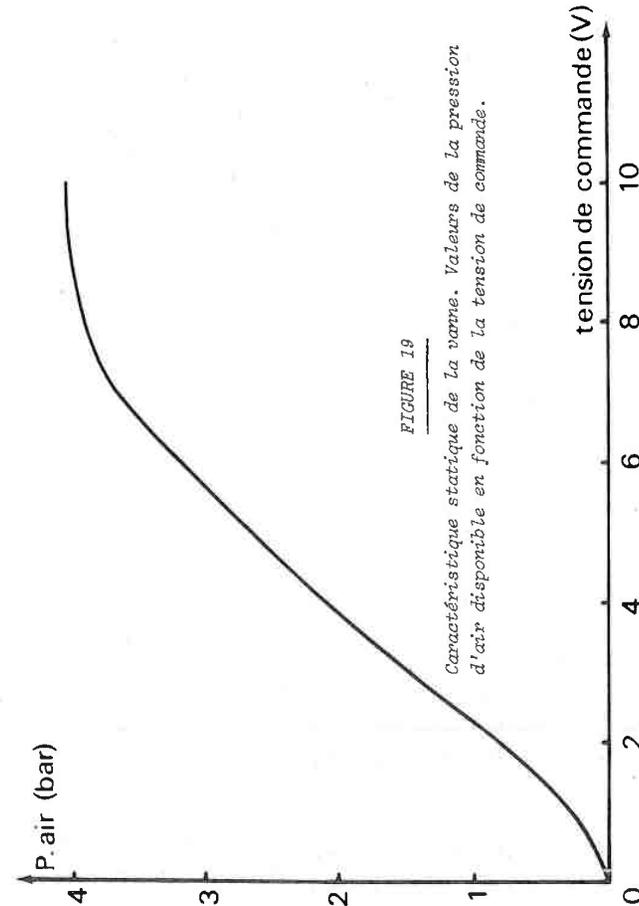
En fait, dans le déroulement de la commande, c'est la fonction inverse qui intervient puisqu'il est nécessaire de déterminer quelle sera la tension à appliquer pour obtenir la pression d'air nécessaire à un refroidissement donné.

Nous représentons donc, de façon analytique, sous forme d'un polynôme, la loi de variation de la tension de commande à appliquer en fonction de la pression d'air à obtenir en tête des pulvérisateurs.

En exprimant la pression d'air  $p$  en bars et la tension de commande  $U$  en volts, une approximation polynomiale par les moindres carrés permet d'écrire :

$$U = - 2,38 \times 10^{-2} + 4,59p - 4,179p^2 + 2,488p^3 - 0,664p^4 + 6,61 \times 10^{-2}p^5$$

Le polynôme ainsi obtenu décrit la caractéristique de la vanne avec une erreur absolue inférieure à 1 %, ce qui est satisfaisant dans le cadre de l'application envisagée.



#### 4 - Capteurs de température

Suivant le type d'expérience à réaliser, l'opérateur peut sélectionner le principe d'acquisition. Nous étudierons successivement l'acquisition effectuée par thermocouple, puis celle opérée suivant le principe d'analyse du rayonnement infrarouge émis par la surface de l'éprouvette.

En fonction du type de capteur sélectionné, seuls les algorithmes de linéarisation diffèrent. Nous les étudierons au cours d'une étape ultérieure, dans le paragraphe concernant le traitement des informations.

##### a) - Mesure de la température par thermocouple

Le couple thermoélectrique chromel-alumel utilisé délivre un signal de faible tension : environ  $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Ce capteur est logé dans un puits foré très près de la surface de l'échantillon, jusqu'à mi-hauteur de l'éprouvette.

De façon à travailler dans des gammes de sensibilités compatibles avec les convertisseurs (gamme de 0 à 10 volts), nous amplifions le signal de thermocouple à l'aide d'un amplificateur d'instrumentation à courant continu et à faible bande passante.

Ce type d'appareil offre de plus un parfait isolement entre les circuits d'entrée et de sortie (supérieur à  $1000 \text{ M}\Omega$ ), ainsi qu'un faible bruit, et un taux de rejection élevé (meilleur que 140 dB en continu pour une résistance de source inférieure à  $1000 \Omega$ ).

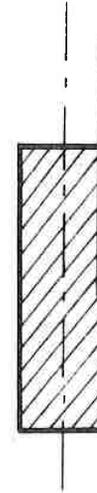


FIGURE 20

*Position du thermocouple dans l'éprouvette cylindrique de trempe.*

##### b) - Principe de la mesure par pyromètre infrarouge

Le principe de tout pyromètre à rayonnement thermique est de capter une partie du spectre de l'émission thermique d'un corps, de mesurer l'énergie reçue, et d'en déduire, par analyse, la température de ce corps<sup>(7)</sup>.

Nous présentons dans l'annexe n° 2 le schéma de principe du fonctionnement de l'appareil utilisé.

c) - Caractéristiques principales du pyromètre

- gamme de mesure : de 150 à 1000°C
- distance objectif-cible : 1000 mm
- temps de réponse : 0,01 seconde
- tension de sortie : 10 mV/°C

Les tensions fournies par ce capteur de température sont directement compatibles avec le convertisseur analogique-numérique.

5 - Convertisseurs analogiques-numériques et numériques-analogiques.

a) - Conversion analogique-numérique (entrées)

Le convertisseur analogique-numérique permet au programme de sélectionner un canal, de démarrer la conversion de la tension appliquée à l'entrée de ce canal et de lire la valeur du résultat converti en numérique.

Pour autoriser une telle procédure, cet interface contient un registre de 8 bits sélectionneur de canal et un buffer de 16 bits qui reçoit la valeur codée quand la conversion est effectuée.

Dans le cas d'une conversion réalisée sur un canal unique, le programme émet un ordre qui permet la sélection de la voie et le déclenchement de la conversion. Quand celle-ci s'achève, le convertisseur charge le résultat numérique dans le buffer des données et envoie une impulsion au calculateur. Ce message indique que la conversion est effectuée

et que le convertisseur est prêt à recevoir un autre ordre mais vérifie aussi que le calculateur n'est pas occupé à traiter une autre tâche. Le programme peut alors émettre un ordre de lecture afin de transférer les informations contenues dans le buffer vers un accumulateur de travail.

Les autres caractéristiques techniques de cet appareil sont :

- 32.000 conversions par seconde
- échelles de 0 à 10 volts
- 8 canaux à entrées différentielles
- 12 bits

Les lectures sont effectuées avec une résolution de 2 mV. Comme nos programmes font la conversion de 1°C pour 10 mV, nous obtenons des résolutions de l'ordre de 0,2°C sur les températures après linéarisation numérique, ce qui est largement suffisant.

b) - Conversion numérique-analogique (sorties)

Le procédé est très simplifié puisqu'il n'existe pas de contrôle. L'interface fonctionne grâce à deux instructions fournies par le programme ; une pour sélectionner le canal de sortie et l'autre pour fournir la donnée à convertir.

Chaque voie possède son propre buffer ; la conversion démarre dès que le contenu du buffer change et la valeur de la tension de sortie est maintenue constante jusqu'à ce qu'une nouvelle donnée soit transmise au convertisseur.

Autres caractéristiques techniques :

- mots de 12 bits
- échelles de 0 à 10 volts
- 2 canaux
- temps de réponse : 10 microsecondes

#### 6 - Calculateur

Le calculateur utilisé est un mini-calculateur à vocation temps-réel, NOVA 2/10 conçu et fabriqué par la

DATA GENERAL CORPORATION<sup>(8)</sup>

Le processeur central contrôle tout le système : il supervise les équipements périphériques, effectue toutes les opérations arithmétiques et logiques ainsi que le transfert des données et permet le déroulement en séquence du programme. Le processeur traite des mots de 16 bits qui sont stockés dans une mémoire de 16 Kmots. Chaque mot-mémoire peut, soit servir comme instruction dans le programme, soit être utilisé en tant qu'adresse, ou même faire fonction de donnée dans un programme.

Toute instruction est codée sur un mot de 16 bits. Le processeur exécute un programme en accomplissant les instructions dont l'adresse figure dans un compteur spécial (Program Counter). A la fin de chaque instruction, le contenu du compteur est incrémenté de 1, de telle sorte que la prochaine instruction à effectuer est immédiatement définie : c'est celle qui se trouve à l'adresse suivante. Le déroulement séquentiel du programme peut être modifié

en changeant le contenu du compteur, soit par le résultat d'une instruction de test, soit par une instruction de saut.

L'utilisateur dispose aussi de quatre registres internes de 16 bits, les accumulateurs qui permettent de transférer des informations entre l'instruction en cours d'exécution et la mémoire.

D'autres facilités sont offertes à l'utilisateur mais notre propos n'est pas d'en faire l'inventaire.

#### 7 - Périphériques d'entrée-sortie

##### a) - Téléimprimeur de service

- permet la communication homme-machine, notamment pour l'entrée des données et l'impression des messages de service (messages d'erreur, questions, indication des événements).

##### b) - Deuxième téléimprimeur

- fonctionne à la vitesse de 300 bauds et permet d'éditer les valeurs contenues dans une zone mémoire (en flottant) et de faire un tracé de la courbe après cadrage et mise à l'échelle.

##### c) - Lecteur de courbe

- cet instrument électro-mécanique fonctionne d'après le schéma ci-après (figure 21).

La ligne continue de la courbe programmée coupe la carte

programme en deux parties isolées électriquement. Il apparaît donc un potentiel électrostatique entre les deux flancs de la rayure que constitue la courbe tracée. Le palpeur se positionne par l'intermédiaire du

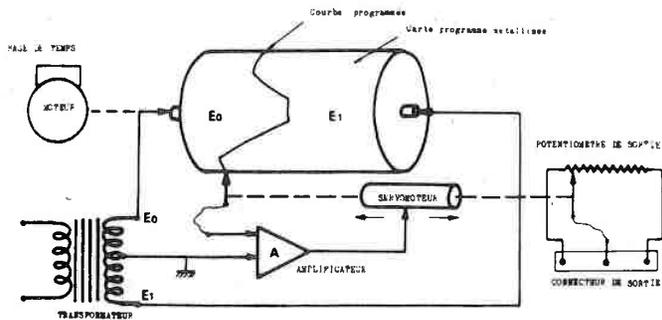


FIGURE 21

*Schéma de principe du lecteur de courbe.*

servo-moteur dans une position telle que la différence de potentiel soit nulle. Comme le servo-moteur entraîne aussi le curseur du potentiomètre de sortie, on peut avoir une représentation des positions du palpeur donc des variations de la courbe sous forme analogique.

#### Autres caractéristiques principales

- base de temps : ajustable de 1 tour par minute à 1 tour en 6 jours.

- précision du temps : 1 % du temps écoulé
- vitesse maximale de poursuite : 18 cm/seconde.
- bande morte : 0,01 % de la pleine échelle
- reproductibilité : 0,05 % de la pleine échelle

#### C - TRAITEMENT DES INFORMATIONS

##### 1 - Linéarisation de la température mesurée par un thermocouple

Le traitement s'opère dans un sous-programme qui effectue la conversion d'une tension comprise entre 0 et 8 volts, en température qui s'échelonne de 0 à 800°C, linéarisée en une fonction de la caractéristique du thermocouple Ni-Cr-Ni allié.

##### a) - Compensation de soudure froide

Quand l'opérateur fait une mesure selon la méthode conventionnelle :

- si la jonction de référence est à 0°C, alors la température en °C est lue directement dans la table suivant la valeur de la tension en mV obtenue aux bornes du thermocouple.
  - si la jonction de référence est à k°C, alors la température vraie est égale à la température correspondant à la valeur en mV équivalente à :  
(tension de  $\theta$  pour jonction à 0°C) + (tension de  $\theta$  à k°C)
- La compensation se fait donc en mV.  
Nous avons ici 800°C qui correspondent à 8000 mV.  
(en fait, 33,3 mV, multiplié par le coefficient

d'amplification de 240,24).

La compensation au même calibre s'obtient par :

(tension de jonction)  $\times$  (gain)

donc la tension délivrée par le thermocouple compensé vaut :

$(U_{\theta} \times \text{gain}) + (U_{\text{comp.}} \times \text{gain})$

La première partie de cette expression est générée par l'ensemble thermocouple-amplificateur alors que la deuxième partie est élaborée par le calculateur.

#### b) - Linéarisation de la caractéristique

La tension en mV, obtenue aux bornes du thermocouple ne croît pas linéairement avec la température.

Nous avons donc exprimé les variations de la température  $\theta$  en fonction de la tension  $V$  obtenue en mV, sous forme d'un polynôme déterminé par une approximation au sens des moindres carrés. Nous écrivons donc :

$$\theta = - 0,216 + 101,6 V + 1,07 V^2 - 0,38 V^3 + 2,77 V^4$$

Le polynôme ainsi obtenu décrit la non-linéarité avec une erreur absolue inférieure à  $0,2^{\circ}\text{C}$ , ce qui est satisfaisant dans le cadre de l'application envisagée.

#### REMARQUE

Le calcul de la valeur cherchée se traite au cours de la commande, par l'algorithme de HORNER, pour des raisons de rapidité.

## 2 - Linéarisation de la température mesurée par le capteur infrarouge

### a) - Mise en évidence de la non-linéarité

Les premières mesures de températures ont été effectuées sur une éprouvette de Ni 16  $\times$  48, refroidie suivant le phénomène de convection naturelle. Au lieu d'obtenir une courbe de refroidissement de type connu (vitesse de refroidissement sensiblement exponentielle), nous avons noté la présence d'une variation anormale de la température acquise aux abords de  $400^{\circ}\text{C}$  (figure 22).

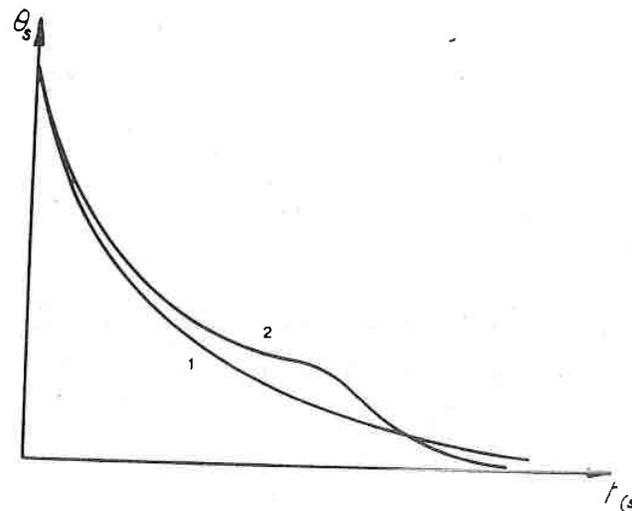


FIGURE 22

Acquisition de l'évolution de la température en fonction du temps, dans le cas d'une éprouvette de Ni 16  $\times$  48 refroidie en convection naturelle.

- 1 - Thermocouple proche de la surface.
- 2 - Capteur infra-rouge.

Le capteur utilisé autorise un réglage de l'émissivité de la surface émettrice (analogue à un gain variable) de façon à pouvoir effectuer des mesures sur des matériaux de différentes natures. Nous nous sommes assurés que cette non linéarité n'était pas due à une variation des propriétés émissives de l'oxyde de nickel en fonction de la température. Pour cela, nous avons effectué le même type d'expérience mais cette fois sur une éprouvette d'aluminium, métal, dont nous sommes certain qu'il ne présente pas de variation du pouvoir émissif en fonction de la température<sup>(9)</sup>.

Les résultats obtenus mettant en évidence la même non linéarité, il s'agit bien d'un phénomène inhérent au capteur.

#### b) - Analyse quantitative de la non linéarité

Nous avons supposé que les gradients de température sont faibles entre la surface et un point situé à 0,5 mm de la surface, pour un refroidissement en convection naturelle.

Au cours de ce refroidissement, nous avons fait varier le gain de façon à obtenir une concordance entre les deux enregistrements (capteur infrarouge et thermocouple) et nous avons enregistré les variations du gain  $\epsilon$  en fonction du temps (courbe *figure 23*).

En disposant d'autre part des courbes de refroidissement enregistrées simultanément, nous avons déterminé la loi de variation de l'émissivité  $\epsilon$  en fonction de la température

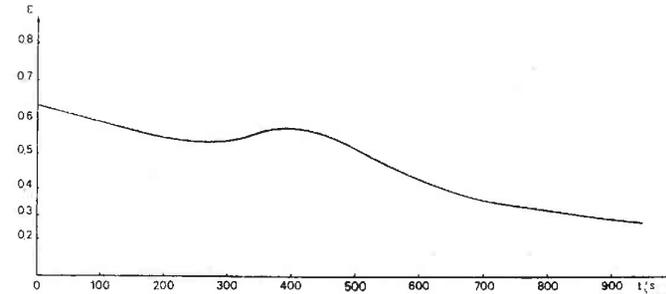


FIGURE 23

Variations de l'émissivité  $\epsilon$  en fonction du temps, pour une éprouvette de Ni 16 x 48 mm refroidie en convection naturelle.

représentée *figure 24*.

Ces résultats concordent, à la non linéarité près, avec ceux fournis dans les tables de l'USAF, par SULLY et BRANDES<sup>(9)</sup>.

Connaissant cette loi, nous pouvons effectuer en temps réel, au cours de l'acquisition, une conversion de la température lue, en température vraie.

#### c) - Algorithme de linéarisation

Nous avons adopté ici, une méthode de linéarisation par segments dont l'organigramme est représenté *figure 25*.

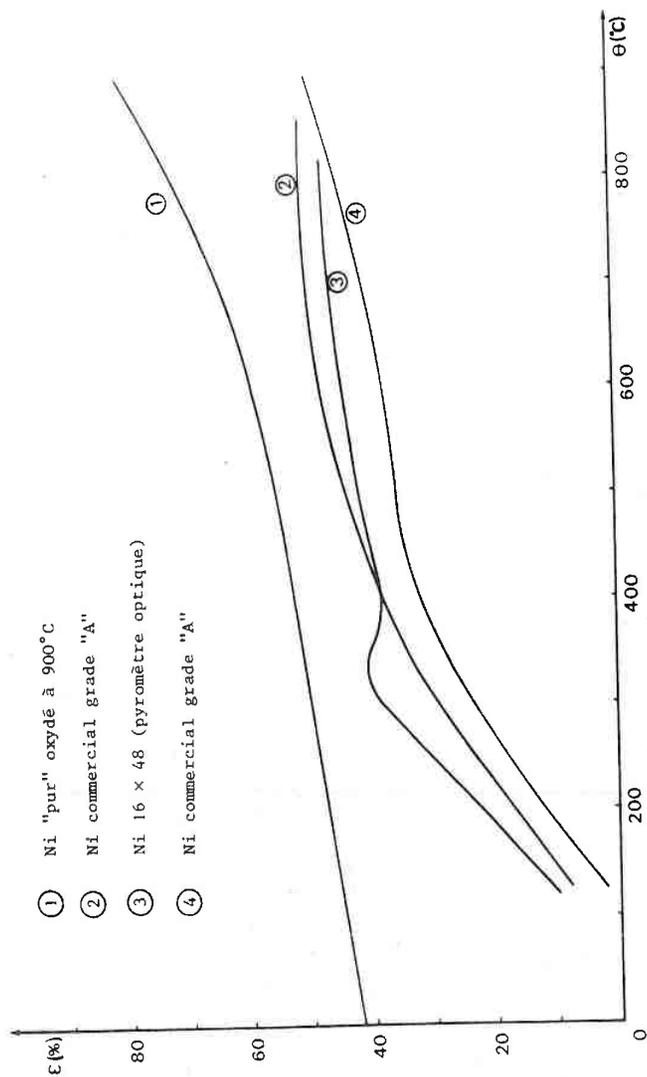


FIGURE 24  
 Lois de variations de l'émissivité  $\epsilon$  en fonction de la température.

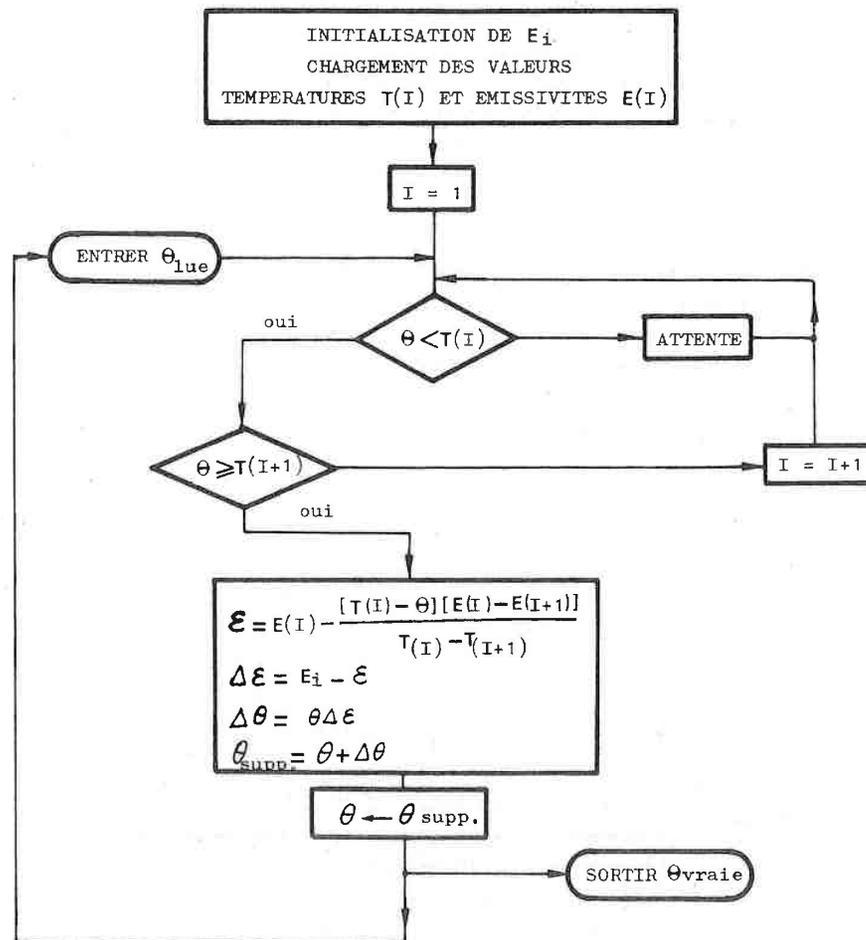


FIGURE 25

Organigramme de linéarisation des températures acquises à l'aide du capteur infra-rouge.

Une valeur de la température est acquise. Un jeu de tests sélectionne les bornes du segment à utiliser pour l'interpolation linéaire qui permet de calculer la valeur de l'émissivité  $\epsilon$  correspondant à la température acquise. L'écart entre la valeur de  $\epsilon_{\text{initial}}$  et la valeur de  $\epsilon_{\text{calculé}}$ , correspond au gain à appliquer à la température acquise pour obtenir la température vraie que nous utilisons pour le reste des calculs.

Cette méthode offre une précision d'environ 0,3 % sur les valeurs des émissivités qui entraîne une précision absolue de  $\pm 2^\circ\text{C}$  sur les températures.

### 3 - Acquisition de la courbe de référence

Les valeurs des températures de consigne sont entrées en mémoire au cours d'une étape préliminaire. Le calculateur se met en boucle d'attente et demande la mise en route du lecteur de courbes.

Un test est fait sur les valeurs acquises et la mise en mémoire ne démarre que quand la valeur du signal émis par le lecteur correspond bien à la valeur de la température de départ, entrée auparavant sur le téléimprimeur. Quand toutes les valeurs sont acquises, un programme de lissage permet d'éliminer les ondulations parasites dues notamment à l'asservissement en position du lecteur de courbe. Ce programme utilise une méthode de lissage sur 5 valeurs avec résultat en fin de panneau<sup>(10)</sup>.

Au moment de l'initialisation, la valeur de la température de départ chargée au cours de l'étape précédente dans une table de cinq valeurs, permet de lancer le calcul.

Les valeurs ainsi obtenues constituent la table des températures de consigne qui serviront au cours de la commande.

### 4 - Entrée des données sur téléimprimeur

Il est souvent intéressant de faire l'acquisition de lois de refroidissements simples sans avoir à lancer le lecteur de courbes. Le programme d'acquisition sur téléimprimeur permet de charger en mémoire les valeurs d'une courbe en entrant seulement quelques points caractéristiques et le pas d'interpolation.

### 5 - Test de l'environnement

Un sous-programme de test est incorporé au programme d'interruption. Il permet de détecter un défaut d'alimentation en air ou en eau des pulvérisateurs ainsi qu'un défaut d'alimentation secteur avec impression du message d'erreur correspondant et demande de réinitialisation du système temps-réel.

### 6 - Test de la température initiale

Ce sous-programme a une vocation multiple :

- soit annuler l'expérience en cours dans le cas où l'éprouvette arrive en zone de traitement avec une température trop faible.
- soit suspendre l'expérience dans le cas où l'éprouvette est trop chaude, mais dans une limite fixée préalablement. Si la température est trop élevée, l'expérience est annulée.

- soit valider la mise en route de la commande.

Un message est émis sur le téléimprimeur de service pour rendre compte du cas traité.

La nécessité d'un tel test de la température de départ s'impose car le but premier de cet appareillage est de réaliser des traitements thermiques. Dans certains cas, la tolérance portant sur la température initiale peut être très faible (par exemple  $467^{\circ}\text{C}$   $\begin{matrix} +2 \\ -1 \end{matrix}$  dans le cas de certains alliages légers).

#### 7 - Vérification de la mise en place de l'éprouvette

Quand le système est chargé et les données entrées en mémoire, le calculateur est prêt pour la commande.

Le programme effectue une boucle d'attente sur un test de la température captée par le pyromètre infrarouge. L'éprouvette est alors en position de chauffe dans le four. Une commande manuelle permet de l'amener en position dans la zone de traitement, grâce à une translation verticale obtenue par un moteur. Au moment où l'échantillon arrive dans la zone scrutée par le capteur de rayonnement, la validation du test de température permet l'activation de la tâche de gestion du programme de commande.

#### D - CONTRAINTES DE PILOTAGE

Comme dans tout processus, nous sommes limité ici par des contraintes liées à la nature même des phénomènes physiques mis en oeuvre. Nous avons à considérer les valeurs de la pression, les vitesses de refroidissement, et

puisque nous travaillons en temps réel, nous devons tenir compte des temps de calcul des programmes utilisés ainsi que du volume d'information à stocker en mémoire.

#### 1 - Valeur limite de la pression d'air

La pression d'alimentation en air a été fixée à 6 bars, compte tenu de l'installation dont nous disposons.

Du fait des pertes de charge en ligne et du gain statique de la vanne, nous pouvons disposer d'une pression maximum de 4,5 bars en tête de chaque pulvérisateur. Ce paramètre fixe donc une limite maximum à la vitesse de refroidissement de l'échantillon.

#### 2 - Valeurs limites des vitesses de refroidissement et améliorations possibles

La notion de vitesse de refroidissement est liée à la nature et aux caractéristiques dimensionnelles de l'échantillon traité.

Il serait plus correct de parler des densités de flux de chaleur extraites au cours du refroidissement. Toutefois, pour une éprouvette donnée, la représentation des variations de la vitesse de refroidissement en fonction de la température offre une vision plus claire de l'évolution du phénomène (*figure 26*).

Des vitesses de refroidissement plus importantes sont obtenues en changeant la nature du liquide pulvérisé, notamment par adjonction de sels dissous dans l'eau projetée sur la pièce<sup>(11)</sup>. Il est évident que pour accroître la dynamique du système vers les hautes vitesses de refroidissement, il faudrait prévoir par exemple un deuxième

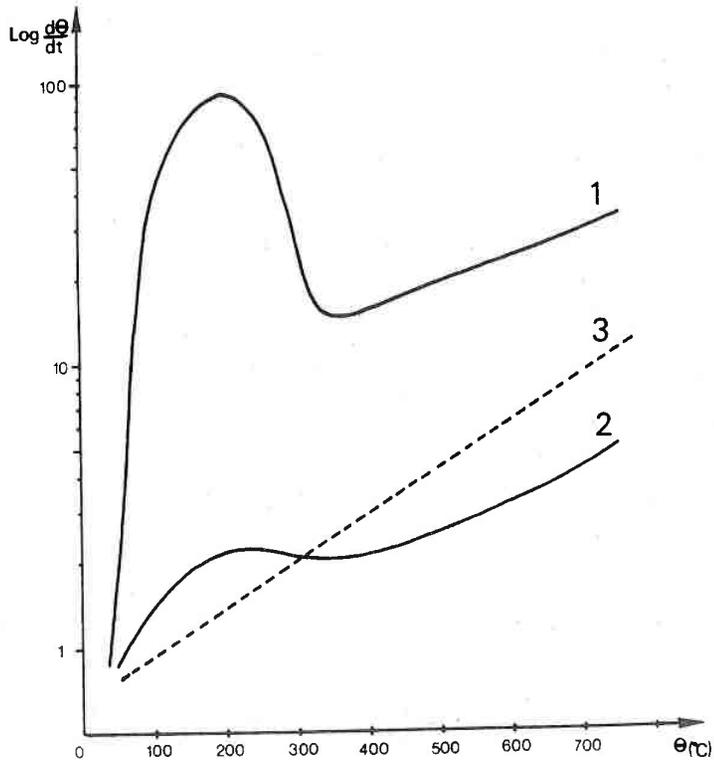


FIGURE 26

Evolution des vitesses de refroidissement en fonction de la température, dans les cas limites :

- 1 - régime Air + Eau (pression d'air maxi.)
- 2 - régime Air + Eau (pression d'air mini)
- 3 - Régime Air seul (pression d'air maxi.).

jeu de pulvérisateurs alimentés par de l'eau contenant des sels dissous. La commande d'un tel système ne pose pas de problèmes majeurs mais sort du cadre de cette étude.

Dans le domaine des faibles vitesses, la limite minimum est fixée par le régime de refroidissement en convection naturelle quand la commande est nulle. Il est possible toutefois de réaliser des traitements isothermes et même des réchauffages grâce à un système de buses projetant sur l'éprouvette de l'air pulsé à haute température. Une telle extension a été prévue dans l'algorithme de commande.

Dans l'état actuel du système, nous obtenons, pour une éprouvette de Ni 16 x 48, les lois limites de refroidissement représentées sur la figure 27.

Le fait de pouvoir passer à volonté, au cours même du traitement, d'un mode de refroidissement à un autre, augmente considérablement la dynamique du système.

Toutefois, il convient d'effectuer cette transition au moment opportun pour éviter les chocs thermiques trop importants et il s'agit aussi de définir une stratégie de commutation afin de ne pas voir osciller le système d'un régime à l'autre au cours du passage des zones frontalières. Nous traiterons en détail cet aspect du problème dans le chapitre consacré à l'étude des algorithmes de commande.

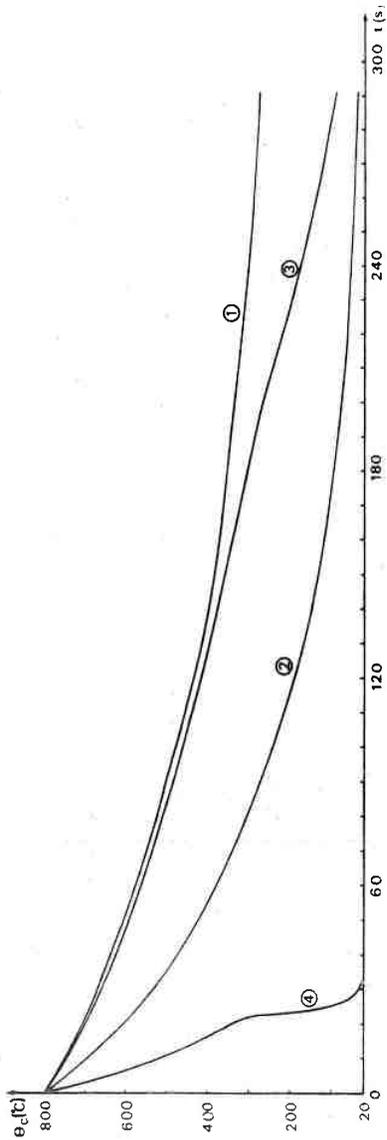


FIGURE 27

Lois de refroidissement d'une éprouvette de Ni. 16 x 48, dans les cas limites :

- 1 - régime Air seul (pression d'air mini)
- 2 - régime Air seul (pression d'air maxi)
- 3 - régime Air + Eau (pression d'air mini)
- 4 - régime Air + Eau (pression d'air maxi).

### 3 - Valeurs limites des accélérations du refroidissement

L'utilité des refroidissements de type accéléré n'est plus à démontrer mais il importe toutefois que les variations de vitesse ne soient pas trop brutales afin d'éviter l'apparition de défauts de trempe dus aux chocs thermiques que subit le métal traité.

Ces accélérations limites dépendent du temps de réponse de la vanne, de la vitesse d'établissement du régime diphasique et des phénomènes de conduction à l'intérieur de l'éprouvette.

### 4 - Valeur optimale de la fréquence d'échantillonnage

Cette valeur résulte d'une analyse des trois paramètres suivants :

- temps de réponse du système
- temps de calcul de la commande
- taille mémoire disponible.

#### a) - Temps de réponse du système

Le système peut se diviser en trois parties principales :

- un servo-mécanisme constitué de la vanne motorisée dont le temps de réponse est connu.
- un ensemble fluïdique composé des réseaux d'alimentation en air et en eau ainsi que des pulvérisateurs et des jets diphasiques.
- un ensemble thermique comprenant essentiellement le jet diphasique et l'éprouvette métallique.

Une étude séparée des deux derniers sous-systèmes étant impossible, il convient de les regrouper. Nous obtenons donc, dans le cas où le capteur de température est un thermocouple placé près de la surface de l'échantillon, le schéma de représentation suivant :

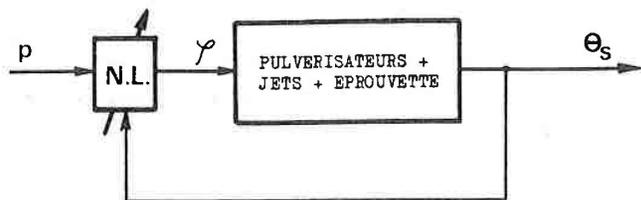


FIGURE 28

*Schéma de représentation du système.*

Nous n'avons pas représenté les perturbations telles que les pertes de chaleur par conduction à l'intérieur de la tige support puisqu'elles sont négligeables devant les flux extraits au cours de la pulvérisation.

Il n'aurait pas été raisonnable de chiffrer de façon précise le temps de réponse de l'ensemble car la rapidité du système dépend essentiellement de la densité de flux de chaleur extraite, elle-même fonction de la température et de la taille de l'éprouvette.

Cette rapidité du système fixe un ordre de grandeur de la fréquence d'échantillonnage. En effet, si la période d'échantillonnage est faible devant le temps de réponse moyen du système, il n'y aura pas lieu d'envoyer de fortes valeurs de la commande et on évitera ainsi d'arriver rapidement à une saturation.

#### b) - Temps de calcul de la commande

Dans le cas où le sous-programme d'interruption ne compte pas de boucles de calcul, il est aisé de déterminer sa durée, puisque nous connaissons avec précision le temps d'exécution de chaque instruction assembleur de base.

Du fait que le programme d'interruption compte environ 3000 instructions avec des appels à d'autres sous-programmes bouclés, nous avons dû utiliser une autre méthode d'évaluation du temps de calcul.

En début du sous-programme d'interruption, nous commandons à une des sorties analogiques de changer de niveau et sa remise à zéro s'effectue en fin de cycle. L'observation se fait sur un oscilloscope à mémoire synchronisé par les impulsions de l'horloge. Le calcul de la commande dure approximativement 12 millisecondes.

#### c) - Taille mémoire disponible

Chaque traitement thermique peut durer jusqu'à 180 ou même 200 secondes, pour une éprouvette de nickel de 16 mm de diamètre. Des fréquences d'échantillonnage trop rapides entraîneraient un stockage d'information dans des zones mémoires de tailles prohibitives. La réduction de ces zones peut être envisagée par l'acquisition des valeurs de consigne les plus caractéristiques puis par le calcul en temps réel des valeurs intermédiaires. Une contradiction apparaît entre les deux situations suivantes :

- le fait de stocker moins de valeurs pour décrire un phénomène de même durée permet d'augmenter la fréquence d'échantillonnage.

- le calcul des valeurs intermédiaires au cours de la commande augmente le temps de déroulement du sous-programme d'interruption et impose donc de diminuer la fréquence d'échantillonnage.

Nous avons opté pour une solution intermédiaire qui consiste à stocker toutes les valeurs, non sous forme de valeurs codées en flottant, mais après codage en binaire. Le volume mémoire ainsi occupé est deux fois moindre et nous conservons une résolution suffisante dans le cadre de l'application envisagée (environ 0,4°C).

#### d) - Conclusion

Le temps de calcul de la commande et le volume de la zone occupée par les valeurs de consigne fixent une limite maximum à la fréquence d'échantillonnage.

Le temps de réponse moyen du système fixe une valeur minimum de la fréquence d'échantillonnage.

Nous avons donc choisi une fréquence comprise entre ces deux limites, fixée à 10 Hz, pour des raisons de commodité de mise au point et d'exploitation du système.

---

L'étude du comportement des différents appareillages utilisés nous a permis de définir les limites du système ainsi constitué.

La connaissance des réactions de ces matériels permet d'en tenir compte lors de l'élaboration des algorithmes de commande que nous étudions dans le chapitre suivant.

## chapitre IV

### Etude des algorithmes de commande

A - PRESENTATION DU SYSTEME TEMPS-REEL

- 1 - Organisation et configuration de la mémoire
- 2 - Organisation du déroulement d'un programme temps-réel.
- 3 - Etats des tâches
- 4 - Contrôle d'exécution des tâches

B - DEROULEMENT D'UNE TREMPE CONTROLEE

- 1 - Opérations préliminaires
- 2 - Activation du système et initialisations
- 3 - Algorithmes de commande
  - a) - Organigramme de l'élaboration de la commande
  - b) - Schéma de la boucle de commande
  - c) - Compensation de la pression
  - d) - Stratégie du changement du régime de refroidissement
- 4 - Traitement des informations au cours de la commande

C - ORGANISATION DE LA ZONE MEMOIRE ET GESTION DES INTERRUPTIONS

- 1 - Configuration générale de la mémoire
- 2 - Gestion des interruptions
- 3 - Organisation des tâches

D - CONCLUSIONA - PRESENTATION DU SYSTEME TEMPS-REEL

Un système temps-réel est un ensemble matériel-logiciel qui permet l'acquisition des informations provenant d'un processus à piloter et le calcul des commandes à envoyer au système, de façon suffisamment rapide, afin de pouvoir agir à tout instant sur l'environnement à contrôler.

Le "Real Time Operating System" (RTOS), fourni par la DATA GENERAL CORPORATION<sup>(12)</sup> est un programme moniteur, résident en mémoire, destiné à contrôler une grande variété d'environnements temps-réel.

L'utilisation de RTOS libère les programmes utilitaires des détails de synchronisation des entrées-sorties, de l'acquisition des données, d'appels prioritaires et d'attente de tâches.

1 - Organisation et configuration de la mémoire

Le programme résident RTOS occupe trois zones mémoire :

- Les  $(20)_8$  adresses mémoire les plus basses sont utilisées comme zone de communication, à la fois pour les interruptions et pour les tâches qui ont besoin d'accéder aux deux autres zones.
- La deuxième zone fournit les informations décrivant le programme entier, comme par exemple son adresse de départ, sa taille et l'adresse de départ de la file des tâches.

- La troisième zone contient uniquement les tâches et les contrôleurs des périphériques qui sont nécessaires au déroulement du programme utilitaire.

## 2 - Organisation du déroulement d'un programme temps-réel

Le programme utilisateur a la possibilité de communiquer avec le système RTOS par deux types d'appels :

### a) - Appels système

demandent à RTOS d'exécuter des opérations d'entrée-sortie ou de définition des programmes d'interruption de service.

### b) - Appels tâche

permettent d'assurer les fonctions de gestion des tâches. Le système est organisé suivant le modèle ci-après :

## 3 - Etats des tâches

Les tâches peuvent prendre quatre états possibles.

### - Etat d'"exécution"

La tâche se déroule sous le contrôle de l'unité centrale.

### - Etat "prêt"

La tâche est prête à être exécutée mais ne peut obtenir le contrôle de l'unité centrale tant que toutes les autres tâches plus prioritaires à l'état "prêt" ou d'"exécution" ne soient terminées, ou passées à l'état "suspendu".

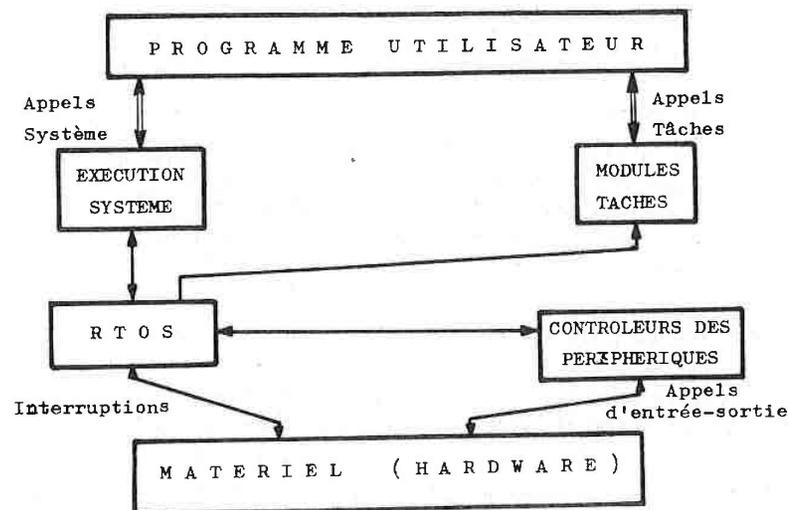


FIGURE 29

Organisation de la liaison programme-matériel.

### - Etat "suspendu"

La tâche attend l'apparition ou la fin d'un appel système ou d'une autre opération temps-réel.

### - Etat "dormant"

La tâche n'a pas été initialisée (inconnue du système), ou bien son exécution est terminée et elle est maintenant désactivée.

#### 4 - Contrôle d'exécution des tâches

Quand un programme RTOS est initialisé, il donne le contrôle à une tâche simple utilisateur qui passe de l'état "dormant" à l'état "exécution". Celle-ci doit initialiser les autres tâches (qui se retrouvent donc à l'état "prêt"), pour mettre en place l'environnement multi-tâche.

Pour garantir que la tâche à l'état "prêt" la plus prioritaire est toujours la tâche à l'état d'"exécution", l'appel tâche oblige la tâche qui vient d'être appelée à passer de l'état d'"exécution" à l'état "prêt". Toutes les tâches à l'état "prêt" attendent leur tour dans une file d'attente organisée de manière hiérarchique, par priorité. Le programme gérant de tâche prend la première tâche dans la file et la fait passer à l'état d'"exécution".

Quand toutes les tâches sont terminées, soit individuellement, soit par groupes de base, le système tout entier est placé en état d'inhibition, arrêtant donc toute activité.

#### B - DEROULEMENT D'UNE TREMPE CONTROLEE

Le contrôle de la trempe proprement dit nécessite quelques opérations préliminaires indispensables à l'obtention d'un fonctionnement satisfaisant.

##### 1 - Opérations préliminaires

L'analyse métallurgique et thermique du métal permet de déterminer quelle est la loi de refroidissement optimale

à faire subir à un point de l'échantillon pour obtenir par exemple des propriétés d'emploi du matériau, fixées à l'avance.

Cela permet d'obtenir une loi de variation de la température en fonction du temps (courbe de refroidissement en surface). Cette analyse préliminaire est effectuée par l'utilisateur du système.

L'opération suivante consiste à charger ces données en mémoire, dans une zone réservée. Chaque valeur tabulée représente donc, à un instant donné d'échantillonnage, la température de référence en surface qui intervient directement dans la commande du processus.

##### 2 - Activation du système et initialisation

Quand l'acquisition est terminée, il est nécessaire de rentrer en mémoire les données suivantes concernant le traitement :

- les caractéristiques thermiques de l'éprouvette c'est-à-dire la valeur du coefficient  $\frac{mC}{S}$  qui intervient dans le calcul du flux.
- la valeur maximale de l'écart admissible sur la température initiale du traitement thermique.

Le contrôle retourne ensuite au calculateur qui boucle sur le premier sous-programme d'interruption (INTER 1), agencé selon l'organigramme représenté *figure 30*.

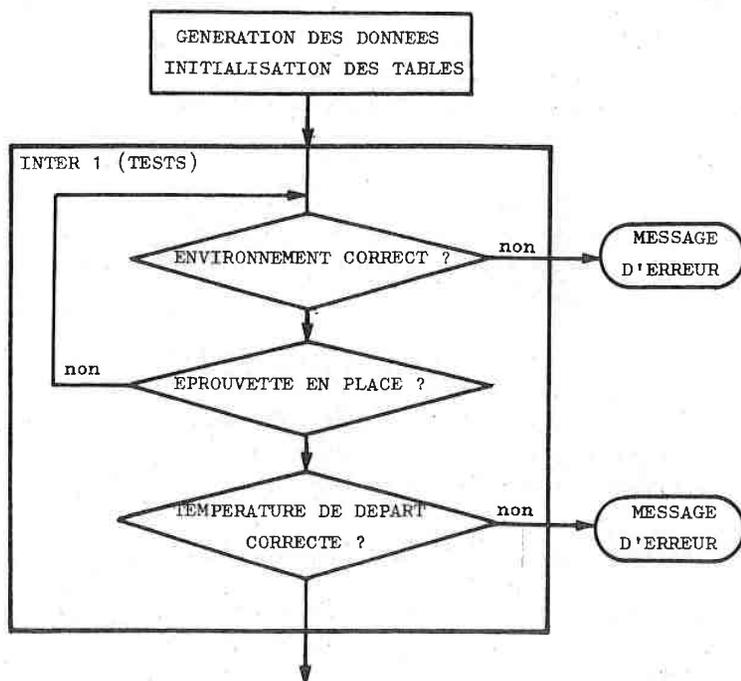


FIGURE 30

Organigramme du sous-programme INTER 1

A chaque impulsion d'horloge, le sous-programme d'interruption INTER 1 est appelé par l'unité centrale, avec une période d'échantillonnage de 0,2 seconde. Une série d'acquisitions et de tests permet de contrôler la pression d'air, la tension d'alimentation de l'installation et l'alimentation de la réserve d'eau. Quand l'éprouvette arrive dans la zone de travail, et si la température est comprise dans les limites fixées au cours de l'étape précédente, le contrôle est redonné à l'unité centrale qui

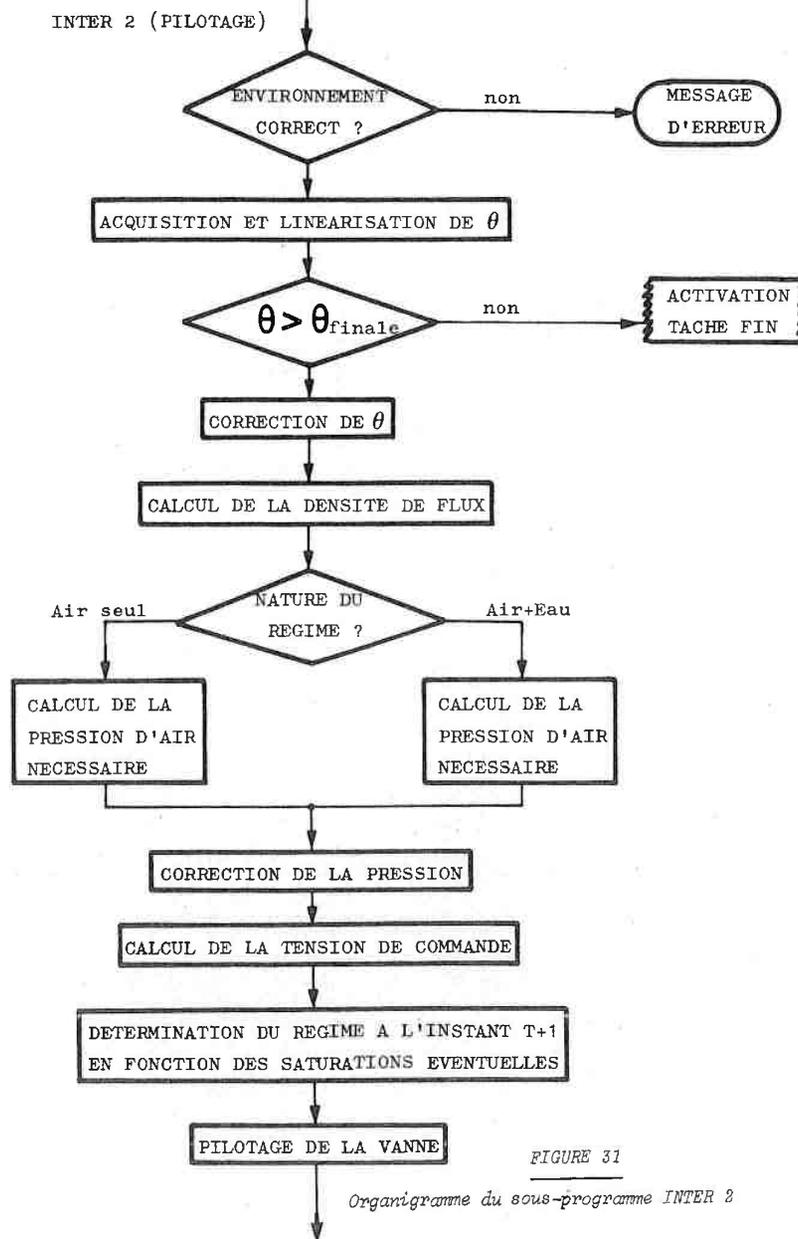


FIGURE 31

Organigramme du sous-programme INTER 2

active la tâche de priorité la plus élevée. Le pilotage de la trempe peut commencer.

### 3 - Algorithmes de commande

Une suite de sous-programmes de traitement des données et de calcul de la commande est incluse dans le sous-programme d'interruption INTER 2 qui est relancé à chaque itération avec une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz.

#### a) - Organigramme du sous-programme d'interruption d'élaboration de la commande

L'organisation des acquisitions et des calculs est réalisée selon le schéma représenté *figure 31*.

Le sous-programme d'interruption teste à chaque pas d'horloge, si l'environnement est correct, et, une fois cette tâche réalisée, une valeur de la température de surface est acquise, puis linéarisée suivant le principe décrit précédemment (Chapitre III). Cette valeur de la température est comparée à la température de fin de traitement afin d'arrêter le contrôle en temps utile. L'étape suivante permet le calcul de la densité de flux de chaleur à extraire, compte tenu de l'écart entre la température mesurée et la consigne à cet instant. La présence de saturation de la commande à l'instant précédent permet le choix entre les deux modèles, le premier décrivant le comportement du système refroidi par de l'air seul, l'autre rendant compte des réactions du système refroidi par un jet diphasique d'air et d'eau. La valeur de la pression à appliquer ainsi obtenue, permet de calculer la valeur de la tension de commande à appliquer au système. Cette tension est envoyée à l'entrée

du bloc de commande de la vanne, après détection des saturations éventuelles qui auraient pour effet une commutation à l'instant suivant.

#### b) - Schéma de la boucle de commande

L'organigramme précédent correspond au schéma classique de régulation suivant :

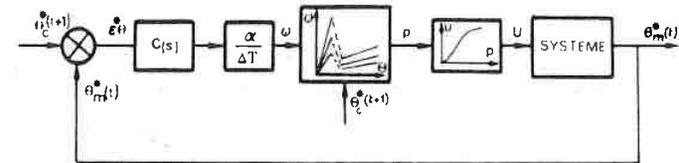


FIGURE 32

Schéma de régulation.

où

$$\alpha = \frac{mC}{S}$$

$\phi$  = densité de flux de chaleur

$p$  = pression d'air

$U$  = tension de commande

L'écart de température entre la consigne et la mesure permet à chaque instant de calculer la valeur de la densité de flux de chaleur qu'il faut extraire. En effet, toutes les valeurs de  $\theta_c^*$  sont connues, quel que soit  $t$ ,

puisque nous avons ici la loi de variation de la consigne définie en mémoire.

A l'instant  $t$ , la vitesse de refroidissement s'exprime :

$$\frac{\partial \theta S}{\partial t} = \frac{\theta_c^*(t) - \theta_c^*(t+1)}{\Delta T}$$

Connaissant  $\frac{\partial \theta S}{\partial t}$ , il est possible de calculer  $\frac{\phi}{S} = \varphi$ , densité de flux de chaleur à extraire pour obtenir la vitesse de refroidissement désirée, et cela par deux méthodes.

La première méthode, exposée dans le chapitre II B, nécessite des temps de calcul prohibitifs compte tenu de la fréquence d'échantillonnage adoptée.

Nous pouvons aussi obtenir une valeur de la densité de flux de chaleur par la résolution d'une équation calorimétrique fondée sur les équations en régime permanent de transfert thermique, qui, moyennant quelques hypothèses, est acceptable en première approche<sup>(13)</sup>.

Soit à chaque instant, en surface :

$$\varphi = \frac{mC}{S} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

avec  
 $m$  = masse de l'éprouvette  
 $C$  = chaleur massique de l'éprouvette  
 $S$  = surface de l'éprouvette

Les deux méthodes donnent des résultats comparables. Nous utilisons donc l'équation calorimétrique qui est plus facile à mettre en oeuvre.

Donc, connaissant  $\varphi$  et  $\theta$ , nous déterminons la valeur de la pression d'air à appliquer au système.

Compte tenu de cette pression, et à partir de la caractéristique de la vanne, nous calculons le pourcentage de levée de course du clapet. Une relation simple permet ensuite de calculer la valeur de la tension  $U$  de commande à appliquer.

Le système réagit à l'action de la commande, et en sortie, nous mesurons  $\theta_m^*$ .

#### c) - Compensation de la pression

Nous pouvons de plus considérer que, pendant un temps très bref, la densité de flux de chaleur a des variations très faibles.

Nous n'avons pas représenté sur le schéma la boucle interne de compensation de la pression d'air qui fonctionne selon le principe suivant.

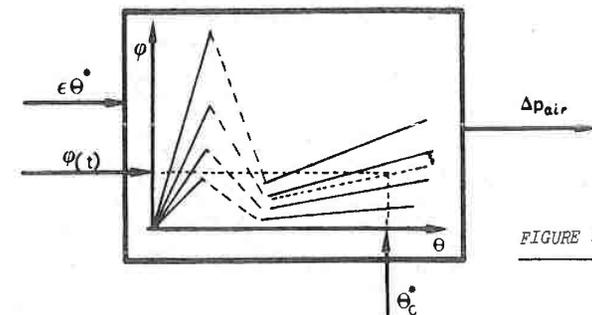


FIGURE 33

Quand  $\theta_m^* = \theta_c^*$ , il n'y a pas d'action sur la commande. Par contre, dans le cas où  $\theta_m^*$  est supérieur à  $\theta_c^*$ , c'est-à-dire quand l'éprouvette est trop chaude, il y a lieu d'augmenter la valeur de la pression d'air. La connaissance du modèle stocké en mémoire permet de déterminer la valeur de la correction à apporter.

d) - Stratégie de changement du régime de refroidissement

La tension de commande peut prendre une valeur comprise entre 0 et 10 volts. D'autre part, les pulvérisateurs sont alimentés en eau ou non. La combinaison de ces deux paramètres permet de suivre une loi donnée. Toutefois, il convient de passer du régime air-seul, au régime air + eau à bon escient puisque, dans une certaine plage de vitesses, le même refroidissement est obtenu indifféremment par les deux modes de travail.

Nous avons imposé le passage du régime air-seul au régime diphasique quand la tension de commande arrive à la valeur  $U_{\max(\text{air})}$ .

De plus, une temporisation de la commande des électrovannes vient retarder d'un temps  $\tau_1$  l'arrivée de l'eau, de façon à tenir compte du temps de réponse à la fermeture de la vanne d'arrivée d'air, et on évite ainsi d'alimenter en eau quand la vanne est encore ouverte, d'où un fonctionnement plus souple du système.

Dans le cas où l'échantillon est refroidi par un jet diphasique, si le flux à extraire diminue de façon telle que la commande générée soit égale à  $U_{\min(\text{eau})}$ , le changement de mode de travail s'effectue après une temporisation

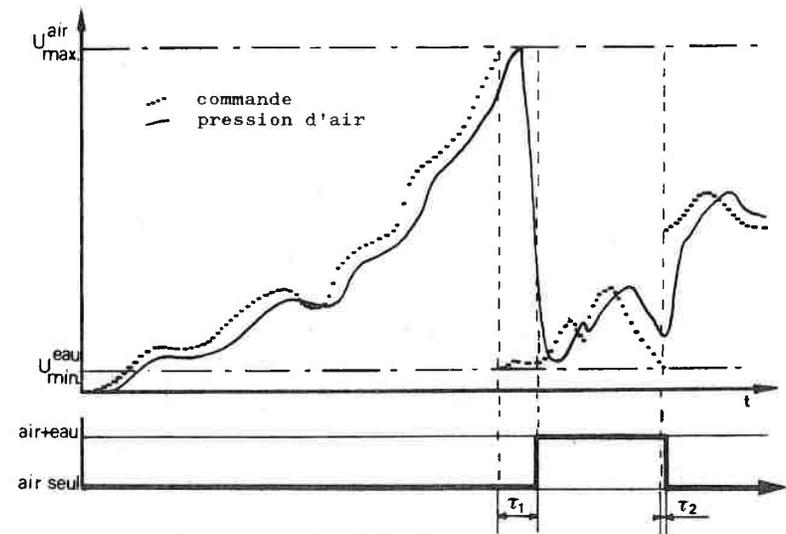


FIGURE 34

Représentation schématique de l'évolution des paramètres de la commande, au moment du changement de régime.

$\tau_2$ . La valeur de ce retard est moins critique puisqu'il ne risque pas d'apparaître de chocs thermiques dus à une projection d'eau sur la pièce. En pratique,  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont de l'ordre de quelques dixièmes de seconde.

4 - Traitement des informations au cours de la commande

Le sous-programme d'acquisition permet de stocker dans un mot mémoire l'équivalent codé sur un mot de 12 bits, de la tension correspondant à la température lue.

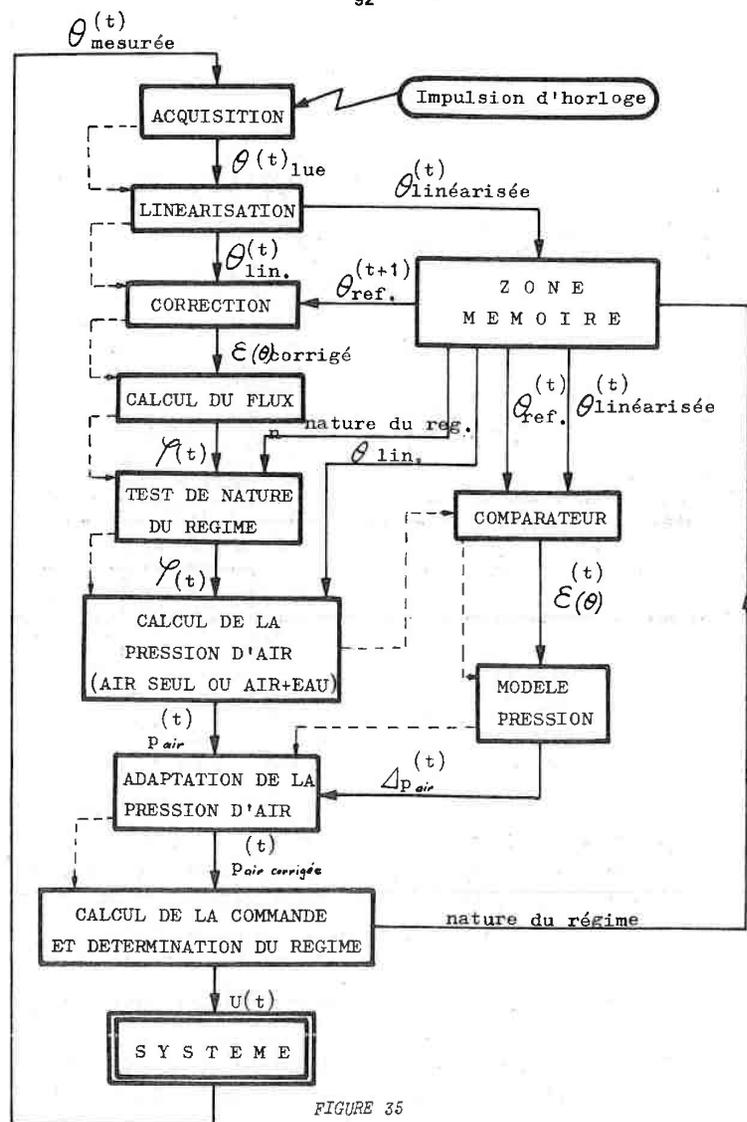


FIGURE 35

Diagramme du traitement des informations et des déclenchements des tâches au cours de la commande.

- ← Transfert d'information  
 ←--- Ordre de déclenchement des tâches.

Les autres sous-programmes permettent de stocker en mémoire des valeurs calculées ou d'accéder aux données de référence selon le diagramme de la figure 35.

### C - ORGANISATION DE LA ZONE MEMOIRE ET GESTION DES INTERRUPTIONS

#### 1 - Configuration générale de la mémoire

Les  $(400)_8$  premiers mots sont réservés à la gestion du système (page zéro).

Le module de pilotage du système temps-réel occupe les  $(600)_8$  mots suivants.

L'ensemble des sous-programmes nécessaires à la commande s'étend ensuite jusqu'à l'adresse  $(22400)_8$  et le reste du volume mémoire est occupé par la table des températures de référence ainsi que par les sous-programmes de gestion des périphériques, l'interpréteur point-flottant et le programme résident RTOS.

Nous avons alors une configuration minimum compte tenu de la place mémoire de 16 Kmots disponible. Tous les programmes étant conçus de façon modulaire et réentrants, il est possible, dans le cadre de certaines applications particulières, de configurer un système comportant des options différentes, grâce à la bibliothèque de sous-programmes que nous avons créée (\*).

(\*) en collaboration avec Michel DUFAUT (E.N.S.E.M.)

## 2 - Gestion des interruptions

Le comportement du programme de pilotage évolue en fonction des informations fournies par l'installation de pulvérisation et par les réactions de l'échantillon métallique à traiter.

Les interruptions les plus prioritaires sont d'une part, celles issues du module de protection contre les défauts de tension secteur avec sauvegarde du contenu des accumulateurs de travail, et d'autre part les impulsions de l'horloge temps-réel qui permettent un déroulement cadencé de la commande.

Les autres interruptions concernent les autres tests portant sur la validité des conditions initiales du traitement thermique ainsi que sur les tests d'environnement et la nature du régime de refroidissement et sont, de ce fait, moins prioritaires.

## 3 - Organisation des tâches

Le programme de pilotage se décompose en un programme principal qui travaille sous système RTOS et en un ensemble de sous-programmes. Le contrôle est donné au programme principal qui prélève et utilise, suivant l'opportunité du moment, le sous-programme concerné.

Le programme principal se compose uniquement d'instructions d'appel de sous-programmes et d'ordres système nécessaires à un fonctionnement correct dans un environnement temps-réel, groupés en 5 tâches principales.

### a) - Tâche\_DEPART

Elle assure la remise à zéro des zones de travail et des commandes ainsi que la déclaration des périphériques utilisés. Cette tâche permet ensuite de sélectionner le mode d'entrée de la courbe de référence :

- soit entrée sur console puis interpolation des valeurs intermédiaires
- soit entrée par acquisition des valeurs fournies par le lecteur de courbe et lissage de ces valeurs.

Une fois les caractéristiques du traitement thermique entrées en mémoire, l'horloge temps-réel est activée et le premier sous-programme d'interruption est lancé : le calculateur est prêt pour la commande. Celle-ci sera lancée quand l'éprouvette arrivera dans la zone de travail.

Si une erreur est détectée au cours de cette étape, un message système vient valider la tâche ERREUR.

### b) - Tâche\_ERREUR

Ce sous-programme inhibe l'horloge temps-réel puis permet l'édition sur la console de service du message d'erreur approprié, et enfin active la tâche RETOUR.

### c) - Tâche\_RETOUR

Elle avertit l'opérateur de la fin du cycle et de la nécessité de relancer le système pour un traitement thermique suivant.

d) - Tâche PILOTAGE

Elle est activée par un ordre système émis quand l'éprouvette arrive en zone de traitement. L'horloge temps-réel est activée à la fréquence de 10 Hz, et le sous-programme d'interruption INTER 2, de pilotage proprement dit, entre en action. Si une erreur est détectée, la tâche ERREUR est activée. De plus, quand la température de l'échantillon atteint la température ambiante, la tâche FINAL est activée.

e) - Tâche FINAL

Cette tâche est activée quand la température finale du traitement thermique a été atteinte sans qu'aucun aléa de fonctionnement ne soit intervenu.

L'horloge temps-réel est arrêtée et l'opérateur peut reprendre le contrôle sur la console de service afin de ressortir certaines tables de valeurs calculées au cours de la commande, comme par exemple, les flux de chaleur extraits au cours du traitement thermique.

La tâche RETOUR est ensuite activée pour permettre l'exécution d'un autre cycle.

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre le système temps-réel qui permet au programme de pilotage d'assurer un contrôle effectif des événements survenant au cours d'une trempe pilotée en temps-réel.

Nous avons ensuite exposé le principe de fonctionnement des algorithmes de commande du processus ainsi que leur organisation dans l'espace au niveau de l'occupation de la zone mémoire et dans le temps au niveau de la gestion des interruptions et de l'organisation des tâches.

Dans le chapitre suivant nous analysons les résultats fournis par une série d'essais effectués qui ont permis :

- de mettre en évidence la nécessité d'une correction efficace,
- de chiffrer l'influence de chacune des actions des correcteurs utilisés et de vérifier le comportement du système en présence de perturbations.

chapitre V

Essais et résultats

A - NECESSITE D'UNE CORRECTION

- 1 - Modèle simplifié du système
- 2 - Comportement du système non corrigé
- 3 - Etude de l'évolution des paramètres de commande en l'absence de correcteurs.

B - INFLUENCE DES CORRECTEURS

- 1 - Influence sur les ondulations de la température
- 2 - Importance de l'erreur de traînage
- 3 - Influence de la temporisation au moment du changement de régime
- 4 - Etude de l'évolution des paramètres de commande dans le cas d'une correction

C - COMPORTEMENT DU SYSTEME EN PRESENCE DE PERTURBATIONS

- 1 - Perturbations dues au jet déphasique
- 2 - Perturbations liées à la nature du métal traité

D - ETUDE DU REFROIDISSEMENT DE DIFFERENTS TYPES D'ECHANTILLONSE - COMPARAISON DES RESULTATS A CEUX OBTENUS AVEC UN SYSTEME ANALOGIQUE

- 1 - Présentation du système analogique de contrôle
- 2 - Etude du refroidissement de différents échantillons
- 3 - Comparaison des principes de commande

F - APPLICATION METALLURGIQUE DANS UN CAS PRECIS

- 1 - Position du problème
- 2 - Traitements expérimentaux
- 3 - Analyse des résultats.

A - NECESSITE D'UNE CORRECTION1 - Modèle simplifié du système

Une série d'essais préliminaires montre que le système a tendance à suivre la loi de refroidissement imposée, sans écart de température. Cette absence d'erreur de position permet de supposer, en première approche, que le système se comporte comme un intégrateur pur.

Nous obtenons le schéma suivant :

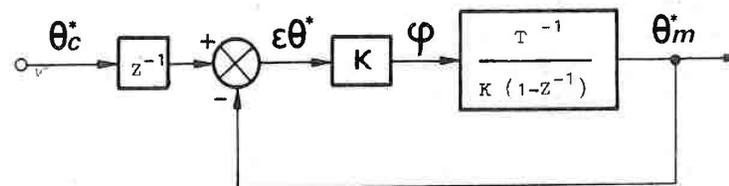


FIGURE 36

Modèle simplifié du système.

où  $K = \frac{mC}{ST}$ , avec

- $T$  = période d'échantillonnage
- $m$  = masse de l'éprouvette
- $C$  = chaleur massique
- $S$  = surface de contact métal-liquide
- $\theta_c^*$  = température de consigne
- $\theta_m^*$  = température mesurée

A chaque instant, l'écart de température  $\epsilon\theta^*$  entre la consigne et la mesure, permet de calculer la densité de flux de chaleur à extraire .

2 - Comportement du système non corrigé

En l'absence de correcteurs, les réactions du système sont très sensibles à de faibles variations des conditions expérimentales. Certains paramètres tels que la distance des

pulvérisateurs à la pièce, la pression d'alimentation en eau, la nature et la taille de l'échantillon traité, agissent de façon notable sur le comportement du processus non corrigé.

a) - Influence de la distance d'action des pulvérisateurs

Comme nous l'avons présenté précédemment, le système a été identifié dans le cas où l'échantillon traité est une éprouvette de nickel 16 x 48, refroidie grâce à un jeu de trois pulvérisateurs placés à une distance  $\delta$  de 10 cm. L'éprouvette se refroidit plus rapidement lorsque la distance  $\delta$  diminue du fait de l'augmentation de la vitesse des gouttes et du débit surfacique d'eau<sup>(14)</sup>.

La figure 37 montre les différentes lois de refroidissement obtenues.

D'autre part, quand la distance  $\delta$  diminue, le temps de transfert du jet diminue et le système a des réactions beaucoup plus vives qui se traduisent, au niveau de la loi de refroidissement suivie, par une diminution des oscillations autour des valeurs de consigne. Par contre, quand la distance  $\delta$  augmente, le temps de réponse augmente considérablement et le système travaille pratiquement en tout ou rien au niveau de la commande.

b) - Influence de la pression d'alimentation en eau

Les pulvérisateurs sont conçus pour travailler avec une dénivellation très faible par rapport au bac d'alimentation.

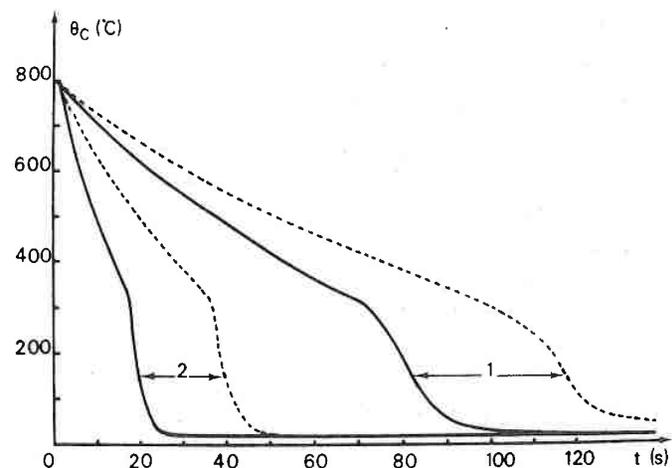


FIGURE 37

Influence de la distance  $\delta$  d'action des pulvérisateurs, sur le refroidissement d'une éprouvette de Ni 16 x 48.

$\delta = 100 \text{ mm}$

----- = 200 mm

1:  $\rho_{\text{air}} = 0,8 \text{ bar.}$

2:  $\rho_{\text{air}} = 4,5 \text{ bars.}$

Les essais effectués montrent qu'une légère surpression d'alimentation en eau modifie le comportement thermique du système de façon telle que le suivi de la courbe de référence se fait avec une tolérance de 30 à 40°C. Ces résultats justifient donc la nécessité d'une correction.

c) - Influence des caractéristiques thermiques de l'échantillon

La constante de temps de l'éprouvette à traiter varie dans le même sens que ses dimensions. Elle dépend d'autre part de la nature du métal à traiter et plus particulièrement de sa chaleur massique. Le fait de travailler avec un échantillon plus volumineux ou possédant une plus faible diffusivité thermique, ne pose pas de problèmes, à condition que les flux de chaleur à extraire soient compatibles avec les limites du système. Dans le cas où le traitement porte sur une pièce de métal bon conducteur de la chaleur, et de petites dimensions, le moindre à-coup dans le jet diphasique se traduit par une oscillation importante de la température de l'échantillon traité.

Il y a donc lieu d'implanter dans l'algorithme de commande un correcteur destiné à limiter les fluctuations de la pression d'air injectée dans les pulvérisateurs.

3 - Etude de l'évolution des paramètres de commande en l'absence de correcteurs

Nous avons effectué le refroidissement contrôlé d'une éprouvette de nickel de 16 mm de diamètre et 48 mm de hauteur. Les pulvérisateurs sont à une distance de 10 cm, au même niveau que le bac d'alimentation en eau. La figure 38 représente l'évolution des différents paramètres au cours du temps.

Les températures de surface, ainsi que les écarts entre mesure et consigne sont exprimés en °C, la tension de commande générée par le calculateur varie de façon discrète

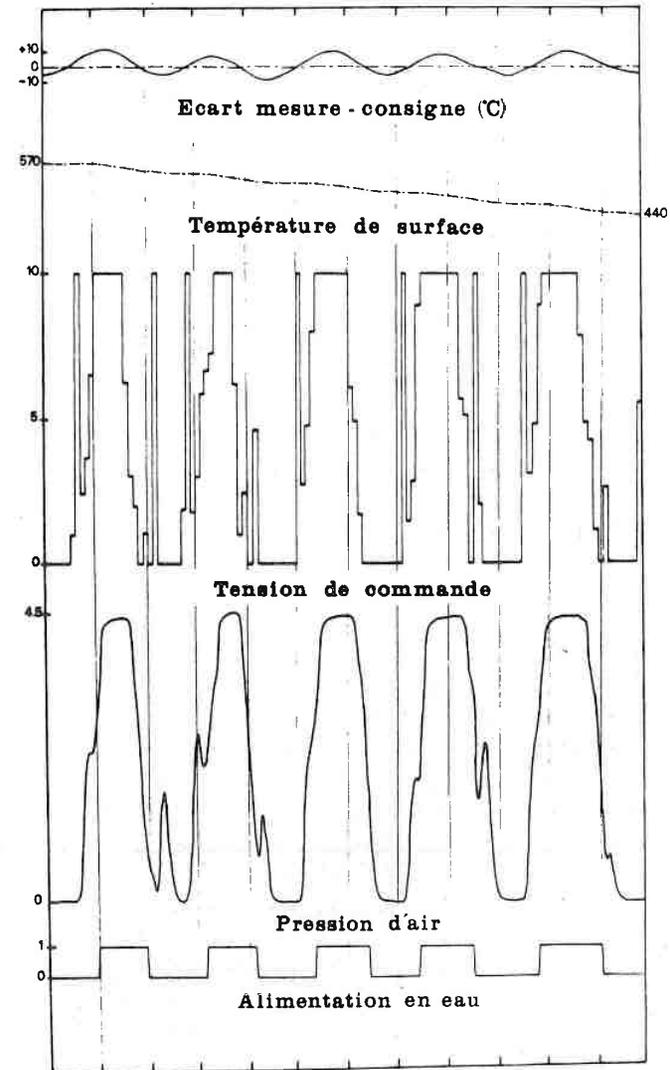


FIGURE 38

Comportement des paramètres de la commande au cours d'un refroidissement contrôlé sans correcteurs.  
(Echelle des temps : 1 graduation = 1 seconde).

entre 0 et 10 volts, tandis que la pression d'air fluctue entre 0 et 4,5 bars en tête des pulvérisateurs. L'alimentation en eau des pulvérisateurs est représentée sous forme d'états logiques.

Une première analyse de ces résultats met en évidence l'allure cadencée de la commande. En effet, à un instant donné, l'écart mesure-consigne est négatif. Il n'y a donc pas lieu d'extraire de flux puisque la pièce est trop froide ; la commande est nulle et le refroidissement n'est plus contrôlé. Le transfert de chaleur entre le centre et la surface se poursuit et provoque par conduction, un accroissement de la température de surface. Au moment où l'écart mesure-consigne devient positif, le contrôle reprend. La commande part très rapidement en saturation et il devient nécessaire de passer en régime diphasique. Les électrovannes commutent au moment où la pression d'air est déjà importante (environ 2 bars), et cela provoque l'arrivée brutale du nuage de gouttes sur l'éprouvette. Il s'ensuit donc une chute importante de la température en surface et l'écart mesure-consigne tend vers une valeur telle qu'un refroidissement effectué à l'air seul conviendrait. Les électrovannes se ferment et une valeur de la commande correspondant à un régime air seul est générée qui produit une augmentation de la pression d'air injecté. A ce moment là, les pulvérisateurs contiennent encore une faible quantité d'eau et une nouvelle diminution de la température de surface se produit. Le gradient de température est donc important entre le centre et la surface de l'éprouvette, ce qui favorisera une augmentation d'autant plus brutale de la température de surface quand la commande sera coupée.

Il y a donc création d'oscillations importantes autour des valeurs de consignes dues à plusieurs phénomènes :

- d'une part, une perte du contrôle quand il apparaît des écarts mesure-consigne négatifs.
- d'autre part, une action décalée de l'alimentation en eau des électrovannes.

Une action correctrice sur ces deux paramètres s'impose. Nous étudions maintenant son influence sur le résultat du traitement thermique.

#### B - INFLUENCE DES CORRECTEURS

Le système étudié étant non stationnaire et surtout non linéaire, nous n'avons pas déterminé sa fonction de transfert globale de façon conventionnelle. De plus, nous avons montré précédemment que sa non linéarité varie suivant plusieurs paramètres, notamment en fonction d'une des entrées, la pression d'air injecté dans les pulvérisateurs. La non linéarité dépend aussi de la valeur de la sortie du système, c'est-à-dire de la température de surface de l'éprouvette traitée.

Ne connaissant pas la fonction de transfert du système sous une forme habituelle, nous n'avons donc pas utilisé les méthodes classiques de recherche des coefficients des correcteurs.

Une méthode d'essais et approximations nous a permis de déterminer le type des correcteurs à implanter dans l'algorithme de commande, de chiffrer les valeurs des

coefficients et de mettre en évidence leur influence sur les différents paramètres du traitement thermique.

### 1 - Influence des correcteurs sur les ondulations de la température

De façon à mener cette étude comparative en nous affranchissant des autres paramètres, nous avons étudié le refroidissement à vitesse constante ( $10^{\circ}\text{C/s}$ ) d'une éprouvette de Ni  $16 \times 48$ , à partir de la température initiale de  $750^{\circ}\text{C}$ .

Des essais préalables nous ont donné un ordre de grandeur des valeurs des coefficients à afficher et cela pour chaque type de correcteur utilisé.

Nous faisons figurer ici, les lois de refroidissement suivies ainsi que les écarts mesure-consigne observés pour différents types de corrections effectuées (figures 39 à 42).

#### a) - Refroidissement sans correction

La figure 39 représente l'évolution de la température de surface de l'éprouvette, soumise à un refroidissement contrôlé non corrigé. Nous pouvons noter la présence d'ondulations peu critiques (amplitudes inférieures à  $10^{\circ}\text{C}$ ) dans la zone correspondant au régime non mouillant. En effet, les a-coups de la commande sont moins ressentis du fait que la gaine de vapeur qui entoure l'éprouvette offre une résistance thermique non négligeable, et se comporte déjà comme un correcteur proportionnel dérivé placé en boucle de retour dont l'effet est d'atténuer les oscillations de la température de surface.

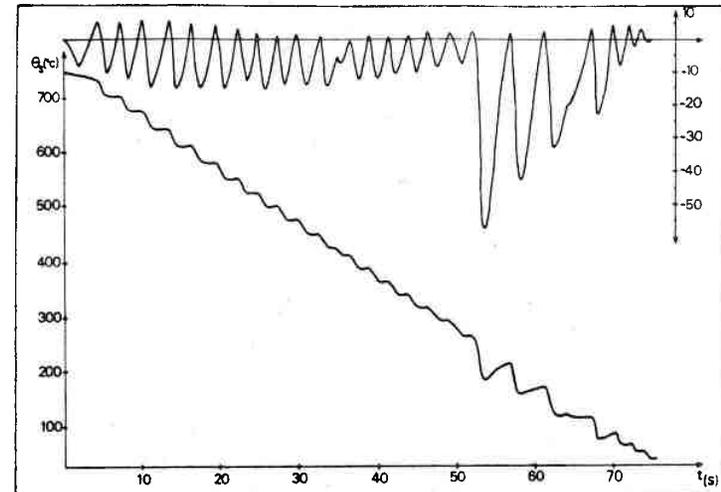


FIGURE 39 Système non corrigé.

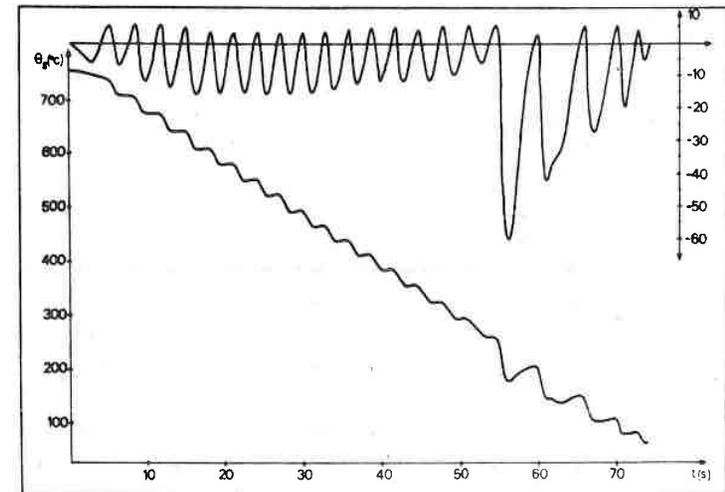


FIGURE 40 Correction de Type proportionnel intégral.

Influence des correcteurs sur les écarts mesure-consigne lors du refroidissement contrôlé d'une éprouvette de Ni  $16 \times 48$ .

Par contre, dans le domaine des températures inférieures à 250°C, c'est-à-dire en régime mouillant, ce phénomène n'intervient plus et les écarts mesure-consigne, de l'ordre de 25 à 30°C, justifient la nécessité d'une correction.

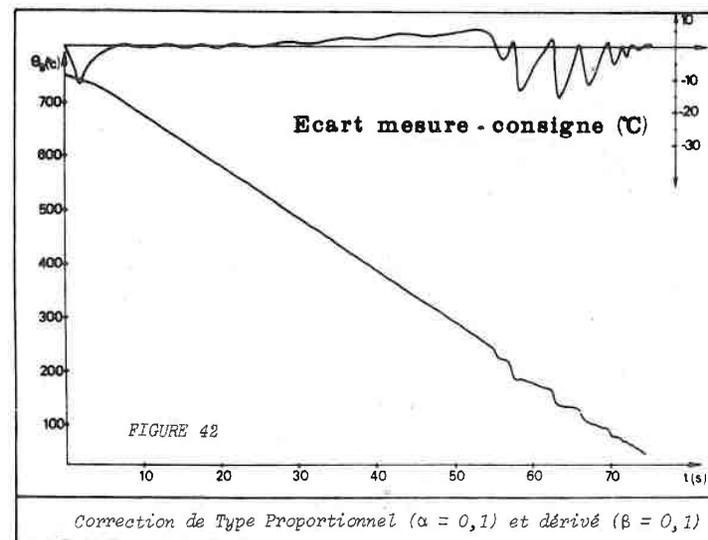
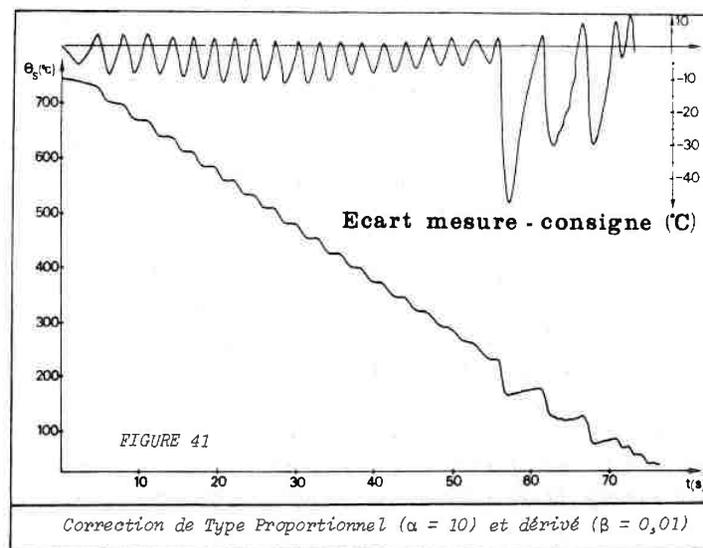
b) - Cas d'une correction de type intégral  
(figure 40)

Nous avons sélectionné ici les résultats obtenus par une correction de type proportionnel-intégral qui a tendance à rendre plus rapide le comportement de la commande. Malheureusement, au niveau du traitement thermique, ce type de correction offre des améliorations peu sensibles par rapport au système non corrigé.

c) - Etude de la correction de type dérivé

Les figures 41 et 42 montrent l'influence des coefficients proportionnel et dérivé d'un tel type de correction. Dans le cas où le coefficient proportionnel  $\alpha = 0,1$  et le coefficient dérivé  $\beta = 0,1$ , les ondulations ont pratiquement disparu dans la zone correspondant au régime non mouillant. Pour des températures inférieures à 250°C, les ondulations de la température de surface sont inférieures à 15°C, ce qui est acceptable dans le cadre des applications métallurgiques envisagées.

Il est intéressant de constater que l'écart mesure-consigne reste positif dans la majeure partie du traitement, ce qui permet de conserver le contrôle du système, comme nous le verrons dans le paragraphe V.4.



Influence des correcteurs sur les écarts mesure-consigne lors du refroidissement contrôlé d'une éprouvette de Ni 16 x 48.

## 2 - Importance de l'erreur de traînage

Le correcteur de type proportionnel dérivé implanté dans l'algorithme, limite de façon satisfaisante les ondulations de la température de surface. Toutefois, la loi de refroidissement subie par l'échantillon traité, se produit avec un certain décalage dans le temps, de l'ordre de 3 secondes. Cette erreur de traînage, qui peut être inadmissible pour un fonctionnement correct de certains systèmes, ne pose pas de problème en ce qui concerne le processus de trempe par pulvérisation. Le diagramme des temps suivant (figure 43) montre clairement que le décalage de quelques secondes dû à l'erreur de traînage est négligeable devant les autres temps du traitement. En effet, ce décalage correspond à un maintien isotherme (mise en solution) de quelques secondes supplémentaires.

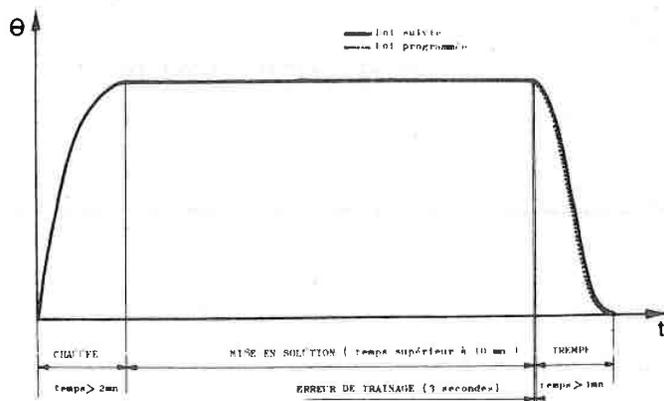


FIGURE 43

Schéma comparatif des durées des différentes étapes d'un traitement thermique.

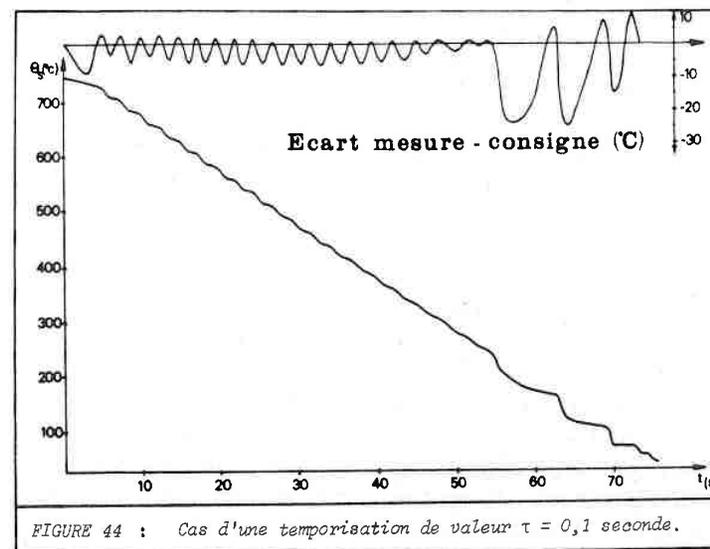


FIGURE 44 : Cas d'une temporisation de valeur  $\tau = 0,1$  seconde.

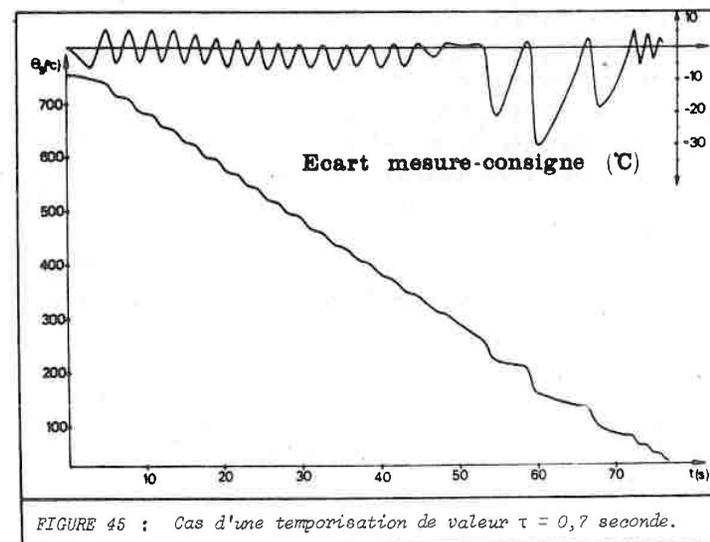


FIGURE 45 : Cas d'une temporisation de valeur  $\tau = 0,7$  seconde.

Influence de la temporisation des électro-vannes sur les écarts mesure-consigne, lors du refroidissement contrôlé d'une éprouvette de Ni 16 x 49.

### 3 - Influence de la temporisation au moment du changement de régime

Nous avons remarqué qu'il est indispensable de retarder l'alimentation en eau pour tenir compte du délai de fermeture de la vanne d'arrivée d'air (IV B 3.d) (figure 34).

Pour juger de l'influence de cette temporisation, nous avons effectué des essais de refroidissement dans les mêmes conditions que celles décrites précédemment. La figure 44 représente la loi de refroidissement obtenue dans le cas où le temps de retard à l'ouverture  $\tau = 0,1$  seconde, ainsi que les ondulations de l'écart mesure-consigne qui en résultent. De façon à mettre en évidence l'importance de cette temporisation, la commande a été effectuée sans correcteur dans l'algorithme et il est possible de comparer ces résultats à ceux représentés sur la figure 39 obtenus dans le cas où le temps  $\tau = 0,4$  seconde.

Des essais effectués avec des temps de retard plus importants, par exemple  $\tau = 0,7$  seconde dans le cas de la figure 45, montrent que la valeur optimale de la temporisation est de l'ordre de 0,4 seconde. Ce délai correspond approximativement au temps de réponse à la fermeture de la vanne d'arrivée d'air.

### 4 - Etude de l'évolution des paramètres de commande dans le cas d'une correction

Nous avons représenté sur la figure 46, l'évolution des paramètres intervenant au cours de la commande. Les ondulations de la température ont presque disparu, comme en témoigne l'aspect régulier de l'écart mesure-consigne.

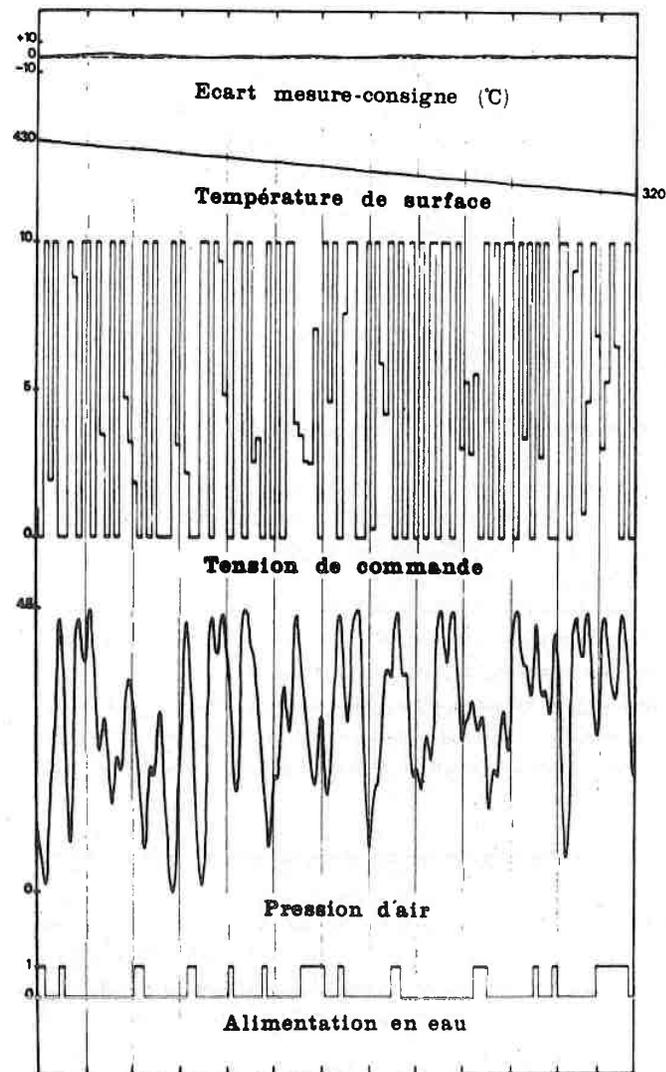


FIGURE 46

Comportement des paramètres de la commande au cours d'un refroidissement contrôlé avec présence de correcteurs dans l'algorithme de commande.  
(Echelle des Temps : 1 graduation = 1 seconde).

De plus, cet écart est pratiquement toujours positif, ce qui implique qu'à aucun moment la température mesurée à la surface de l'éprouvette n'a pris une valeur inférieure à celle programmée. Il y a donc lieu de toujours refroidir et, de ce fait, la valeur de la pression d'air n'est jamais nulle. Le refroidissement est à tout moment sous le contrôle du calculateur.

Le correcteur implanté dans l'algorithme de commande permet une action plus rapide dès que l'écart mesure-consigne apparaît. On évite ainsi l'apparition des oscillations observées lors d'un traitement sans correction (*figure 38*).

#### C - COMPORTEMENT DU SYSTEME EN PRESENCE DE PERTURBATIONS

Afin de tester la validité des algorithmes de commande, il est intéressant de soumettre le système à des perturbations. Dans le cas particulier du système étudié, il peut apparaître deux types de perturbations, liées, soit à la nature même du système refroidissant, c'est-à-dire le jet diphasique, soit aux propriétés thermiques et métallurgiques de l'échantillon traité.

##### 1 - Perturbations dues au jet diphasique

Le pouvoir de refroidissement du jet diphasique varie suivant la nature du liquide pulvérisé (eau distillée pure ou contenant des sels thermiquement stables dissous<sup>(11)</sup>), et dépend de la pression d'alimentation en eau des pulvérisateurs.

##### a) - Variation du flux par adjonction d'eau salée

Quand le liquide pulvérisé est de l'eau distillée, nous pouvons considérer que la perturbation est nulle.

Par contre, en envoyant, à un instant précis, de l'eau contenant des sels dissous (ici, NaCl à 10 % en masse), nous modifions, de façon brutale, le pouvoir extracteur du jet diphasique.

Dans le cadre des essais effectués, nous avons généré par ce moyen une perturbation du flux extrait qui nous permet d'étudier le comportement des paramètres de la commande en présence de perturbations (*figure 47*). Un système d'électrodes, placées dans le tube d'alimentation en eau des pulvérisateurs, permet d'évaluer les variations de résistivité du liquide, donc de détecter le moment exact où la perturbation due à la présence du sel dissous apparaît.

En dehors de toute perturbation, le système a le comportement que nous avons exposé précédemment. A un instant donné, le changement de liquide se produit, avec toutefois un désamorçage du jet au moment de la commutation. Pendant environ une seconde, le jet diphasique n'est pas régulier et cela se manifeste par une augmentation de la pression d'air nécessaire au bout d'un temps d'environ 1,5 seconde. Ce retard est égal au temps nécessaire à la centrifugation du liquide pour former le jet, et au parcours des gouttes avant d'atteindre la pièce. Quand l'eau salée arrive effectivement sur l'échantillon, la commande se poursuit sans changements importants au niveau de l'écart mesure-consigne. L'effet de la perturbation ne se fait pas sentir sur la grandeur de sortie, donc le système réagit correctement.

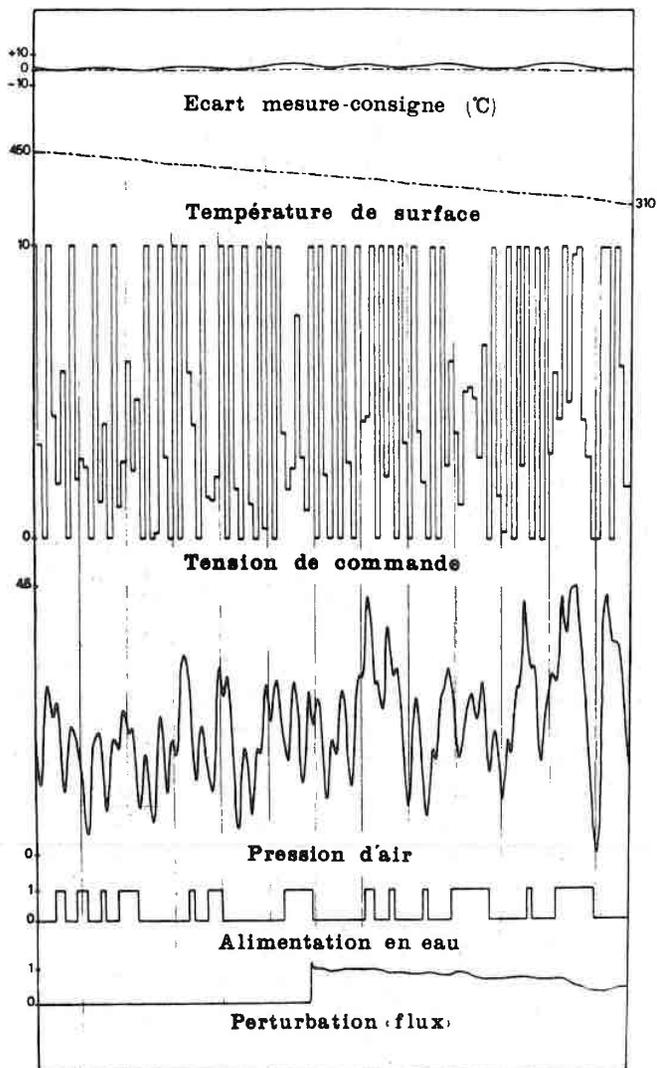


FIGURE 47

Comportement des paramètres de la commande en présence d'une perturbation de flux, au cours d'un refroidissement contrôlé avec présence de correcteurs dans l'algorithme de commande.  
(Echelle des temps 1 graduation = 1 seconde)

Ce résultat est important par le fait qu'il permet de supprimer un contrôle de la pureté du liquide de refroidissement qui serait délicate dans le cas d'une application de type industriel.

b) - Essai avec de l'eau sous pression

Le système est conçu pour travailler avec une dénivellation bac à eau-pulvérisateurs, pratiquement nulle. Nous avons effectué des essais en branchant les pulvérisateurs directement sur le réseau de distribution d'eau qui délivre une pression d'environ 4 bars. En simulant ainsi une dénivellation d'environ 40 mètres, les courbes obtenues permettent de justifier l'inutilité d'un maintien constant du niveau d'alimentation en eau. En effet, dans la zone correspondant au régime non mouillant, les oscillations de l'écart mesure-consigne présentent une amplitude inférieure à 10°C. Par contre, pour des températures correspondant au régime mouillant, ces écarts atteignent 50°C, mais peuvent être réduits à 25°C quand la pression d'alimentation en eau n'excède pas 1 bar.

Compte tenu des constatations effectuées sur le comportement du système soumis à des perturbations de son jet diphasique, il apparaît que cette installation est à même de fonctionner convenablement avec un circuit classique d'alimentation en eau.

2 - perturbations liées à la nature du métal traité

Tous les essais de refroidissement ont été effectués sur une éprouvette de nickel, métal qui ne présente pas de

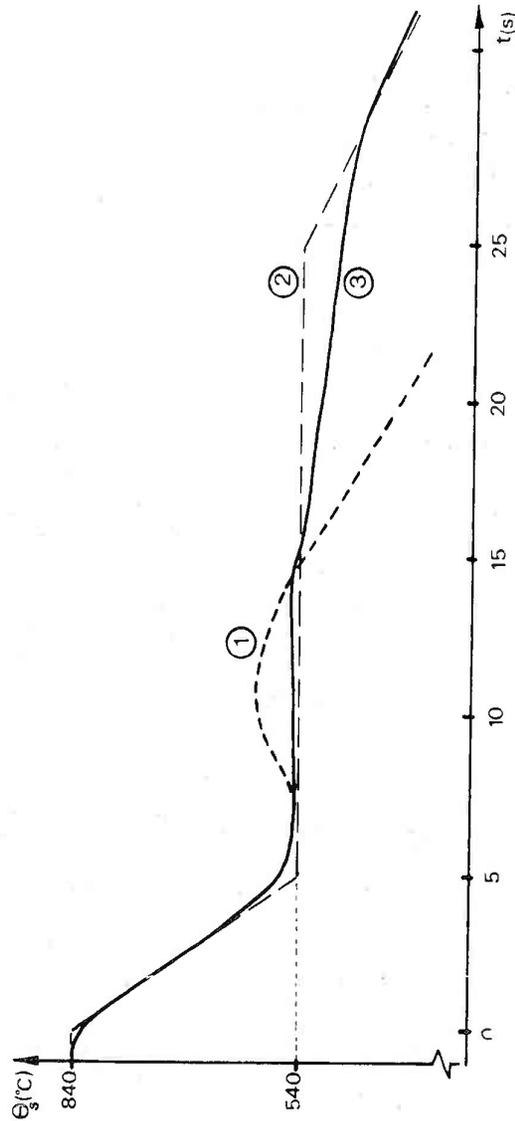


FIGURE 48

Variations en fonction du temps de la température de surface d'une éprouvette cylindrique d'acier non allié à 0,8 % de carbone de diamètre 11 mm et de hauteur 40 mm.

- 1 - Loi du refroidissement non contrôlé
- 2 - Loi programmée
- 3 - Loi effectivement suivie.

transformation allotropique dans le domaine des températures parcourues (de 900°C à 20°C).

Pour les aciers, dans la plupart des cas, la décomposition de l'austénite s'accompagne d'un phénomène exothermique qui peut se manifester par un accroissement de la température appelé recalescence. La perturbation est alors générée à l'intérieur même du matériau à traiter.

Les essais effectués sur un échantillon d'acier non allié, à 0,8 % de carbone, montrent qu'il est possible d'atténuer ce phénomène par extraction de la quantité de chaleur générée par la recalescence (figure 48).

La courbe (1) représente l'accroissement de température dû au dégagement de chaleur produit pendant la transformation lors d'un refroidissement non contrôlé. Nous avons programmé une loi de refroidissement visant à supprimer ce phénomène (courbe (2)). La pièce est donc refroidie à la vitesse de 60°C/s, pendant 5 secondes, puis le palier est suivi jusqu'au moment où le refroidissement en régime de convection naturelle apparaît (à  $t = 15$  s.). La perturbation a été pratiquement éliminée par le système. Cet aspect des réactions du système présente un intérêt métallurgique que nous mettrons en évidence au cours d'une étape ultérieure.

#### D - ETUDE DU REFROIDISSEMENT DE DIFFERENTS TYPES D'ECHANTILLONS

De façon à étendre le domaine de validité du système étudié, nous avons effectué des refroidissements sur des éprouvettes de dimensions et de nature différentes. Ces essais ont porté essentiellement sur les échantillons cylindriques de type suivant :

| N° | Nature et dimensions de l'échantillon | Ref. | Type de refroidissement  | Amplitudes maxima des écarts mesure-consigne |            |
|----|---------------------------------------|------|--------------------------|----------------------------------------------|------------|
|    |                                       |      |                          | Régime non-mouillant                         | Transition |
| 1  | Nickel 16x48                          |      | Vitesse constante 5°C/s  | inférieures à 5°C                            | 8°C        |
| 2  | Nickel 16x48                          | ①    | Vitesse constante 10°C/s | inférieures à 5°C                            | 8°C        |
| 3  | Nickel 16x48                          | ②    | Vitesse constante 20°C/s | de 6 à 8°C                                   | 20°C       |
| 4  | Nickel 16x48                          | ③    | Accéléré                 | 6°C                                          | 16°C       |
| 5  | Nickel 5x50                           |      | Vitesse constante 50°C/s | 8°C                                          | 50°C       |
| 6  | Nickel 5x50                           | ④    | Accéléré                 | 8°C                                          | 40°C       |
| 7  | Nickel 5x50                           | ⑤    | Retardé                  | 12°C                                         | 40°C       |
| 8  | Aluminium 5x50                        | 52   | Vitesse constante 75°C/s | 5°C                                          | 40°C       |
| 9  | Aluminium 5x50                        | 52   | Accéléré                 | 8°C                                          | 30°C       |
| 10 | Aluminium 30x100                      | 54   | Vitesse constante 35°C/s | 5°C                                          | 10°C       |
| 11 | Aluminium 30x100                      | 54   | Accéléré                 | 5°C                                          | 8°C        |
| 12 | Titane 16x48                          | ⑥    | Vitesse constante 10°C/s | 5°C                                          | 12°C       |
| 13 | Titane 16x48                          | ⑦    | Accéléré                 | 8°C                                          | 25°C       |

Les numéros encadrés ①, concernent les courbes des figures 50 et 51. Les figures 52 et 54 sont référencées.

FIGURE 49 - Tableau comparatif des écarts mesure-consigne relevés lors du traitement de différents échantillons.

- Alliage d'aluminium  
diamètre 5 mm ; hauteur 50 mm
- Alliage d'aluminium  
diamètre 30 mm ; hauteur 100 mm
- Nickel  
diamètre 5 mm ; hauteur 50 mm
- Titane  
diamètre 16 mm ; hauteur 48 mm

Tous ces refroidissements sont contrôlés par les algorithmes étudiés au cours des étapes précédentes. Afin de ne pas alourdir la présentation, nous donnons seulement quelques caractéristiques des traitements thermiques effectués. Le tableau de la figure 49 montre les résultats obtenus au cours du traitement de certains types d'échantillons. Nous avons représenté sur les figures 50 et 51 les lois de refroidissement représentatives des cycles thermiques parcourus.

Les essais effectués sur des éprouvettes de Ni 16 × 48 donnent des résultats satisfaisants puisque les écarts mesure-consigne relevés ne dépassent pas 15°C dans le cas le plus défavorable. Toutefois, nous atteignons la limite de densité de flux de chaleur que le système peut extraire, à partir de la vitesse de refroidissement de 20°C par seconde. Les écarts mesure-consigne constatés restent acceptables pour des températures supérieures à 320°C (régime non mouillant). Par contre, dans l'intervalle de température compris entre 320°C et 200°C, c'est-à-dire pendant le régime de transition, les oscillations de la température de surface atteignent 22°C, ce qui est une limite à ne pas dépasser dans le cas de traitements thermiques.

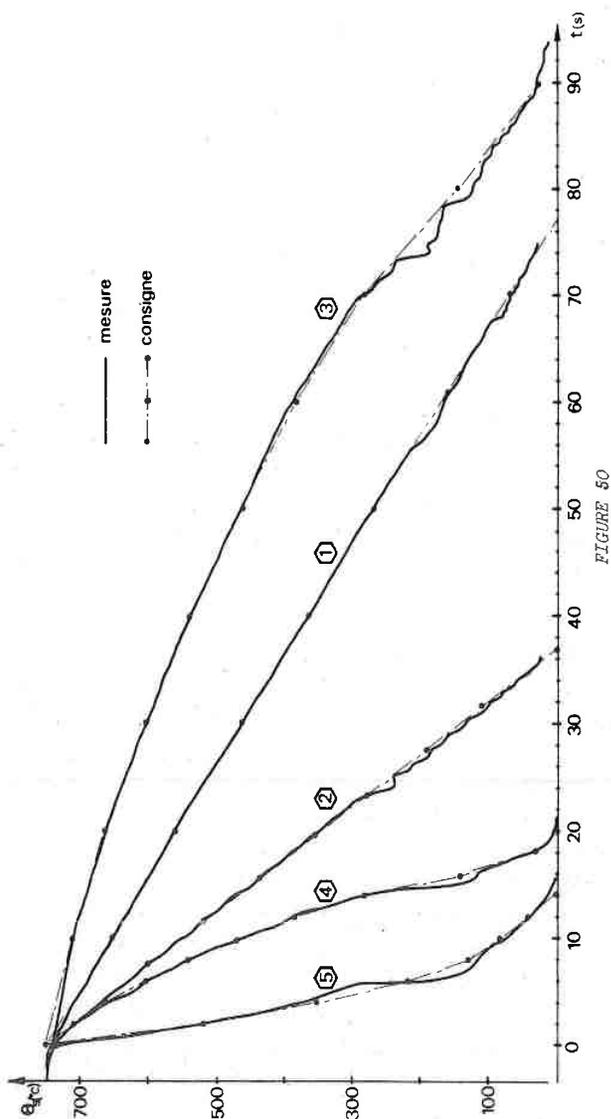


FIGURE 50  
Refroidissements contrôlés d'éprouvettes de Nickel (16 x 48 et 5 x 50)

Les lois de refroidissement imposées à des éprouvettes de plus faible inertie thermique, notamment de 5 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur, mettent en évidence une autre limite du système. Dans ce cas, la constante de temps de l'échantillon à traiter est voisine, sinon plus faible, que celle de l'installation. Les vitesses de refroidissement imposées au cours de ces cycles thermiques atteignent 75°C par seconde et il n'est pas étonnant de voir des oscillations de la température de 60°C d'amplitude. En effet, la faible inertie thermique de ces éprouvettes rend compte de la moindre action du jet diphasique par une variation importante de la température avec une rapidité supérieure à celle de l'installation.

Les lois de refroidissement imposées à des éprouvettes d'aluminium de 30 x 100, donnent des résultats satisfaisants, en accord avec les limites citées auparavant. Il apparaît que l'identification du système effectuée d'après le comportement d'une éprouvette de Ni 16 x 48, reste valable dans le cas d'échantillons de nature et de taille différentes, grâce à une correction efficace implantée dans l'algorithme de commande.

Les essais effectués sur une éprouvette de titane, alliage de très forte diffusivité thermique, de 16 x 48, donnent des résultats corrects qui viennent confirmer les constatations qui précèdent (figure 51).

Il semble donc que, dans la gamme des éprouvettes pratiquement utilisées, le système que nous avons réalisé autorise, dans certaines limites, la maîtrise de l'allure mathématique du refroidissement.

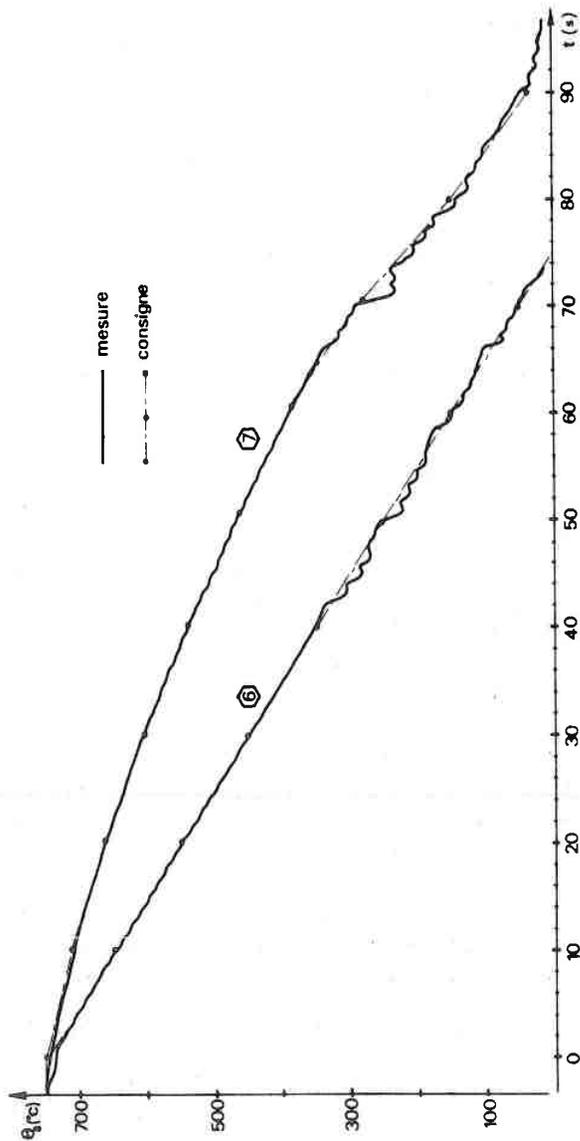


FIGURE 51

Refroidissements contrôlés d'éprouvettes de titane (16 x 48).

## E - COMPARAISON DES RESULTATS A CEUX OBTENUS AVEC UN SYSTEME ANALOGIQUE

### 1 - Présentation du système analogique de contrôle

Dans le but de situer notre travail, nous avons effectué des refroidissements programmés avec un système entièrement analogique figurant parmi les plus perfectionnés actuellement sur le marché.

Ce dispositif de commande du refroidissement est représenté schématiquement sur la figure 55. La loi de refroidissement "température en fonction du temps", que l'on cherche à imposer à l'éprouvette, est tracée sur un support de mylar métallisé puis introduite dans le lecteur de courbe (1). Celui-ci délivre une tension proportionnelle à la température lue. Cette tension est comparée à chaque instant au signal thermique qui provient de l'éprouvette (2). L'écart constaté entre le signal de consigne et le signal de thermocouple est alors appliqué au dispositif de correction (3) qui permet d'ajuster l'alimentation des pulvérisateurs (4) en air comprimé grâce à la vanne pilotée (5). Dans le cas où l'écart mesure-consigne devient trop important, un détecteur de seuil déclenche l'ouverture des électrovannes d'alimentation en eau (6) des pulvérisateurs. Cet ajustement conduit à la minimisation de l'écart entre la température mesurée et la température programmée.

### 2 - Etude du refroidissement de différents échantillons

#### a) - Cas d'une éprouvette d'aluminium de 5 x 50

La figure 52 représente l'évolution de la température en fonction du temps lors du refroidissement contrôlé d'une

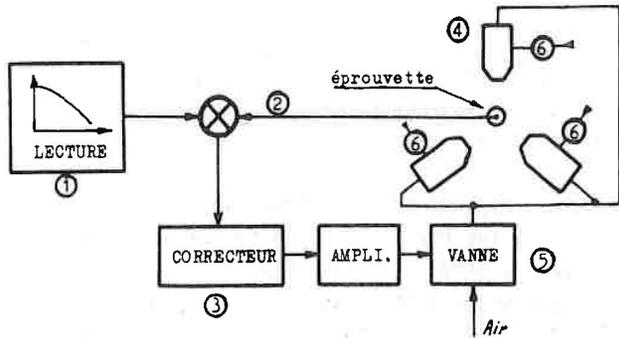


FIGURE 55

Schéma du système de commande analogique de refroidissement.

épreuve d'alliage léger de 5 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur.

La courbe (3) est la loi de consigne programmée pour deux genres de refroidissement, l'un à vitesse constante et l'autre de type accéléré. Dans les deux cas, la loi de refroidissement suivie s'écarte de manière inadmissible de la loi désirée.

Par contre, quand nous passons d'un contrôle analogique à un pilotage par ordinateur, ces écarts diminuent considérablement et prennent des proportions tolérables.

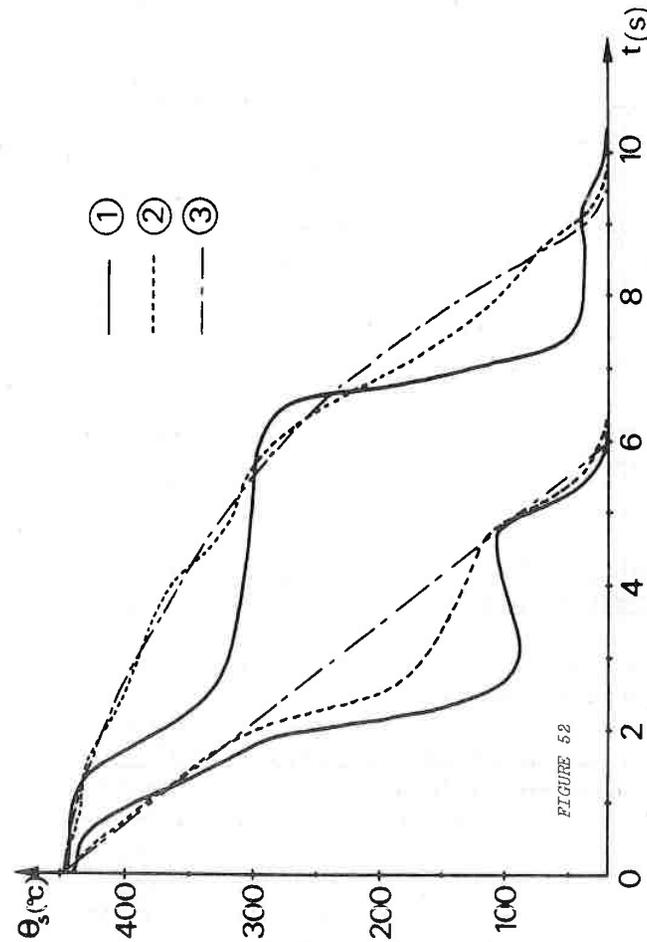


FIGURE 52

Lois de refroidissement piloté d'une épreuve d'Aluminium de 5 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur.

- 1 - Contrôle analogique
- 2 - Contrôle par ordinateur
- 3 - Loi programmée.

b) - Cas d'une éprouvette de Ni 16 x 48

La figure 53 fait état des variations de la température en fonction du temps au cours du refroidissement contrôlé d'une éprouvette de Ni 16 x 48. Les oscillations sont ici moins violentes du fait de l'inertie thermique plus importante de l'échantillon traité. Toutefois, le contrôle par ordinateur permet de réaliser des lois de refroidissement plus correctes.

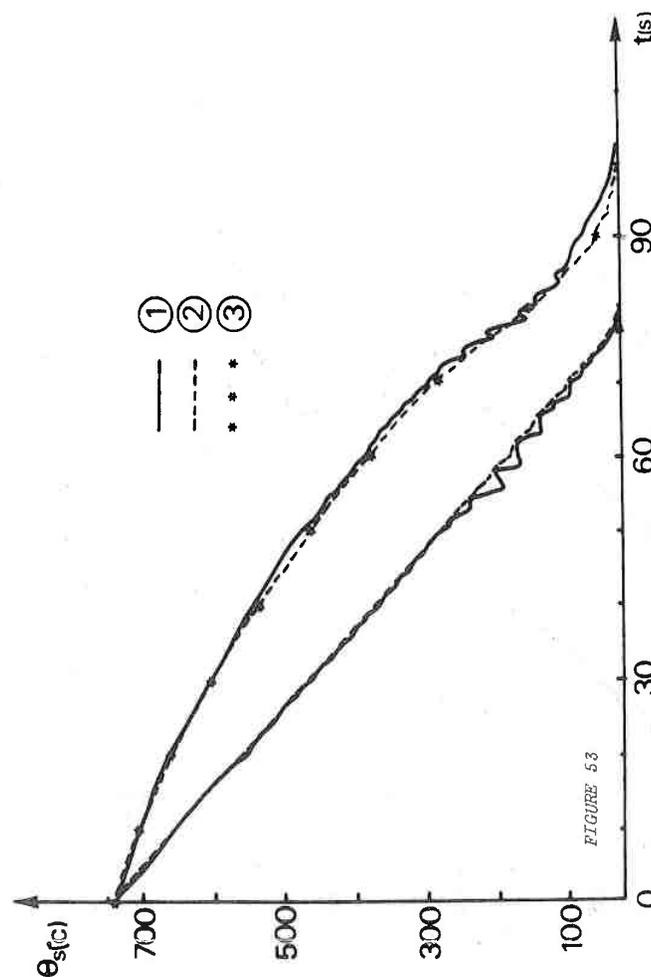
c) - Cas d'une éprouvette d'aluminium de 30 x 100

Dans ce cas, représenté sur la figure 54, nous obtenons aussi de meilleurs résultats quand le contrôle est effectué numériquement.

3 - Comparaison des principes de commande et intérêt du système numérique proposé

Le principe de fonctionnement du système de contrôle analogique est tout à fait classique. A tout instant, l'écart entre la mesure et la consigne est corrigé et permet de générer une tension de commande. Ce système fonctionne correctement lors des refroidissements effectués à l'air seul, c'est-à-dire quand il n'existe pas de non linéarités dues à la présence d'eau.

Quand les flux de chaleur à extraire sont tels qu'il devient nécessaire de refroidir en régime diphasique, le fonctionnement du système est moins satisfaisant.



Lois de refroidissement piloté d'une éprouvette de Nickel de 16 mm de diamètre et de 48 mm de hauteur.

- 1 - Contrôle analogique
- 2 - Contrôle par ordinateur
- 3 - Loi programmée.

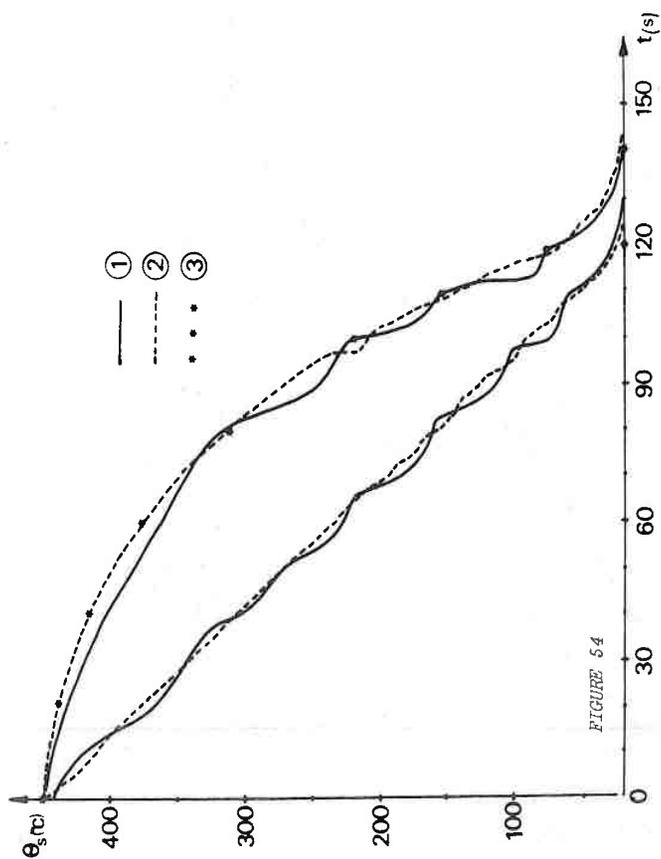


FIGURE 54

Lois de refroidissement piloté d'une éprouvette d'Aluminium de 30 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur.

- 1 - Contrôle analogique
- 2 - Contrôle par ordinateur
- 3 - Loi programmée.

Dans le système analogique étudié, le contrôle s'effectue de manière bouclée conventionnelle et le comportement non linéaire de l'installation de pulvérisation n'est pris en compte que par les variations de la température de l'échantillon traité. De plus, le passage du régime air-seul au régime air + eau, s'effectue quand le détecteur de seuil décèle une tension de commande supérieure à une tension donnée. Cette valeur de la commande sera appliquée au système sans tenir compte du fait que le refroidissement est plus violent en régime diphasique. L'ajustement ne se fera que plus tard, quand l'éprouvette aura réagi, d'où la présence d'oscillations importantes de la température.

Par contre, lors du contrôle par ordinateur, nous tenons compte de la non-linéarité du système. De plus, le calcul du flux à extraire se fait après une correction de tendance. Enfin, lors du passage du régime air-seul au régime diphasique, le modèle incorporé dans les algorithmes de commande permet de tenir compte des différences de flux extraits et de générer une nouvelle valeur de la commande, en accord avec la valeur du flux à extraire (figure 34). Nous obtenons un fonctionnement plus souple du système qui permet ainsi de réaliser des lois de refroidissement aptes à une application métallurgique.

#### F - APPLICATION METALLURGIQUE DANS UN CAS PRECIS

Traitement thermique d'un acier eutectoïde et comparaison des résultats obtenus avec ceux fournis par des systèmes industriels existants.

### 1 - Position du problème

Nous avons trouvé un exemple d'application de notre système de refroidissement contrôlé dans les travaux actuellement en cours au laboratoire<sup>(16, 17)</sup>, sur les transformations perlitiques des aciers au carbone. Les métallurgistes demandent pour ces aciers, une structure perlitique aussi fine que possible, mais sans présence de bainite ni de martensite. Cette dernière condition a conduit à la mise au point des traitements de patentage qui consistent en un refroidissement du fil d'acier dans un bain de plomb maintenu à une température voisine de la température de la transformation perlitique désirée.

Les travaux de HOUIN<sup>(17)</sup> ont montré qu'il est possible d'obtenir des résultats aussi bons, sinon supérieurs, en utilisant un refroidissement continu. La difficulté de ce type de traitement réside dans le fait qu'il est indispensable de remplir les deux conditions suivantes :

- accélérer suffisamment le refroidissement pour obtenir une perlite fine.
- ne pas trop accélérer le refroidissement pour être sûr que la transformation perlitique est complète.

C'est dans ce cas que la possibilité de programmer et de contrôler l'allure du refroidissement est susceptible de donner des résultats intéressants. En effet, il faut évacuer le maximum de quantité de chaleur produite lors de la réaction très exothermique qu'est la transformation perlitique.

### 2 - Traitements expérimentaux

Nous avons appliqué à une éprouvette en acier à 0,8 % de carbone, de 11 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur, les deux types de cycles thermiques représentés sur la figure 56.

La loi de refroidissement ① est obtenue hors contrôle. Les caractéristiques du cycle thermique parcouru ont été choisies de manière à obtenir une transformation perlitique pratiquement complète et à la température la plus basse qu'autorise ce type de traitement.

La courbe ② est celle obtenue en contrôlant le refroidissement. Elle a les caractéristiques suivantes :

- vitesse de refroidissement contrôlée avant transformation : 60°C/s.
- température du palier de transformation : 530°C
- durée du palier : 20 secondes
- vitesse de refroidissement contrôlée après transformation : 20°C/s.

### 3 - Analyse des résultats

Nous avons caractérisé le traitement thermique par les propriétés mécaniques qu'il confère à l'échantillon traité (charge de rupture  $R_m$  et taux de striction  $\epsilon$  %).

Pour le traitement ①, aucun usinage de l'échantillon n'est possible car la transformation perlitique n'a pu

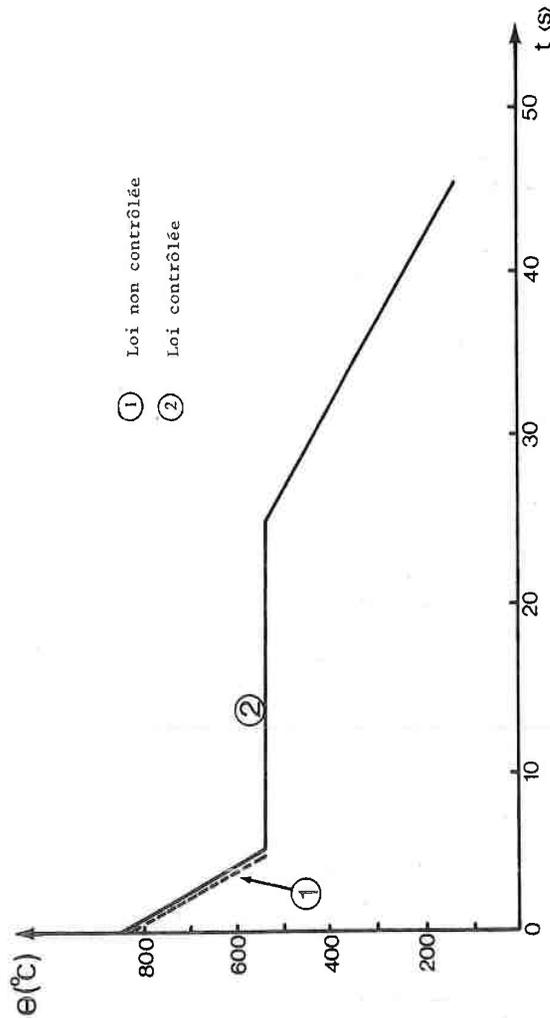


FIGURE 56

Lois de refroidissement imposées à un acier à 0,8 % de carbone.

s'accomplir complètement et il existe des zones martensitiques. Un traitement de ce type, c'est-à-dire sans contrôle, ne peut donc être appliqué si on désire obtenir la structure perlitique fine nécessaire pour une déformation à froid ultérieure.

Par contre, pour l'échantillon qui a subi le traitement ②, nous avons pu prélever une éprouvette de traction (diamètre 2,5 mm et longueur utile 12 mm). Ceci nous a permis de comparer les propriétés mécaniques ainsi obtenues à celles que confèrent des traitements de patentage au plomb ou des systèmes actuels de refroidissement dits "contrôlés" n'utilisant que des jets d'air.

|            | Echantillon patenté | Refroidissement air | Refroidissement piloté |
|------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| Rm (MPa)   | 1315                | 1175                | 1300                   |
| $\Sigma$ % | 26,8                | 33,4                | 31                     |

FIGURE 57

Propriétés mécaniques de l'acier traité en fonction du traitement thermique effectué.

#### 4 - Conclusions

Cet essai d'application de notre système montre que l'on obtient facilement dans ce cas des résultats comparables à ceux obtenus en effectuant le traitement thermique complexe, onéreux et de mise en oeuvre délicate, qu'est le traitement de patentage dans un bain de plomb. Il montre également que la réalisation d'un cycle thermique, même lorsque le métal donne lieu à un dégagement de chaleur au cours du refroidissement, ne pose pratiquement plus de problèmes dès l'instant où on reste dans les limites des possibilités d'extraction de flux de chaleur de l'installation.

## conclusions

Notre travail a consisté tout d'abord à analyser le comportement d'un échantillon métallique refroidi par pulvérisation d'eau.

Nous en avons déduit un modèle de variation de la densité de flux de chaleur en fonction de la température de l'éprouvette traitée et de la grandeur de commande (pression d'air injectée dans les pulvérisateurs).

Au cours d'une étape ultérieure, nous avons mis au point le système de pulvérisation ainsi que tous ses capteurs et actionneurs.

Notre tâche a consisté ensuite à identifier tous ces moyens de communication avec le processus, à contrôler puis à linéariser leurs caractéristiques de façon à mettre en place un environnement temps-réel.

Après avoir pris connaissance du logiciel du calculateur, nous avons écrit puis testé les programmes d'acquisition, de linéarisation et de commande du système à contrôler.

Notre action s'est poursuivie par une série d'essais systématiques destinée à parfaire les algorithmes de commande et à implanter les correcteurs indispensables à un fonctionnement correct de l'installation.

Dans le but de vérifier la validité de notre travail, nous avons alors effectué des traitements thermiques sur des échantillons métalliques de différentes natures.

Il apparaît donc que l'outil original que constitue ce système permet d'imposer à un solide, porté à haute température, une loi de refroidissement contrôlable en permanence.

Dans le cas de la trempe des alliages métalliques, il est possible d'imposer à une éprouvette le refroidissement optimal, par exemple de type accéléré dans le cas des alliages d'aluminium. C'est ce refroidissement optimal et lui seul qui assurera le meilleur compromis entre les caractéristiques mécaniques et les contraintes thermiques (4).

Ce système offre de plus l'avantage de permettre des extensions, notamment dans la réalisation de traitements isothermes, grâce à un système de chauffage par air pulsé.

Ce prolongement est prévu dans une version plus importante actuellement en cours d'étude dans laquelle la commande pourra être implantée sur un microprocesseur.

En ce qui concerne l'aspect automatique du système, nous pensons, dans un bref avenir, développer les algorithmes de pilotage de façon à autoriser une commande adaptative du système. A ce moment la loi de refroidissement, imposée au départ, pourra être modifiée au cours même du traitement,

afin de tenir compte de contraintes métallurgiques fixées au départ, comme par exemple, la recherche de déformations plastiques minimales.

Notre travail constitue donc une première approche vers la réalisation d'un système automatique qui assure la mise en oeuvre du traitement thermique optimum d'un alliage métallique.

Nous pouvons dès maintenant réaliser des refroidissements qu'une analyse mathématique permet au métallurgiste de prévoir, mais qu'aucune technique connue ne pouvait réaliser.

## annexes

ANNEXE I - ASSERVISSEMENT EN POSITION DU CLAPET DE LA  
VANNE<sup>(\*)</sup>

1 - COMMANDE DE PUISSANCE

L'ouverture et la fermeture de la vanne nécessitent la rotation du moteur dans les deux sens et imposent l'utilisation d'un amplificateur différentiel.

De plus, une alimentation stabilisée fournissant des tensions de + 15 V et - 15 V, sert à générer les tensions de référence du capteur de position et à alimenter les circuits de correction.

2 - ASSERVISSEMENT

L'existence d'un seuil de sensibilité minimum, de l'ordre de 2 volts, a eu pour conséquence de masquer toute commande inférieure à ce seuil. De plus, une augmentation du gain, destinée à accroître la sensibilité aux faibles sollicitations, rendait le système instable pour des valeurs importantes de la commande.

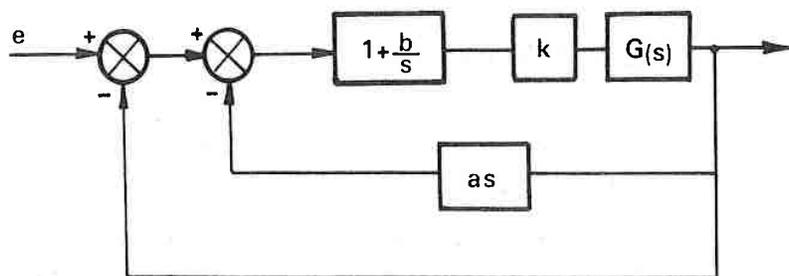
Un amplificateur a donc été monté en dérivateur de façon à procurer une contre-réaction tachymétrique à partir du

*(\*) Conçu et réalisé par le Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée.*

signal issu du capteur de position.

La rapidité du système a été ainsi nettement améliorée. Toutefois, il subsistait une erreur de position, d'autant plus importante que l'échelon d'entrée était faible, due à la présence du ressort de rappel de la vanne.

Ce défaut a été éliminé par une correction de type intégral. D'où le schéma suivant :



Le signal de consigne généré par le calculateur (compris entre 0 et 10 volts) est appliqué au premier comparateur. La seconde entrée reçoit comme information la position du clapet de la vanne. Le signal résultant attaque une entrée du second comparateur dont l'autre entrée est alimentée par une tension représentative de la vitesse du moteur, élaborée à partir d'un circuit monté en amplificateur-dérivateur.

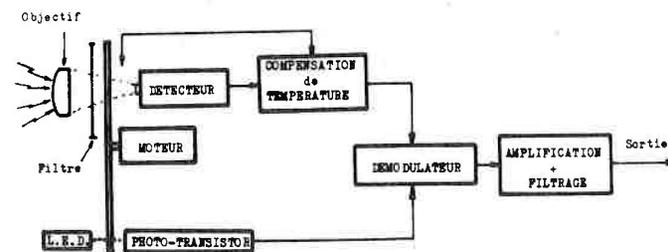
Cette disposition a été rendue nécessaire afin d'obtenir un gain suffisant tout en ayant un réglage aisé des tensions d'offset.

Remarque : sous peine de compromettre la stabilité, le moteur doit toujours travailler en charge.

## ANNEXE 2 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PYROMETRE

### INFRAROUGE

Le schéma suivant représente les différents organes qui composent le pyromètre infrarouge.



L'énergie de rayonnement émise par la cible est focalisée sur le détecteur par l'intermédiaire d'un objectif. Le filtre placé dans le faisceau convergent permet de sélectionner une bande étroite du spectre d'émission thermique (de 4,8 à 5,2  $\mu\text{m}$ ). Avant d'atteindre le détecteur, la radiation est modulée grâce à un disque percé entraîné par un moteur. Une tension alternative proportionnelle à l'énergie reçue est issue du détecteur. Elle est amplifiée puis traitée dans un démodulateur synchronisé par le signal du photo-transistor. La tension continue obtenue est amplifiée, filtrée, puis envoyée vers le calculateur qui assure la linéarisation et le traitement du signal.

## bibliographie

1. BECK et FAIVRE  
Sur les procédés permettant l'accroissement de la vitesse de refroidissement de trempe et l'atténuation ou la suppression par modification des propriétés superficielles de l'éprouvette de métal.  
C.R. Ac. Sc., 271 C, (1970), 1541.
2. CHEVRIER et BECK  
Influence d'un dépôt de faible conductibilité thermique, sur le refroidissement d'une éprouvette métallique dans l'azote liquide. Application à la trempe à l'eau.  
Mém. Scient. Rev. Métal. 6, (1971), 391-400.
3. MOREAUX  
Trempe dans l'eau et les solutions aqueuses.  
Doctorat de Spécialité, Nancy, Juin 1974.
4. ARCHAMBAULT  
Contribution à l'optimisation du traitement d'un alliage d'aluminium de hautes caractéristiques.  
Thèse de Docteur-Ingénieur, Nancy, Juin 1976.
5. CHEVRIER  
Etude thermocinétique des refroidissements par trempe.  
Doctorat de Spécialité, Nancy, Juillet 1970.

6. BIETH  
Etude du transfert thermique entre un solide à haute température et un jet diphasique.  
Doctorat de Spécialité, Nancy, Octobre 1976.
7. CRABOL  
Introduction à l'étude des procédés de pyrométrie optique utilisant l'émission directe des corps étudiés.  
Cahiers de Thermique, n° 3 - Série A - Mars 1973.
8. DATA GENERAL CORPORATION  
How to use the NOVA computers.  
Southborro. Massachussets, U.S.A. 1974.
9. HANDBOOK OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SOLID MATERIALS  
Wright Air Development Division, U.S. Air Force.
10. ANGOT  
Compléments de mathématiques à l'usage des ingénieurs des télécommunications.  
Dunod, 1966.
11. MOREAUX  
Influence sur le pouvoir de refroidissement par l'eau de trempe, de la mise en solution d'un sel thermiquement stable.  
Mém. Scient. Rev. Métal. LXVII, 4 (1970) 285-293.
12. DATA GENERAL CORPORATION  
R.T.O.S.  
Southborro. Massachussets, U.S.A. 1974.
13. CHEVRIER  
Conduction transitoire de la chaleur dans un solide soumis à un transfert diphasique.  
Application aux contraintes thermiques.  
Thèse de Doctorat d'Etat, Nancy, Juin 1973

14. BIETH  
Caractéristiques du transfert thermique entre un solide à haute température et un jet diphasique.  
Entropie (1976), 71, 42-49.
15. LEGRAS  
Précis d'analyse numérique.
16. HOUIN J.P., SIMON A. et BECK G.  
Relations entre traitement thermique, structure et propriétés mécaniques des aciers au carbone de type perlitique.  
4<sup>th</sup> International Conference on the Strength of Metals and Alloys. 30 Aout-3 septembre 1976, vol. 2 776-781.
17. HOUIN  
Relations entre structures et propriétés mécaniques d'aciers non alliés de 0,2 à 0,8 % en masse de carbone après transformation ferrito-perlitique en refroidissement continu.  
Thèse d'Ingénieur CNAM, Nancy, mars 1977.
18. RAGAZZINI J.R., FRANKLIN G.F.  
Les systèmes asservis échantillonnés.  
Dunod, 1962.
19. VOLGUINE L.N.  
Programmation des calculatrices numériques de commande.  
Dunod, 1966.
20. DORF  
Les variables d'état dans l'analyse et la synthèse des systèmes de commande  
Dunod.
21. DERUSSO  
State variables for engineers.  
John Wiley and Son.
22. CARNAHAN, LUTHER, WILKES  
Applied Numerical Methods.  
John Wiley, 1969.

## table des matières

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION .....                                                                                                        | 1  |
| NOTATIONS .....                                                                                                           | 5  |
| <u>CHAPITRE I</u>                                                                                                         |    |
| <u>POSITION DU PROBLEME</u> .....                                                                                         | 8  |
| A - <u>ASPECT METALLURGIQUE</u> .....                                                                                     | 9  |
| 1 - La trempe, procédé industriel de traitement .....                                                                     | 9  |
| 2 - La trempe, traitement thermique pour conserver à basse température l'état structural stable à haute température ..... | 9  |
| B - <u>ASPECT THERMIQUE</u> .....                                                                                         | 12 |
| 1 - Trempe par immersion .....                                                                                            | 12 |
| 2 - Trempe par pulvérisation .....                                                                                        | 13 |
| 3 - Comparaison entre les deux systèmes .....                                                                             | 14 |
| C - <u>ASPECT AUTOMATIQUE</u> .....                                                                                       | 15 |
| <u>CHAPITRE II</u>                                                                                                        |    |
| <u>PARAMETRES THERMIQUES</u> .....                                                                                        | 20 |
| A - <u>COURBES DE REFROIDISSEMENT</u> .....                                                                               | 23 |

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 - Dispositif de trempe par pulvérisation .....                                                                                               | 23 |
| a) - Four de trempe .....                                                                                                                      | 23 |
| b) - Eprouvette de trempe .....                                                                                                                | 23 |
| c) - Liquide pulvérisé .....                                                                                                                   | 23 |
| d) - Pulvérisateurs .....                                                                                                                      | 23 |
| e) - Mesure de la température au centre de l'éprouvette .....                                                                                  | 24 |
| 2 - Courbes de refroidissement .....                                                                                                           | 24 |
| a) - En régime diphasique (air + eau) .....                                                                                                    | 24 |
| b) - Dans le cas du régime air seul ..                                                                                                         | 24 |
| <br>                                                                                                                                           |    |
| B - <u>DETERMINATION DU FLUX DE CHALEUR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE L'EPROUVETTE</u> .....                                     | 27 |
| 1 - Equation de la chaleur ; cas général ..                                                                                                    | 27 |
| 2 - Expression en coordonnées cylindriques                                                                                                     | 29 |
| 3 - Conditions aux limites .....                                                                                                               | 30 |
| 4 - Organisation des calculs .....                                                                                                             | 31 |
| 5 - Résultats du calcul .....                                                                                                                  | 31 |
| <br>                                                                                                                                           |    |
| C - <u>EXPRESSION POLYNOMIALE DU FLUX EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE <math>\theta_s</math> ET DE LA GRANDEUR DE COMMANDE p</u> ..... | 34 |
| 1 - Etude de la zone correspondant au régime mouillant .....                                                                                   | 35 |
| 2 - Etude de la zone correspondant au régime non mouillant .....                                                                               | 36 |
| 3 - Etude de la zone correspondant à la transition entre les régimes mouillant et non mouillant .....                                          | 37 |
| 4 - Cas des refroidissements effectués à l'aide d'air pulsé seul .....                                                                         | 39 |

### CHAPITRE III

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>ETUDE DU SYSTEME</u> .....                                           | 42 |
| <br>                                                                    |    |
| A - <u>IMPLANTATION</u> .....                                           | 45 |
| <br>                                                                    |    |
| B - <u>PRESENTATION ET IDENTIFICATION DES DIFFERENTS ORGANES</u> .....  | 47 |
| 1 - Pulvérisateurs .....                                                | 47 |
| 2 - Bac à niveau constant .....                                         | 47 |
| 3 - Vanne motorisée asservie en position .....                          | 48 |
| a) - Vanne .....                                                        | 48 |
| b) - Asservissement en position du clapet de vanne .....                | 48 |
| c) - Identification de l'ensemble convertisseur-vanne .....             | 50 |
| 4 - Capteurs de température .....                                       | 52 |
| a) - Mesure de la température par thermocouple .....                    | 52 |
| b) - Principe de la mesure par pyromètre infrarouge .....               | 53 |
| c) - Caractéristiques principales du pyromètre .....                    | 54 |
| 5 - Convertisseurs analogiques-numériques et numériques-analogiques ... | 54 |
| a) - Conversion analogique-numérique (entrées) .....                    | 54 |
| b) - Conversion numérique-analogique (sorties) .....                    | 55 |
| 6 - Calculateur .....                                                   | 56 |
| 7 - Périphériques d'entrée-sortie ....                                  | 57 |
| a) - Téléimprimeur de service ....                                      | 57 |
| b) - Deuxième téléimprimeur .....                                       | 57 |
| c) - Lecteur de courbe .....                                            | 57 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| C - <u>TRAITEMENT DES INFORMATIONS</u> .....                                         | 59 |
| 1 - Linéarisation de la température mesurée par un thermocouple .....                | 59 |
| a) - Compensation de soudure froide .                                                | 59 |
| b) - Linéarisation de la caractéristique .....                                       | 61 |
| 2 - Linéarisation de la température mesurée par le capteur infrarouge .....          | 61 |
| a) - Mise en évidence de la non linéarité .....                                      | 61 |
| b) - Analyse quantitative de la non linéarité .....                                  | 62 |
| c) - Algorithme de linéarisation ....                                                | 63 |
| 3 - Acquisition de la courbe de référence                                            | 66 |
| 4 - Entrée des données sur téléimprimeur.                                            | 67 |
| 5 - Test de l'environnement .....                                                    | 67 |
| 6 - Test de la température initiale ....                                             | 67 |
| 7 - Vérification de la mise en place de l'éprouvette .....                           | 68 |
| D - <u>CONTRAINTES DE PILOTAGE</u>                                                   |    |
| 1 - Valeur limite de la pression d'air ..                                            | 69 |
| 2 - Valeurs limites des vitesses de refroidissement et améliorations possibles ..... | 69 |
| 3 - Valeurs limites des accélérations du refroidissement .....                       | 73 |
| 4 - Valeur optimale de la fréquence d'échantillonnage .....                          | 73 |
| a) - Temps de réponse du système ....                                                | 73 |
| b) - Temps de calcul de la commande .                                                | 75 |
| c) - Taille mémoire disponible .....                                                 | 75 |
| d) - Conclusion .....                                                                | 76 |

## CHAPITRE IV

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>ETUDE DES ALGORITHMES DE COMMANDE</u> .....                                        | 78 |
| A - <u>PRESENTATION DU SYSTEME TEMPS-REEL</u> ..                                      | 79 |
| 1 - Organisation et configuration de la mémoire .....                                 | 79 |
| 2 - Organisation du déroulement d'un programme temps-réel .....                       | 80 |
| 3 - Etats des tâches .....                                                            | 80 |
| 4 - Contrôle d'exécution des tâches .                                                 | 82 |
| B - <u>DEROULEMENT D'UNE TREMPE CONTROLEE</u> ..                                      | 82 |
| 1 - Opérations préliminaires .....                                                    | 82 |
| 2 - Activation du système et initialisation .....                                     | 83 |
| 3 - Algorithmes de commande .....                                                     | 86 |
| a) - Organigramme du sous-programme d'interruption d'élaboration de la commande ..... | 86 |
| b) - Schéma de la boucle de commande .....                                            | 87 |
| c) - Compensation de la pression                                                      | 89 |
| d) - Stratégie du changement de régime de refroidissement ..                          | 90 |
| 4 - Traitement des informations au cours de la commande .....                         | 91 |
| C - <u>ORGANISATION DE LA ZONE MEMOIRE ET GESTION DES INTERRUPTIONS</u> .....         | 93 |
| 1 - Configuration générale de la mémoire .....                                        | 93 |
| 2 - Gestion des interruptions .....                                                   | 94 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 3 - Organisation des tâches ..... | 94 |
| a) - Tâche DEPART .....           | 95 |
| b) - Tâche ERREUR .....           | 95 |
| c) - Tâche RETOUR .....           | 95 |
| d) - Tâche PILOTAGE .....         | 96 |
| e) - Tâche FINAL .....            | 96 |
| <u>CONCLUSION</u> .....           | 96 |

### CHAPITRE V

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>ESSAIS ET RESULTATS</u> .....                                                      | 99  |
| <u>A - NECESSITE D'UNE CORRECTION</u> .....                                           | 101 |
| 1 - Modèle simplifié du système .....                                                 | 101 |
| 2 - Comportement du système non corrigé ...                                           | 101 |
| a) - Influence de la distance d'action<br>des pulvérisateurs .....                    | 102 |
| b) - Influence de la pression d'alimen-<br>tation en eau .....                        | 102 |
| c) - Influence des caractéristiques<br>thermiques de l'échantillon .....              | 104 |
| 3 - Etude de l'évolution des paramètres de<br>commande en l'absence de correcteurs .. | 104 |
| <u>B - INFLUENCE DES CORRECTEURS</u> .....                                            | 107 |
| 1 - Influence des correcteurs sur les ondu-<br>lations de la température .....        | 108 |
| a) - Refroidissement sans correction ..                                               | 108 |
| b) - Cas d'une correction de type inté-<br>gral .....                                 | 110 |
| c) - Etude de la correction de type<br>dérivé .....                                   | 110 |



|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2 - Importance de l'erreur de traînage ..                                                       | 112 |
| 3 - Influence de la temporisation au mo-<br>ment du changement de régime .....                  | 114 |
| 4 - Etude de l'évolution des paramètres<br>de commande dans le cas d'une correc-<br>tion .....  | 114 |
| <u>C - COMPORTEMENT DU SYSTEME EN PRESENCE DE<br/>PERTURBATIONS</u> .....                       | 116 |
| 1 - Perturbations dues au jet diphasique ..                                                     | 116 |
| a) - Variation du flux par adjonction<br>d'eau salée .....                                      | 117 |
| b) - Essai avec de l'eau sous pres-<br>sion .....                                               | 119 |
| 2 - Perturbations liées à la nature du<br>métal traité .....                                    | 119 |
| <u>D - ETUDE DU REFROIDISSEMENT DE DIFFERENTS<br/>TYPES D'ECHANTILLONS</u> .....                | 121 |
| <u>E - COMPARAISON DES RESULTATS A CEUX OBTENUS<br/>AVEC UN SYSTEME ANALOGIQUE</u> .....        | 127 |
| 1 - Présentation du système analogique de<br>contrôle .....                                     | 127 |
| 2 - Etude du refroidissement de diffé-<br>rents échantillons .....                              | 127 |
| a) - Cas d'une éprouvette d'aluminium<br>de 5 x 50 .....                                        | 127 |
| b) - Cas d'une éprouvette de Ni 16x48                                                           | 130 |
| c) - Cas d'une éprouvette d'aluminium<br>de 30 x 100 .....                                      | 130 |
| 3 - Comparaison des principes de commande<br>et intérêt du système numérique pro-<br>posé ..... | 130 |

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| F - <u>APPLICATIONS METALLURGIQUES DANS UN CAS</u> |     |
| <u>PRECIS</u> .....                                | 133 |
| 1 - Position du problème .....                     | 134 |
| 2 - Traitements expérimentaux .....                | 135 |
| 3 - Analyse des résultats .....                    | 135 |
| <u>CONCLUSIONS</u> .....                           | 139 |
| <u>ANNEXES</u> .....                               | 143 |
| <u>ANNEXE I - ASSERVISSEMENT EN POSITION DU</u>    |     |
| <u>CLAPET DE LA VANNE</u> .....                    | 143 |
| 1 - Commande de puissance .....                    | 143 |
| 2 - Asservissement .....                           | 143 |
| <u>ANNEXE II - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU</u>   |     |
| <u>PYROMETRE INFRAROUGE</u> .....                  | 145 |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                | 147 |
| TABLE DES MATIERES .....                           | 151 |

NOM DE L'ETUDIANT : REMY Gérard

NATURE DE LA THESE : DOCTORAT DE SPECIALITE EN AUTOMATIQUE



VU, APPROUVE

& PERMIS D'IMPRIMER

NANCY, le 15 Mars 1977

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I

