



CONTROLE ET CONDUITE NUMERIQUES D'UN FOUR TUNNEL D'INDUSTRIE CERAMIQUE

Haïssam El Hajjar

► To cite this version:

Haïssam El Hajjar. CONTROLE ET CONDUITE NUMERIQUES D'UN FOUR TUNNEL D'INDUSTRIE CERAMIQUE. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1983. Français. NNT: . tel-00181400

HAL Id: tel-00181400

<https://theses.hal.science/tel-00181400>

Submitted on 23 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE (Sciences)

pour l'obtention

du **DIPLOME de DOCTEUR-INGENIEUR**

Spécialité : E.E.A. option automatique

par

Haïssam EL HAJJAR

Ingénieur ENSEEIHT

CONTROLE ET CONDUITE NUMERIQUES D'UN FOUR TUNNEL D'INDUSTRIE CERAMIQUE

Soutenue le 18 mai 1983, devant la Commission d'examen :

MM. Y. SEVELY

Président

J.-P. BABARY

D. BERNAT

A. COSTES

M. COURDESSES

J.-P. GELIS

J.-B. POURCIEL

Examineurs

EL HAJJAR (Haïssam). - Contrôle et conduite numériques d'un four tunnel d'industrie céramique. - 96 p.

Th. Docteur-Ingénieur : EEA : Automatique, Toulouse III : 1983 ; 833.

RESUME :

Dans ce mémoire nous rappelons la modélisation du fonctionnement thermique d'un four de poterie et nous déterminons le régime statique optimal de cuisson. Après des transformations du modèle, nous calculons une loi de commande en boucle fermée par retour d'état en minimisant un critère quadratique à horizon fini. Le calcul d'un estimateur de l'état est exposé pour la reconstitution du profil dans la charge à partir de mesures faites dans le gaz. Nous exposons à la fin la conduite numérique du four par microcalculateur en portant l'attention sur l'aspect surveillance du fonctionnement et démarrage automatique à la mise sous tension.

MOTS CLES :

- Optimisation
- Approximation fonctionnelle
- Commande optimale
- Observation
- Conduite numérique
- Temps réel

JURY et date de soutenance : 18 mai 1983

Président : Y. SEVELY
Membres : JP BABARY (LAAS)
D. BERNAT
A. COSTES
M. COURDESSES
JP GELIS
JB POURCIEL

DEPOT à la Bibliothèque Universitaire en 4 exemplaires

الشك في البحث وسيلة لبلوغ اليقين
عن الجاحظ

AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé au LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE ET D'ANALYSE DES SYSTEMES et à l'UNIVERSITE PAUL SABATIER de TOULOUSE.

Je tiens à remercier :

. Monsieur Y. SEVELY, Professeur à l'Université Paul Sabatier pour ses conseils tout au long de mon séjour au L.A.A.S. et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider mon Jury.

. Monsieur J.P. BABARY, Maître de Recherche au C.N.R.S.. La liberté et la confiance qu'il m'a accordées, l'appui que j'ai trouvé auprès de lui, ont permis de mener à bien mon travail au L.A.A.S. et je veux lui exprimer ici toute ma reconnaissance.

. Monsieur D. BERNAT, Directeur des Etablissements BERNAT-SAULIERE de Castres, pour l'expérience qu'il nous a apportée durant l'avancement de l'étude.

. Monsieur A. COSTES, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse, pour l'attention qu'il m'a témoignée tout au long de mes études supérieures. Je voudrais qu'il sache le plaisir que j'ai à le voir participer au Jury d'examen.

. Monsieur M. COURDESSES, Assistant à l'Université Paul Sabatier, pour le soutien et la sympathie qu'il a toujours manifestés.

. Monsieur J.P. GELIS, Directeur des Etablissements GELIS et Cie

de Colomiers, pour ses conseils et l'intérêt qu'il porte à la poursuite de l'étude.

. Monsieur J.B. POURCIEL, Ingénieur à l'Université Paul Sabatier, qui m'a fait bénéficier de son expérience et a pris une part active à cette étude ainsi que pour sa collaboration étroite.

Je tiens également à remercier :

. Madame E. DUFOUR qui a dactylographié ce travail,

. Les membres de l'équipe "Systèmes Informatiques et Simulations" qui m'ont fait bénéficier de leurs expériences en informatique,

. Messieurs R. ZITTEL, D. DAURAT et R. LORTAL qui ont pris en charge le tirage de cette thèse.

Je veux enfin témoigner toute mon amitié à mes camarades de la Division "Systèmes Complexes" pour l'ambiance sympathique qu'ils entretiennent et le soutien qu'ils m'ont toujours manifesté.

Je ne saurais oublier l'aide que m'a apporté la D.G.R.S.T. pour la réalisation de cette étude.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
DESCRIPTION DU FOUR	3
I - DETERMINATION D'UN REGIME NOMINAL DE FONCTIONNEMENT	9
I.1 Modélisation mathématique	10
I.2 Optimisation du régime statique moyen	15
I.2.1. Introduction	15
I.2.2. Définition du critère d'optimisation	16
I.2.3. Méthode d'optimisation	18
I.2.4. Optimisation de la répartition des brûleurs	19
I.2.5. Adjonction de refroidisseurs	20
I.2.6. Conclusion	23
II - TRANSFORMATIONS DU MODELE ET COMMANDE DU FOUR	25
Introduction	25
II.1 Transformations du modèle	26
II.1.1. Linéarisation	26
II.1.2. Approximation fonctionnelle par la méthode de Galerkin	27
II.1.3. Réduction de l'ordre du modèle	31
II.1.4. Conclusion	32
II.2 Régulation autour du régime désiré	32
II.2.1. Introduction	32

II.2.2. Rappel de la méthode	33
II.2.3. Application aux équations du four	34
II.2.4. Intégration des équations	35
II.2.5. Simulations et commentaires	36
II.3 Observation de l'état du système	43
II.3.1. Introduction	43
II.3.2. Rappels sur la théorie des observateurs	44
II.3.3. Application aux équations du four	44
II.3.4. Recalage de l'état au moment de la poussée	49
Conclusion	51
 III - CONDUITE DU FOUR PAR CALCULATEUR NUMERIQUE	 53
Introduction	53
III.1 Interfaces avec le processus	54
III.1.1. Les capteurs	54
III.1.2. Les actionneurs	57
III.2 L'outil microinformatique	57
III.2.1. Le support matériel	57
III.2.2. Le support logiciel : le moniteur temps réel	63
III.3 Analyse organique : les logiciels	65
III.3.1. Les logiciels du MicroMANE	67
A - Acquisition des données	67
B - Commande des vannes	68
C - Surveillance du fonctionnement	70
D - Tâches diverses	71
III.3.2. Les logiciels du MicroLAAS	71
A - Gestion de la liaison téléphonique et calcul de la commande	71
B - Visualisation des mesures	75
C - Stockage	77
III.4 Fonctionnement en temps réel	77
Conclusion	78
 CONCLUSION	 81
ANNEXE I	83
ANNEXE II	91
BIBLIOGRAPHIE	93

INTRODUCTION

La céramique lourde est une industrie à grande consommation d'énergie par le fait qu'elle met en jeu des quantités importantes de produits qui doivent séjourner à des températures élevées (1000°C ou plus). Le séchage et la cuisson dans l'industrie céramique représentent 1,5% de la consommation énergétique totale de la France. Les fours tunnels réalisés actuellement pour la cuisson utilisent 300 à 400 kilothermies par tonne de produits cuits, alors que le minimum théorique est d'une cinquantaine de kilothermies par tonne cuite et les spécialistes de la production céramique pensent que des améliorations sensibles peuvent être apportées.

Une bonne connaissance du fonctionnement thermique des fours de cuisson permet une meilleure maîtrise du profil thermique dans ces fours, ce qui amène des améliorations dans deux directions :

- la diminution du taux de produits détériorés à la sortie
- la diminution de la consommation spécifique d'énergie.

Dans le cadre d'un contrat de prédéveloppement, établi avec les "Etablissements Bernat-Saulière" de Castres, une étude a été entreprise au L.A.A.S. en vue de l'amélioration du fonctionnement d'un four tunnel produisant environ 30 tonnes/jour de pots horticoles. Les objectifs de cette étude sont multiples :

- recherche de la productivité optimale
- régulation du profil thermique de cuisson par microcalculateur
- mise en place d'un système de surveillance.

Notre travail a porté essentiellement sur la régulation et la conduite numérique du four en temps réel. Après avoir décrit le fonctionnement du four, nous avons présenté dans ce mémoire trois aspects de notre étude.

Le premier chapitre constitue un rappel des travaux effectués en vue de la détermination d'un régime nominal de fonctionnement thermique. Nous établissons d'abord le modèle mathématique du four (sous la forme d'un système d'équations différentielles non-linéaires aux dérivées partielles), puis montrons comment utiliser ce modèle pour résoudre le problème de l'optimisation d'un critère de type économique.

Dans le deuxième chapitre, nous développons le calcul d'une loi de commande en boucle fermée du four. D'abord nous exposons les différentes transformations du modèle pour l'obtention d'un modèle linéaire à paramètres localisés en vue de l'application des techniques classiques de la commande optimale. Ensuite nous présentons le calcul de la loi de commande par la minimisation d'un critère quadratique à horizon fini. Enfin nous présentons le calcul d'un estimateur de l'état du système pour la reconstitution du profil de température dans la charge à partir de mesures faites dans le gaz sous la voûte.

Finalement, dans le troisième chapitre, nous décrivons la mise en oeuvre de la loi de commande sur calculateur numérique. Nous décrivons d'abord le support informatique à deux microcalculateurs pour la conduite à distance du processus, ensuite nous décrivons sommairement les logiciels réalisés et le fonctionnement en temps réel du système.

Une note technique complète et détaillée [Réf. 29] a été rédigée sur cette étude; cette note peut donc constituer un document complémentaire à ce mémoire de thèse.

DESCRIPTION DU FOUR

Le four d'industrie céramique faisant l'objet de cette étude est un four tunnel de 50 mètres de long, de section carrée (1,6 m x 1,6 m) utilisé pour la cuisson de pots horticoles (fig. 1) [Ref 1] .

La charge est constituée par un train de chariots de 2,5 m de long, avançant par poussées successives de 50 cm. chacune. Bien que la cadence de poussées des chariots soit un paramètre réglable, elle est maintenue constante pour un type de fonctionnement donné. Le mode de fonctionnement dépend des caractéristiques de construction du four et de la nature des produits à cuire.

Le chauffage est assuré par des brûleurs répartis en quinconce sur les parois verticales du four. Leurs positions sont des paramètres optimisables et leurs débits constituent les variables de commande du four. Chaque groupe de brûleurs est commandable par une vanne motorisée dont la valeur du diaphragme

peut être ajustée d'une façon continue, réglant ainsi le débit d'air nécessaire à la combustion ("air primaire"). Le débit de gaz correspondant est contrôlé par un asservissement local. On peut ainsi régler le coefficient d'excès d'air de combustion.

Une circulation d'air à contre courant ("air secondaire") favorise le refroidissement de la charge dans la zone de sortie du four et son préchauffage dans la zone d'entrée. Le débit d'air secondaire est réglable par l'ouverture du registre des fumées au niveau de la cheminée de soutirage, la pompe d'aspiration fonctionnant à vitesse constante.

Au début de l'étude, le nombre des brûleurs était de vingt, répartis en trois groupes et localisés dans la zone de cuisson. La commande des débits de chaque groupe de brûleurs était proportionnelle à l'écart de température mesurée par rapport à une température de référence (fig. 2).

Une étude des propriétés mécaniques et thermiques des produits rouges, en collaboration avec les spécialistes de la céramique, conduit à définir un régime de cuisson convenable pour le four en question, comme suit (fig. 3) :

- a) la montée en température entre 773°K et 923°K doit se faire en 3,30 heures au minimum.
- b) le séjour des pots à des températures supérieures à 1223°K doit être supérieur à 1.30 heure.
- c) la descente en température entre 923°K et 773°K doit se faire en 3.30 heures au minimum.

Les contraintes a) et c) s'expliquent par l'existence d'un point critique à environ 800°K. Ce point doit être franchi avec un faible gradient de température. Le non-respect de ces deux contraintes entraînerait une grande augmentation du taux de pots fissurés ou cassés à la sortie du four.

La contrainte b) est imposée pour assurer une bonne résistance mécanique des pots cuits.

La cheminée de soutirage est située à 6 m de la porte d'entrée du four. Ce point (cheminée) sera considéré comme l'origine de l'axe des X dans ce mémoire. La porte d'entrée s'ouvre à chaque fois qu'un chariot doit entrer dans le four. La sortie du four est ouverte en permanence (entrée d'air secondaire). Le gaz à l'intérieur du four est le mélange de l'air entrant par la sortie (air secondaire) et des gaz de combustion.

Le profil de température dans le four est très sensible au débit d'air secondaire [Réf. 1]. Cette sensibilité est telle que la zone de feu peut se déplacer de plusieurs mètres selon la valeur de ce débit. Au début de l'étude, le contrôle de ce débit par action sur la position du registre des fumées, était manuel et plus ou moins empirique. Ce débit était modifié en fonction de la qualité des produits à la sortie.

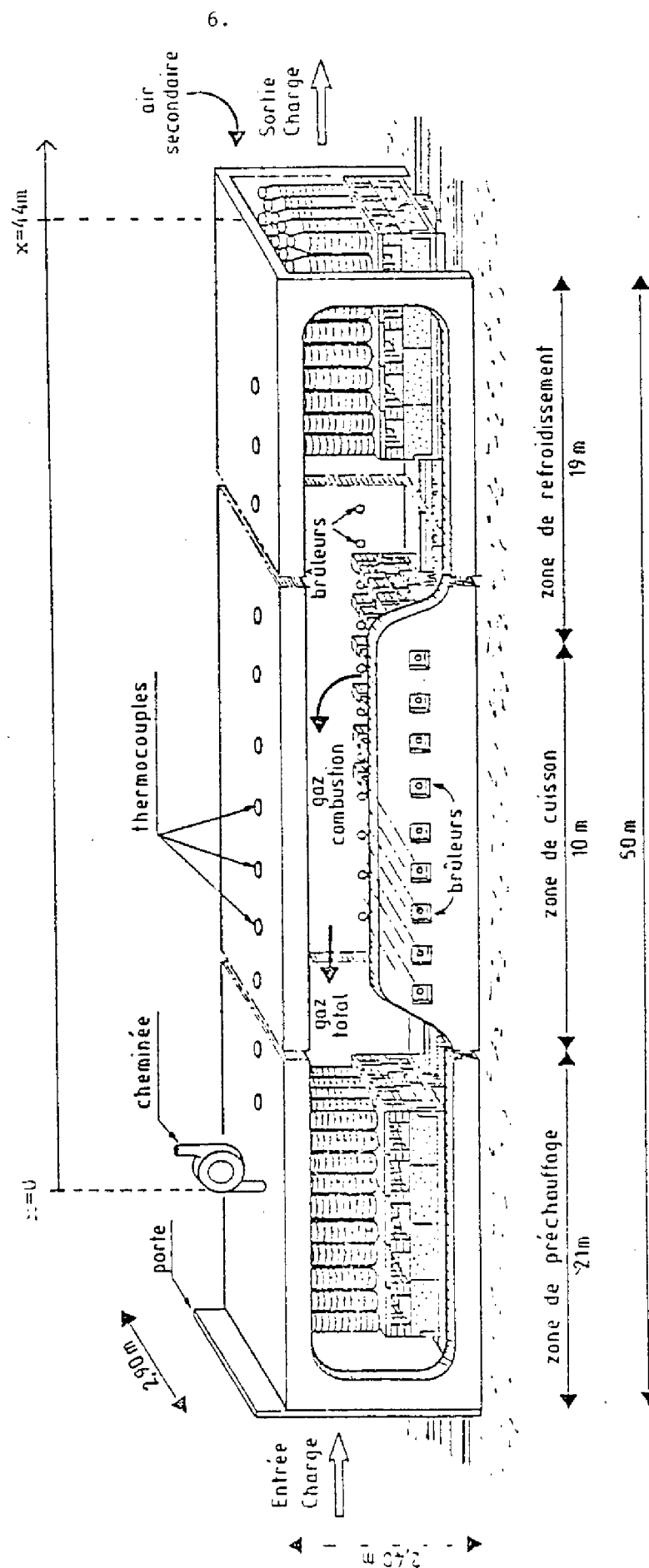


Fig.1 : Schéma du four.

CHAPITRE I

DÉTERMINATION D'UN RÉGIME NOMINAL DE FONCTIONNEMENT

-:-

INTRODUCTION

Le but final de l'étude concerne l'optimisation du fonctionnement thermique du four étudié. L'application des techniques d'optimisation nécessite la connaissance d'un modèle représentatif du fonctionnement du four, d'un régime désiré à atteindre et d'un critère à définir.

Dans ce chapitre nous présentons le modèle mathématique du fonctionnement thermodynamique du four. Ce modèle est obtenu à partir d'un bilan des échanges thermiques et massiques entre la charge, le gaz et les parois du four. Le

modèle obtenu est un système d'équations aux dérivées partielles non linéaires.

Une étude de sensibilité du modèle, par rapport à certains paramètres, a permis de déterminer les paramètres intéressants pour une étude d'optimisation [Réf. 3]. Le profil thermique optimal est obtenu par l'extrémalisation d'un critère économique qui prend en compte une meilleure répartition des variables d'action.

I.1 MODELISATION MATHEMATIQUE

Les équations qui traduisent le fonctionnement thermique du four sont obtenues par l'établissement d'un bilan énergétique tenant compte des transferts de chaleur par convection et rayonnement et des transferts de matière (argile, gaz, air ...). Des hypothèses simplificatrices ont été considérées :

- a - La charge est homogène
- b - L'écoulement des gaz est laminaire et monodimensionnel
- c - Les phénomènes de conduction dans la charge et dans la paroi sont négligeables
- d - La variation temporelle de température de la paroi est négligeable
- e - L'air secondaire est transparent au rayonnement
- f - La température dans la charge est considérée par sa moyenne dans une section verticale dans le sens de la largeur. On considère donc une seule variable d'espace.

Les équations obtenues sont les suivantes [Réf. 1] :

Première équation : bilan thermique sur la charge.

$$\begin{aligned}
 & (e_T \cdot S_T \cdot C_T + e_{CH} \cdot S_{CH} \cdot C_{CH}) \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) \\
 (1.1) \quad & (U_T \cdot e_T \cdot S_T \cdot C_T + U_T \cdot e_{CH} \cdot S_{CH} \cdot C_{CH}) \frac{\partial}{\partial x} T(x, t) = \\
 & A_{TG} (T(x, t) - G(x, t)) + B_{TG} (T^4(x, t) - G^4(x, t)) + B_{TP} (T(x, t) - P(x, t))
 \end{aligned}$$

Deuxième équation : bilan thermique sur le gaz

$$\begin{aligned}
 (1.2) \quad & \frac{\partial}{\partial t} (e_G \cdot S_G \cdot C_G \cdot G(x,t)) - \frac{\partial}{\partial x} (U_G \cdot e_G \cdot S_G \cdot C_G \cdot G(x,t)) = \\
 & A_{TG} (G(x,t) - T(x,t)) + A_{PG} (G(x,t) - P(x,t)) \\
 & + A_{EG} (G(x,t) - E_E(x)) + B_{TG} (G^4(x,t) - T^4(x,t)) \\
 & + B_{PG} (G^4(x,t) - P^4(x,t)) + \sum_{i=1}^{N_b} Q_R \delta(x-x_i) \cdot D_{xi}(t)
 \end{aligned}$$

Troisième équation : bilan thermique sur la paroi

$$\begin{aligned}
 (1.3) \quad & 0 = A_{PG} (P(x,t) - G(x,t)) + A_{PE} (P(x,t) - E) \\
 & + B_{PG} (P^4(x,t) - G^4(x,t)) + B_{TP} (P^4(x,t) - T^4(x,t))
 \end{aligned}$$

(La variation temporelle de température de la paroi est supposée très faible.)

Quatrième équation : bilan massique du gaz

$$(1.4) \quad \frac{\partial}{\partial x} D_{MG} = \frac{\partial}{\partial x} U_G \cdot e_G \cdot S_G = - \sum_{i=1}^{N_b} (x-x_i) \cdot D_{xi} (17,9 + 16,9q)$$

avec les conditions aux limites :

$$T(x=0, t) = 433^\circ K \quad G(x=L, t) = 310^\circ K$$

avec les notations suivantes :

- t : temps (heures)
- x : variable spatiale (m). La cheminée de soutirage est considérée comme l'origine de la variable spatiale.
- T : température de la charge ($^\circ K$). La température d'un chariot et de sa charge est définie par la valeur moyenne dans une section verticale.
- G : température dans le gaz ($^\circ K$).
- P : température de la paroi intérieure du four. Sa variation ne dépend que de la variable spatiale.
- q : coefficient d'excès d'air primaire dans les brûleurs. Cette valeur est la même pour tous les groupes.
- E : température ambiante ($300^\circ K$)
- $E_E(x)$: température au dessous des chariots ($^\circ K$)

e_T	Masse volumique de la charge kg/m^3
S_T	Volume de charge par unité de longueur m^2
C_T	Chaleur spécifique de la charge $\text{kcal/kg/}^\circ\text{K}$
U_T	Vitesse moyenne d'avancement des chariots
e_G	Masse volumique du gaz kg/m^3
S_G	Volume de gaz par unité de longueur m^2
C_G	Chaleur spécifique du gaz $\text{kcal/kg/}^\circ\text{K}$
U_G	Vitesse du gaz m/heure
e_{CH}	Masse volumique moyenne de chariot kg/m^3
S_{CH}	Volume du chariot par unité de longueur m^2
C_{CH}	Chaleur spécifique du chariot $\text{kcal/kg/}^\circ\text{K}$
L	Longueur du four (44m depuis la cheminée de soutirage)
$x_i, i=1, \dots, N_b$	positions des brûleurs (m)
D_{xi}	Débit massique du brûleur situé au point x_i (kg/heure)
$D_{MG}(x,t)$	Débit massique de gaz dans le four (kg/heure)
$D_{MGF}(t)$	Débit d'air secondaire (au point $x = 44 \text{ m}$) (en kg/heure)
Q_R	Pouvoir calorifique du combustible utilisé (kcal/kg) (gaz naturel)
N_b	Nombre de brûleurs.
A_{PE}	Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre la paroi et l'extérieur (kcal/heure/m/ $^\circ\text{K}$)
A_{PG}	Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre le gaz et la paroi (kcal/heure/m/ $^\circ\text{K}$)
A_{TG}	Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre le gaz et la charge (kcal/heure/m/ $^\circ\text{K}$)
A_{EG}	Coefficient associé au transfert de chaleur par convection entre le gaz et la région située au dessous des chariots (kcal/heure/m/ $^\circ\text{K}$)
B_{TG}	Coefficient associé au transfert de chaleur par rayonnement entre la charge et le gaz (kcal/heure/m/($^\circ\text{K}$) ⁴)
B_{PG}	Coefficient associé au transfert de chaleur par rayonnement entre le gaz et la paroi (kcal/heure/m/($^\circ\text{K}$) ⁴)
B_{PE}	Coefficient associé au transfert de chaleur par rayonnement entre la paroi et l'extérieur (kcal/heure/m/($^\circ\text{K}$) ⁴).

Remarques :

a) En posant :

R_{LCh} : longueur d'un chariot (2,5 m)
 R_{MT} : masse de produit à cuire par chariot
 R_{MCh} : masse d'un chariot vide
 D_{mt}^{Ch} : débit massique de produit à cuire
 D_{mch} : débit massique des chariots vides

on a :

$$\begin{aligned}
 e_T \cdot S_T &= R_{MT} / R_{LCh} & D_{mt} &= U_T \cdot e_T \cdot S_T \\
 e_{Ch} \cdot S_{Ch} &= R_{MCh} / R_{LCh} & D_{mCh} &= U_T \cdot e_{Ch} \cdot S_T \\
 D_{MG} &= U_G \cdot e_G \cdot S_G
 \end{aligned}$$

b) Nous donnons ici les valeurs numériques de quelques paramètres définis précédemment :

$$\begin{aligned}
 C_T &= 0,24 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K} & S_G &= 0,57 \text{ m}^2 \\
 C_{Ch} &= 0,28 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{K} & R_{LCh} &= 2,5 \text{ m} \\
 R_{MT} &= 1680 \text{ kg} & R_{MCh} &= 2770 \text{ kg} \\
 E &= 300^\circ\text{K} & Q_R &= 11720 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{K}
 \end{aligned}$$

c) L'avancement des chariots par pas successifs conduit à considérer le modèle dans deux cas de figures selon que l'on raisonne entre deux poussées, ou que l'on considère un régime moyen sur une longue période.

$U_T = 0$ définit le "modèle dynamique entre poussées" capable de décrire convenablement le comportement thermique du four entre deux poussées. Ce modèle ne tient pas compte des poussées.

$U_T \neq 0$ définit une approximation du fonctionnement thermique du four ("modèle dynamique moyen"). Ce modèle est capable de décrire en moyenne le fonctionnement du four sur un horizon temporel suffisamment long.

Pour simplifier, nous utiliserons la même notation pour représenter l'un ou l'autre des deux modèles.

d) Les paramètres considérés optimisables sont :

q : coefficient d'excès d'air primaire

D_{MGF} : débit massique d'air secondaire

t_f : durée entre deux poussées

x_i, D_{x_i}, N_b : positions, débits et nombre des brûleurs.

Les équations (1.1) et (1.2) peuvent être écrites sous la forme condensée :

$$(Eq. 1.5) \quad Z_{AT}(x,t) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) + Z_{BT} \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = Z_{CT}(x,t)$$

$$(Eq. 1.6) \quad Z_{AG}(x,t) \frac{\partial G}{\partial t}(x,t) + Z_{BG} \frac{\partial G}{\partial x}(x,t) = Z_{CG}(x,t)$$

Conditions aux limites : $T(x=0,t) = 433^\circ K$

$G(x=44,t) = 310^\circ K$

Avec :

$$Z_{AT} = \frac{R_{MT} C_T}{R_{LCH}} + \frac{R_{MCH} C_{CH}}{R_{LCH}}$$

$$Z_{BT} = U_T \frac{R_{MT} C_T + R_{MCH} C_{CH}}{R_{LCH}}$$

$$Z_{CT} = A_{TG} (T-G) + B_{TG} (T^4 - G^4) + B_{TP} (P^4 - T^4)$$

$$Z_{AG} = S_G e_G C_G + S_G e_G \cdot G \cdot \frac{\partial C_G}{\partial G} + S_G \cdot C_G \cdot G \cdot \frac{\partial e_G}{\partial G}$$

$$Z_{BG} = - \left[D_{MG} \cdot C_G + D_{MG} \cdot G \cdot \frac{\partial C_G}{\partial G} \right]$$

$$Z_{CG} = A_{TG} (G-T) + B_{TG} (G^4 - T^4) + A_{PG} (G-P) + B_{PG} (G^4 - P^4) + A_{EG} (E-G) + \\ (Q_R - (17,9 + 16,9 \cdot q) G \cdot C_G) D_{GN}(x,t) / 0,5$$

Modèle dynamique entre poussées

Ce modèle est obtenu en annulant la vitesse d'avancement des chariots (chariots immobiles). Il représente exactement le fonctionnement du four sans tenir compte de la poussée. Il est donc valable sur l'horizon de temps séparant deux poussées successives.

Modèle dynamique moyen :

Ce modèle est obtenu en supposant que les chariots avancent avec une vitesse constante (longueur de la poussée divisée par sa période). Il représente approximativement le fonctionnement du four sur plusieurs poussées.

Modèle statique moyen :

Ce modèle est obtenu en annulant les dérivées par rapport au temps du modèle dynamique moyen

$$(1.7) \quad Z_{BT} \frac{dT}{dx} = Z_{CT}$$

$$(1.8) \quad Z_{BG} \frac{dG}{dx} = Z_{CG}$$

Il peut décrire le régime moyen permanent du fonctionnement thermique du four. Il a été utilisé pour l'identification de certains paramètres mal connus [Réf. 1]. Ce modèle sera utilisé pour l'optimisation de la productivité du four.

I.2 OPTIMISATION DU REGIME STATIQUE MOYENI.2.1. Introduction

Au paragraphe précédent, nous avons établi le modèle statique moyen du fonctionnement du four. Dans ce paragraphe nous allons déterminer le régime nominal de fonctionnement en utilisant ce modèle, et ceci par l'optimisation d'un critère économique tout en tenant compte des contraintes de cuisson. Les paramètres d'optimisation sont ceux par rapport auxquels la solution est la plus sensible.

Après avoir défini le critère à optimiser et la méthode utilisée nous présentons les résultats obtenus en deux phases :

Phase 1 : [Réf. 5] étude de la meilleure répartition des brûleurs (variables d'action). En particulier l'adjonction de deux groupes de brûleurs dans les zones critiques (773°K - 923°K).

Phase 2 : étude des améliorations apportées par l'introduction d'entrées d'air ambiant et de soutirage de gaz, et ceci par l'étude de leurs emplacements, leurs nombres et leurs débits moyens.

I.2.2. Définition du critère d'optimisation

C'est un critère économique basé sur l'estimation du bénéfice et pondéré par des termes de pénalisation en fonction des contraintes thermiques sur la charge (fig. 3). Le bénéfice réalisé peut être calculé comme suit :

$$B(\underline{p}) = \text{Prod}(\underline{p}) \cdot (P_v - C_p) - \text{Cons}(\underline{p}) \cdot P_c - C_F$$

où

- $\underline{p}$: vecteur des paramètres d'optimisation
- Prod : Production horaire (kg/h)
- P_v : Prix moyen de vente des produits cuits (Frs/kg)
- C_p : Coût à la production (Frs/kg)
- Cons : Consommation globale de combustible par heure (kg)
- P_c : Prix du combustible (Frs/kg)
- C_F : coût fixe à la production (Frs/h)

Le critère d'optimisation s'écrit sous la forme :

$$J(p) = B(\underline{p}) - \text{Pen}(\underline{p})$$

Pen : Pénalisation en cas de violation des contraintes thermiques sur la charge.

Nous avons cherché à maximiser le critère avec des pénalisations externes [Réf. 9]. Elles sont calculées en définissant les durées de préchauffage, de cuisson et de refroidissement de la façon suivante : (fig. 1.1).

$$P_{\text{mon}} = \begin{cases} k (3,5 - t_{\text{mon}}) & \text{si } t_{\text{mon}} > 3 \text{ h } 30 \\ 0 & \text{si } t_{\text{mon}} \leq 3 \text{ h } 30 \end{cases}$$

$$P_{\text{cui}} = \begin{cases} k (1,5 - t_{\text{cui}}) & \text{si } t_{\text{cui}} > 1 \text{ h } 30 \\ 0 & \text{si } t_{\text{cui}} \leq 1 \text{ h } 30 \end{cases}$$

$$P_{\text{des}} = \begin{cases} k (3,5 - t_{\text{des}}) & \text{si } t_{\text{des}} > 3 \text{ h } 30 \\ 0 & \text{si } t_{\text{des}} \leq 3 \text{ h } 30 \end{cases}$$

$$t_{\text{mon}} = L_{\text{mon}} / \text{Vit}$$

$$L_{\text{cui}} = L_{\text{cui}} / \text{Vit}$$

$$t_{\text{des}} = L_{\text{des}} / \text{Vit}$$

Vit est la vitesse moyenne d'avancement des chariots; L_{mon} , L_{cui} et L_{des} sont définis en (fig. 1.2).

Le coefficient K doit être choisi suffisamment grand pour satisfaire les contraintes.

Les gaz prélevés au niveau de la cheminée de soutirage sont utilisés dans les séchoirs (installés à côté du four). Cette récupération n'a pas été chiffrée dans l'estimation du bénéfice du fait du fonctionnement discontinu des séchoirs et du fait de sa faible contribution dans le bénéfice.

La connaissance de la relation entre le taux de produits détériorés et le non respect des contraintes aurait pu être chiffrée dans le critère en terme de pertes. Ce terme aurait remplacé le terme de pénalisation dans le critère d'optimisation. Mais cette relation n'est pas connue des spécialistes de la céramique.

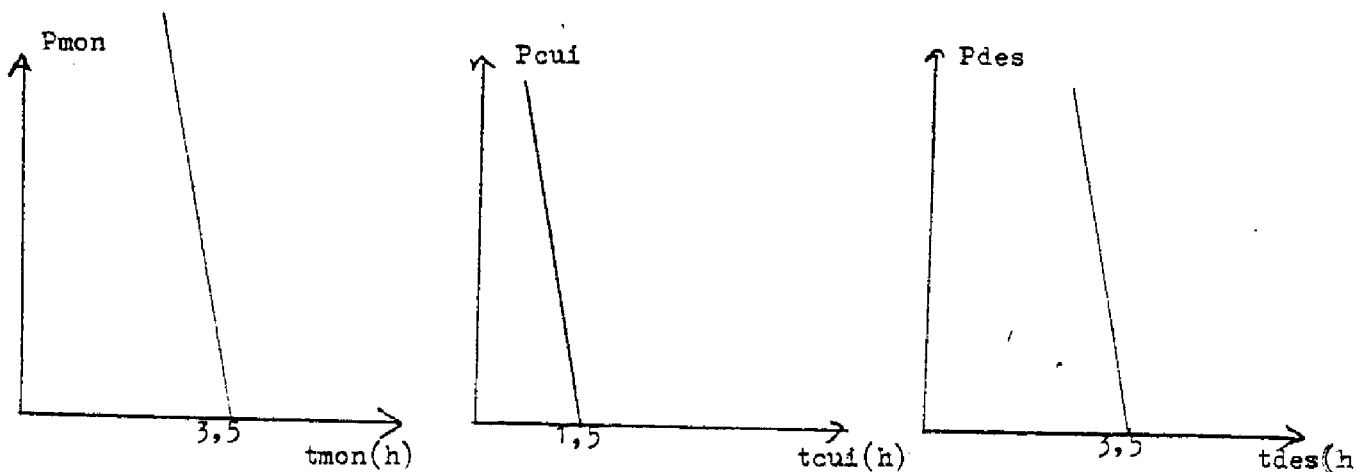


Fig. 1.1 Calcul des pénalisations

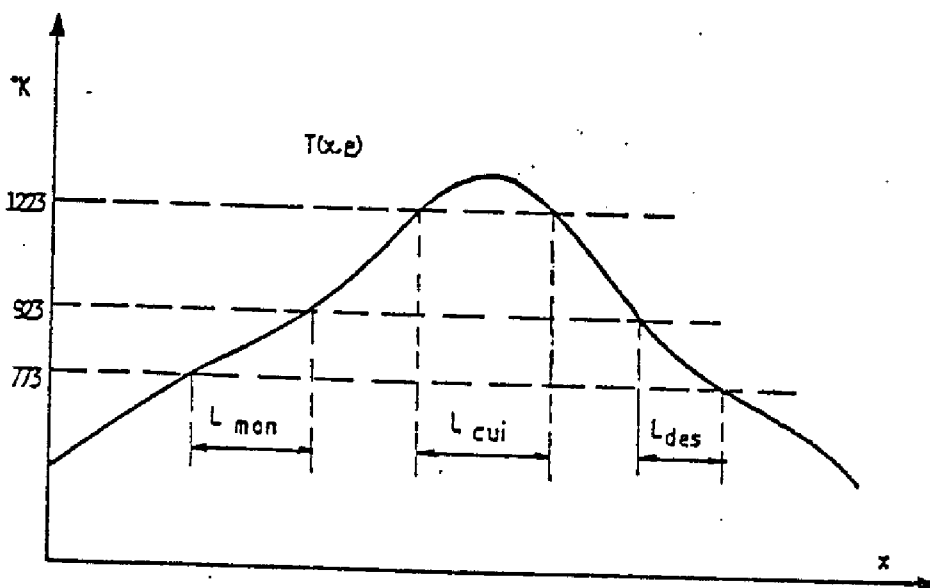


Fig. 1.2

I.2.3. Méthode d'optimisation

La méthode utilisée pour la maximisation du critère est celle de Powell [Réf. 7] largement utilisée pour son efficacité [Réf. 8]. C'est une méthode de recherche directe selon les directions conjuguées (fig. 1.3). Elle présente l'avantage d'éviter le calcul explicite du gradient. L'organigramme de principe est donné dans la figure (1.4).

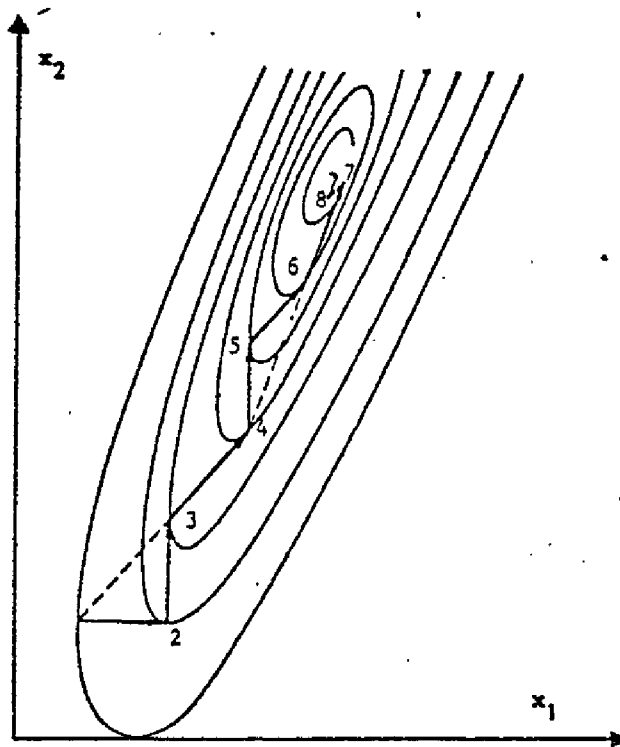


Fig. 1.3 Méthode de Powell dans le cas de deux variables

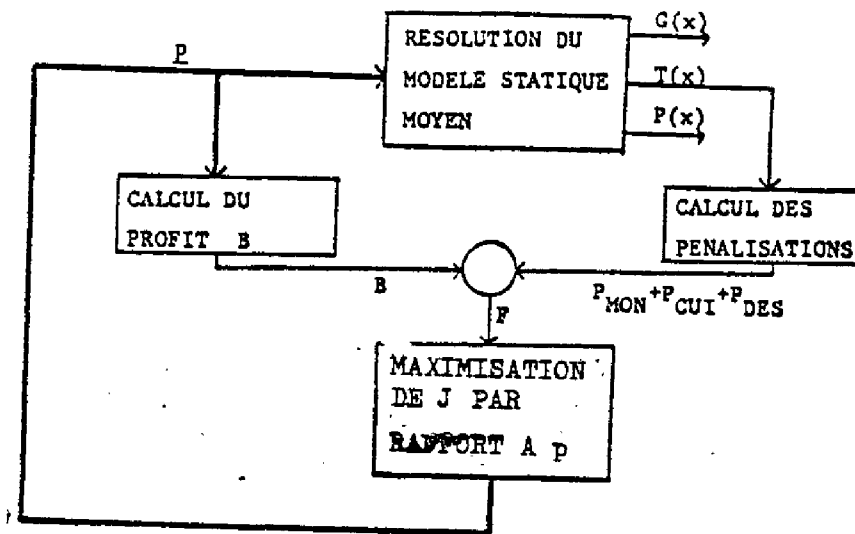


Fig. 1.4 Optimisation du régime de fonctionnement

I.2.4. Optimisation de la répartition des brûleurs

Partant de la configuration initiale (20 brûleurs répartis en 3 groupes et installés dans la zone de cuisson), la meilleure configuration est obtenue par l'adjonction de deux groupes de brûleurs : un dans la zone de pré-chauffage et un autre dans la zone de refroidissement. Les variables d'optimisation et leurs valeurs obtenues sont les suivantes :

Débit d'air secondaire 1914 kg/heure

Excès d'air aux brûleurs 0,33

Vitesse moyenne d'avancement des chariots 1,37 m/heure

Premier groupe de 4 brûleurs installés à partir de l'abscisse 9,5 m, avec un débit moyen de 1,13 kg/heure

Deuxième groupe de 9 brûleurs installés à partir de l'abscisse 15,5 m, avec débit moyen nul (ce groupe existait avant le début de l'étude).

Troisième groupe de 6 brûleurs installés à partir de l'abscisse 20 m, avec un débit moyen de 2,38 kg/heure.

Quatrième groupe de 4 brûleurs installés à partir de l'abscisse 23 m, avec un débit moyen de 2,51 kg/heure.

Cinquième groupe de 4 brûleurs installés à partir de l'abscisse 36 m, avec un débit moyen de 1,84 kg/heure.

L'augmentation du profit par rapport à la configuration initiale est de 37%.

Le profil moyen $T(x)$ obtenu est représenté dans la figure (1,5).

1.2.5. Adjonction de refroidisseurs

Partant de la configuration obtenue au paragraphe précédent, l'idée est d'introduire des refroidisseurs afin d'augmenter les variations de gradient de température dans la charge, dans les zones où aucune contrainte thermique n'est à respecter. Ceci va amener une augmentation de la vitesse moyenne des chariots et donc une augmentation de la productivité horaire.

Le terme refroidisseur désigne une entrée d'air à température ambiante (300°K) ou un soutirage de gaz vers l'extérieur, gaz qui sortira à la température $G(x,t)$. Le nombre, les positions et les débits moyens de ces entrées et de ces soutirages sont les paramètres à optimiser, ainsi que les débits moyens de gaz aux brûleurs (la position des brûleurs n'est pas remise en cause).

L'introduction de refroidisseurs entraîne des modifications dans les équations du four. Seules les équations du bilan thermique et du bilan massique sur le gaz sont modifiées de façon explicite. Les autres équations (bilan thermique sur la charge et bilan thermique sur la paroi) ne sont pas modifiées. Les équations (1.2) et (1.4) deviennent :

Bilan thermique sur le gaz :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (e_G \cdot S_G \cdot C_G \cdot G(x,t)) - \frac{\partial}{\partial x} (U_G \cdot e_G \cdot S_G \cdot C_G \cdot G(x,t)) = \\ A_{TG} (T(x,t) - G(x,t)) + A_{GP} (P(x,t) - G(x,t)) + \\ A_{GE} (E_G(x,t) - G(x,t)) + B_{GT} (T^4(x,t) - G^4(x,t)) + B_{GP} (P^4(x,t) - G^4(x,t)) \\ + \sum_{i=1}^{N_b} \delta(x-x_i) D_{x_i}(t) + \sum_{j=1}^{N_t} \delta(x-x_j) D_{x_j}(t) C_p (G_{x_j}(t) - E) \end{aligned}$$

Bilan massique sur le gaz :

$$\frac{\partial}{\partial t} D_{MG} = \sum_{i=1}^{N_b} \delta(x-x_i) \cdot D_{x_i}(t) (17,9 + 16,9 \cdot q) + \sum_{j=1}^{N_t} \delta(x-x_j) D_{x_j}(t)$$

où N_t : nombre d'ouvertures introduites

D_{x_j} : débit d'entrée d'air ou de soutirage point x_j avec :

$$\begin{aligned} D_{x_j} &> 0 \text{ pour une entrée d'air} \\ D_{x_j} &< 0 \text{ pour un soutirage} \end{aligned}$$

Notons que :

$$\begin{array}{ll} \text{si } D_{x_j} > 0 & G_{x_j} = E \quad : \text{température ambiante} \\ \text{si } D_{x_j} < 0 & G_{x_j} = G(x,t) \end{array}$$

La solution optimale est obtenue en ajoutant deux entrées d'air ambiant et un soutirage. Nous avons obtenu les résultats suivants :

- Débit d'air secondaire au four 2488 kg/h
- Coefficient d'excès d'air primaire 0,29
- Vitesse moyenne d'avancement des chariots 1,56 m/heure
- La position et le nombre des brûleurs restent inchangés, seulement les débits moyens changent :

Premier groupe	1,69 kg/h
Deuxième groupe	0,97 kg/h
Troisième groupe	2,8 kg/h
Quatrième groupe	2,24 kg/h
Cinquième groupe	1,84 kg/h

- Première entrée d'air ambiant :

Position : 13,5 m

Débit moyen : 220 kg/h

- Deuxième entrée d'air ambiant :

Position : 33 m

Débit moyen : 181 kg/h

- Soutirage

Position : 37,5 m

Débit moyen : 610 kg/h

Le profil de température correspondant est représenté en figure (1.6).

L'effet des entrées d'air ambiant est d'accentuer les variations du gradient de température dans le four. Ceci permet l'avancement plus rapide des chariots à cause de l'allongement spatial des paliers de température dans les zones critiques. Le soutirage a pour effet de diminuer la température de sortie de la charge.

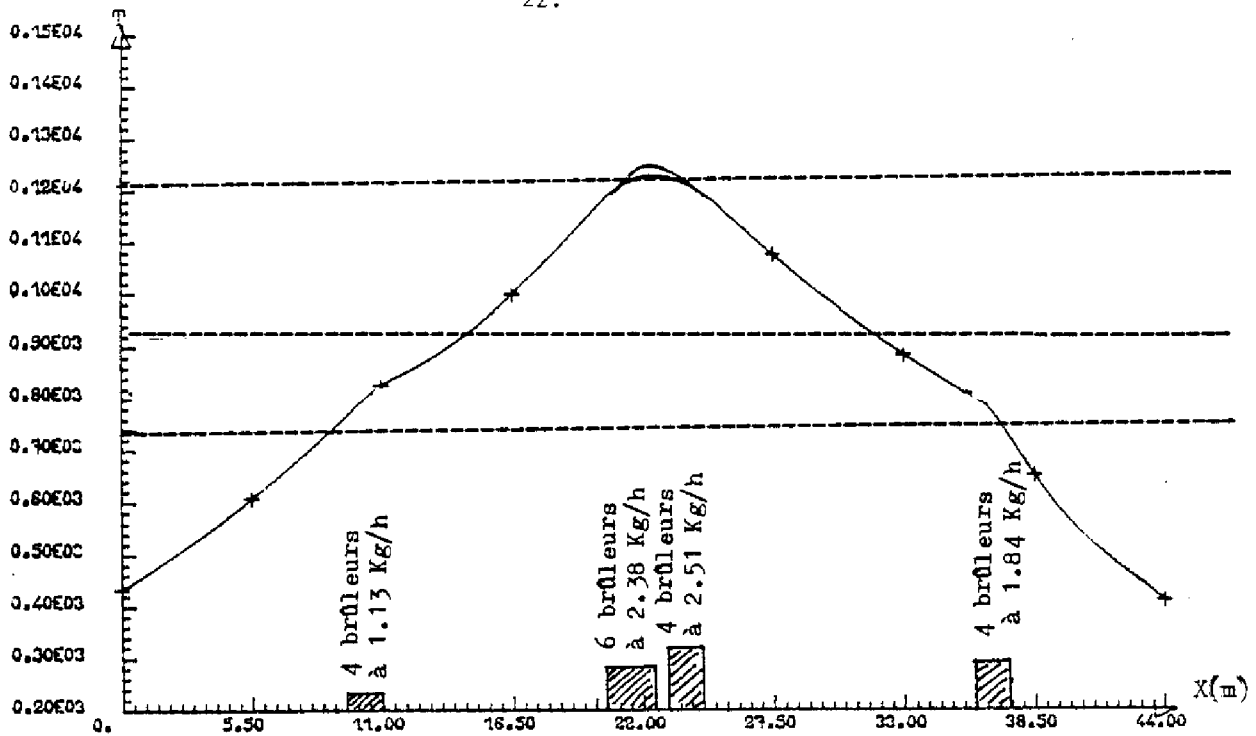


fig. 1.5 : Adjonction de deux groupes de brûleurs latéraux

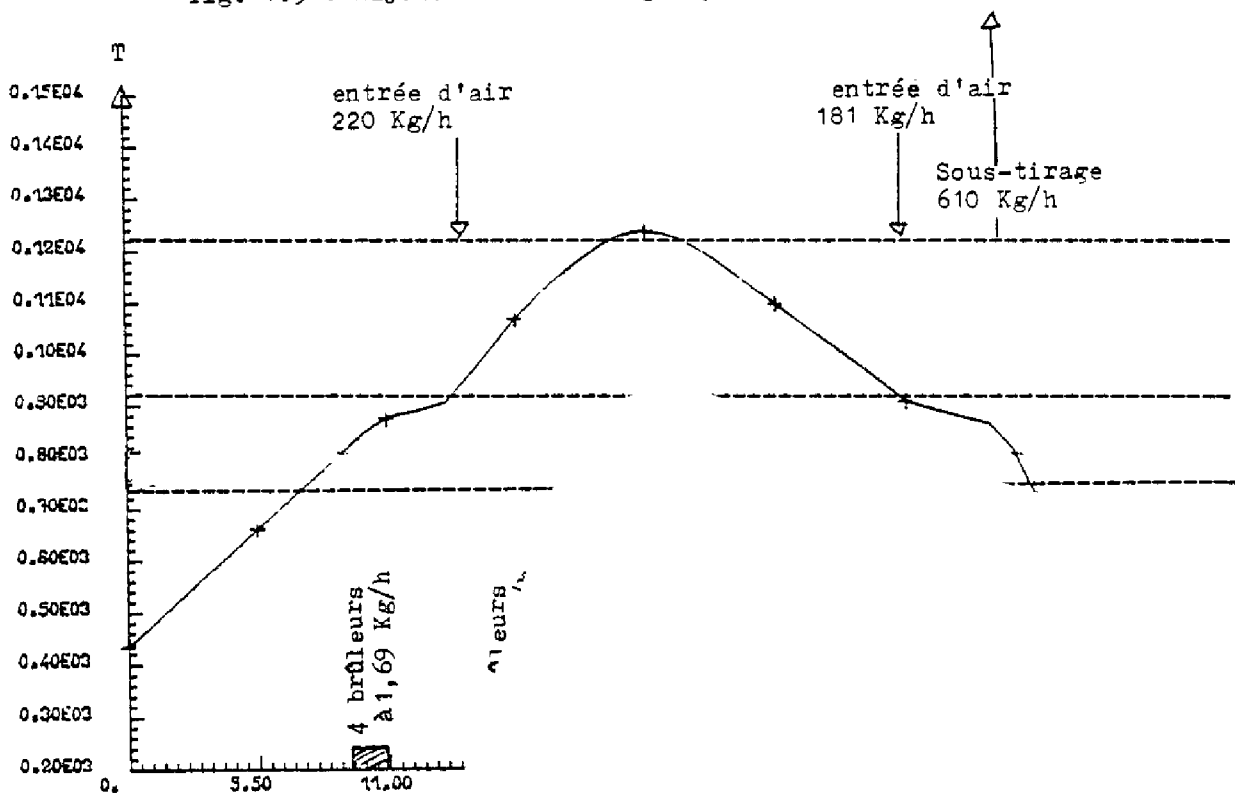


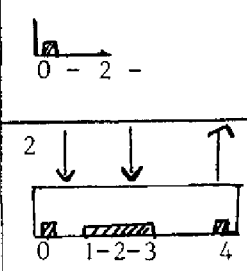
fig. 1.6 : Intro

I.2.6. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre ont montré que des modifications de structure de commande apportent des améliorations importantes sur le fonctionnement du four. Le gain apporté par l'introduction de deux groupes latéraux de brûleurs est confirmé par les résultats obtenus sur le four. En effet, l'introduction du premier groupe dans la zone de préchauffage a déjà permis l'augmentation de 15% de la production. Le deuxième groupe est aussi installé mais l'augmentation de production qu'il a apportée n'a pas été encore évaluée.

L'introduction des entrées d'air ambiant et du soutirage est confirmation de cette technique dans la construction de fours

résume les performances des deux configurations avant le début de cette étude, à savoir une zone de cuisson.

		Production horaire	Bénéfice horaire (estimé)	Temps entre deux poussées
	3 kg/t	672 kg/h	466 F/h	30 mn
	39 kg/t	927 kg/h	646 F/h	22 mn
	4. kg/h	44,5 kg/t	1055 kg/h	730 F/h
				19 mn

On constate en particulier l'intérêt de la configuration 1 du point de vue de la consommation énergétique relative à la production. Cette configuration sera retenue pour la suite de l'étude en raison de la plus faible consommation relative et également en raison de la difficulté de mesurer les débits des entrées d'air ou du soutirage dans le four.

CHAPITRE II

TRANSFORMATIONS DU MODÈLE ET COMMANDE DU FOUR

-:-

INTRODUCTION

Dans le premier chapitre, nous avons établi un modèle mathématique du fonctionnement thermodynamique du four.

Dans ce chapitre nous développons le calcul d'une boucle de commande qui régule le système autour de son régime thermique désiré. Ce régime est celui obtenu dans le chapitre précédent par optimisation statique et que nous appellerons par la suite régime nominal de fonctionnement.

Le modèle obtenu est non linéaire et à paramètres répartis. Il est mal adapté à l'usage des techniques de commande des systèmes. Dans la première partie de ce chapitre nous présentons les différentes techniques utilisées pour la

transformation du modèle afin d'avoir une représentation à paramètres localisés, soit successivement :

- la linéarisation autour du régime nominal
 - l'approximation fonctionnelle par la méthode de Galerkin
- pour l'obtention d'un modèle à paramètres localisés
- la réduction de l'ordre du modèle obtenu après l'étude des dynamiques.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présentons le calcul d'une boucle de commande par minimisation d'un critère quadratique à horizon fini. Cet horizon est l'intervalle de temps entre deux poussées successives. Une forte pondération sur l'écart de température à l'instant final permettra de rendre l'écart entre le profil de température dans le four et le profil nominal aussi petit que possible.

Dans les deux parties précédentes nous avons supposé mesurable le profil de température dans la charge à l'intérieur du four. En réalité, il n'est pas mesurable et on dispose uniquement de douze thermocouples pour la mesure de température dans le gaz. Dans la troisième partie de ce chapitre nous développons le calcul d'un observateur de l'état du système à partir des mesures effectuées dans le gaz.

II.1 TRANSFORMATIONS DU MODELE

II.1.1. Linéarisation

On cherche à obtenir un modèle à paramètres répartis linéaire capable de décrire le fonctionnement du four. Pour cela on suppose que le four travaille dans un voisinage du régime nominal sans trop s'en éloigner. Ce régime est défini en I.2.4.

Soit les notations :

$$T_N(x) = T(x) \text{ nominale}$$

$$G_N(x) = G(x) \text{ nominale}$$

$$\underline{U}_N(x) = \underline{U} \text{ nominal}$$

Les profils de température dans la charge et dans le gaz, et la commande peuvent s'écrire en termes d'écart sous la forme :

$$T_V(x,t) = T(x,t) - T_N(x)$$

$$G_V(x,t) = G(x,t) - G_N(x)$$

$$\underline{U}_V(t) = \underline{U}(t) - \underline{U}_N$$

$T_N(x)$, $G_N(x)$ et $\underline{U}_N$ ont été obtenus par optimisation statique du fonctionnement du four.

Rappelons que :

$T(x,t)$: profil de température dans la charge à l'instant t

$G(x,t)$: profil de température dans le gaz à l'instant t

Les équations (1.5) et (1.6) sont développées en série de Taylor avec troncature au premier ordre.

$$(2.1) \quad Z(x, T, G, \underline{U}) = Z(x, T_N, G_N, \underline{U}_N) + \left[\frac{\partial Z}{\partial T} \quad \frac{\partial Z}{\partial G} \right] \begin{bmatrix} T_V(x, t) \\ G_V(x, t) \end{bmatrix} + \\ \left[\frac{\partial Z}{\partial U_1} \quad \dots \quad \frac{\partial Z}{\partial U_5} \right] \cdot \underline{U}_V(t)$$

(Les dérivées sont calculées au point $(T_N, G_N, \underline{U}_N)$)

Le développement nous donne les équations du modèle linéaire à paramètres répartis :

$$(2.2) \quad \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} T_V \\ G_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_{22} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} T_V \\ G_V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_V \\ G_V \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} U_{11} & \dots & U_{15} \\ U_{21} & \dots & U_{25} \end{bmatrix} \underline{U}_V + \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$$

Les coefficients R_{ij} , Q_{ij} , ..., S_i sont donnés en Annexe 1.

Notons que :

$R_{11} = 0$, $S_2 = 0$ pour décrire le fonctionnement dynamique entre poussées

$S_1 = 0$, $S_2 = 0$ pour décrire le fonctionnement dynamique moyen sur plusieurs poussées.

II.1.2. Approximation fonctionnelle par la méthode de Galerkin

A. Rappel de la méthode :

C'est une méthode d'approximation fonctionnelle qui permet d'obtenir pour un système une représentation sous forme d'équations différentielles ordinaires à partir d'une représentation sous forme d'équations différentielles aux dérivées partielles, et ceci en utilisant un nombre fini de fonction de base.

Supposons que l'on dispose d'une équation aux dérivées partielles sous la forme :

$$\frac{\partial z}{\partial t}(x,t) = M[z(x,t)] + N(x) \cdot \underline{U}(t) + Q(x)$$

$$(2.3) \quad L[z(x,t)] = 0 \quad \text{conditions aux limites}$$

$$z(x, t_0) = z_0(x) \quad \text{conditions initiales}$$

où M et L ne comportent que des coefficients et/ou des termes de dérivations qui sont exclusivement fonction de x.

$z(x,t)$ est approximé par :

$$\hat{z}(x,t) = \sum_{i=1}^N Q_i(t) \cdot f_i(x)$$

où $f_i(x)$ sont les fonctions de base.

La substitution de $\hat{z}(x,t)$ dans les équations (2.3) permet de définir les trois résidus [Réf. 11] :

a) résidu de l'équation

$$R = \frac{\partial \hat{z}}{\partial t} - M \hat{z} - N(x) \cdot \underline{U}(t) - Q(x)$$

b) résidu aux limites :

$$R_L = L[\hat{z}]$$

c) résidu initial :

$$R_0 = \hat{z}(x, t_0) - z_0(x)$$

On dispose de plusieurs méthodes de minimisation de ces trois résidus. On distingue trois classes de méthodes [Réf. 12] :

a) Méthodes intérieures : où le résidu aux limites R_L est toujours nul et ceci par un choix approprié des fonctions de base.

b) Méthodes aux limites : où le résidu de l'équation R est toujours nul.

c) Méthodes mixtes : où l'on minimise les deux résidus à la fois.

La méthode de Galerkin est une méthode intérieure. Elle s'adapte au cas de notre système où l'on a des conditions aux limites à satisfaire

(T(O,t) = 433°K, G(L,t) = 300°K). Elle est définie par la minimisation des résidus de la façon suivante :

a) Les fonctions de base sont choisies telles que le résidu R_L soit nul :

$$L[f_i(x)] = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^N a_i(t) L[f_i(x)] = 0$$

b) Les valeurs initiales des fonctions de base sont obtenues en minimisant le critère suivant par rapport aux $a_i(t_0)$

$$J_1 = \langle R_o, R_o \rangle \quad \text{où} \quad \langle f_1, f_2 \rangle = \int f_1 \cdot f_2 \, dx$$

c) On définit le critère J_2 de la forme :

$$J_2 = \langle R, R \rangle$$

La minimisation de ce critère par rapport aux $\dot{a}_i$ donne un système différentiel de la forme :

$$F_g \dot{\underline{a}} = A_g \underline{a} + B_g \underline{u} + \underline{d}_g$$

où $F_g \dot{ij} = \langle f_i, f_i \rangle$

$$A_g \dot{ij} = \langle f_i, f_j \rangle$$

$$B_g \dot{ij} = \langle f_i, N_j \rangle$$

$$d_g \dot{i} = \langle f_i, Q \rangle$$

Le choix des fonctions de base est très important pour la stabilité de la solution et la validité du système obtenu. De plus il n'y a pas de directives de choix de ces fonctions et il faut traiter chaque problème séparément.

B. Application aux équations du four :

La méthode de Galerkin est utilisée pour l'approximation des équations du four (Eq. 2.2) en utilisant cinq fonctions de base pour l'équation de la charge et cinq autres fonctions pour l'équation du gaz.

$$(2.4) \quad \begin{aligned} T_v(x,t) &= \sum_{i=1}^5 a_i(t) \cdot \varphi_i(x) \\ G_v(x,t) &= \sum_{i=1}^5 b_i(t) \cdot \psi_i(x) \end{aligned}$$

Le choix des fonctions de base φ_i et ψ_i est guidé par l'étude de la réponse du système à des perturbations particulières (annexe I).

En rapportant (2.4) dans l'équation (2.2) on obtient les modèles à paramètres localisés du four.

- modèle entre poussées (chariots immobiles)

$$(2.5) \quad \begin{bmatrix} \circ \\ \underline{a} \\ \circ \\ \underline{b} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \underline{a} \\ \underline{b} \end{bmatrix} + B \underline{u}_v + \underline{d}$$

- modèle à long terme (vitesse moyenne constante non nulle)

$$(2.6) \quad \begin{bmatrix} \circ \\ \underline{a} \\ \circ \\ \underline{b} \end{bmatrix} = A_1 \begin{bmatrix} \underline{a} \\ \underline{b} \end{bmatrix} + B_1 \underline{u}_v$$

Une discrétisation des fonctions de base en 89 points (soit un pas de discrétisation de l'espace égal à la longueur de la poussée : 0,5 m) permet de définir les matrices de sortie du système.

$$(2.7) \quad \begin{aligned} \underline{T}_v(t) &= C_\varphi \cdot \underline{a}(t) \\ \underline{G}_v(t) &= C_\psi \cdot \underline{b}(t) \end{aligned}$$

où

$$C_\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \dots & \varphi_5(0) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_1(44) & \dots & \varphi_5(44) \end{bmatrix}$$

$$C_\psi = \begin{bmatrix} \psi_1(0) & \dots & \psi_5(0) \\ \vdots & & \vdots \\ \psi_1(44) & \dots & \psi_5(44) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{et} \quad T_v(x,t) &= T(x,t) - T_N(x) \\ G_v(x,t) &= G(x,t) - G_N(x) \end{aligned}$$

Le pas de discrétisation choisi facilite la représentation de la poussée qui est modélisée par un décalage vers la sortie du profil de température dans la charge.

II.1.3. Réduction de l'ordre du modèle

L'analyse de la dynamique du système (2.5) amène à décomposer celui-ci en deux sous-systèmes. Un sous-système lent qui correspond à la dynamique des transferts thermiques dans la charge, et un sous-système rapide correspondant à la dynamique des transferts dans le gaz.

La matrice A du système (2.5) peut s'écrire sous la forme partitionnée :

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

on définit la matrice A_0 :

$$A_0 = A_{11} - A_{12} A_{22}^{-1} A_{21}$$

Pour l'application des techniques des perturbations singulières, nous avons vérifié que le système (2.5) satisfait les deux conditions

$$a) \quad \frac{\lambda_{\max} A_0}{\lambda_{\min} A_{22}} \ll 1$$

où $\lambda_{\max} A_0$ est le plus grand des modules des valeurs propres de A_0
 $\lambda_{\min} A_{22}$ est le plus petit des modules des valeurs propres de A_{22}

$$b) \quad \|A_{22}^{-1}\| \ll \frac{1}{3} \quad (\|A_0\| + \|A_{12}\| \cdot \|A_{22}^{-1} \cdot A_{21}\|)^{-1}$$

où $\|A\|$: norme de A (ex : $\text{trace} \sqrt{A \cdot A'}$)

La condition a) montre que le système est à deux échelles de temps [Réf. 13]. La condition b) montre que la décomposition en deux sous-systèmes est possible dans la base initiale ($a_i(t)$, $b_i(t)$) [Réf. 14].

Dans ce mémoire nous allons nous limiter à la représentation du système par sa partie lente. Cette représentation s'est avérée suffisante après les simulations effectuées.

La partie lente est obtenue en supposant que le sous-système rapide est toujours en régime permanent, soit :

$$(2.8) \quad \underline{\dot{b}} = -A_{22}^{-1} A_{21} \cdot \underline{a} - A_{22}^{-1} B_2 \cdot \underline{u}_v$$

En remplaçant (2.8) dans l'équation (2.5) on obtient la représentation réduite du système :

$$(2.9) \quad \dot{\underline{a}} = \underline{A}_L \cdot \underline{a} + \underline{B}_L \cdot \underline{u}_V + \underline{d}_L$$

où

$$\begin{aligned} \underline{A}_L &= \underline{A}_O \\ \underline{B}_L &= \underline{B}_1 - \underline{A}_{12} \underline{A}_{22}^{-1} \underline{B}_2 \quad \text{avec} \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} \underline{B}_1 \\ \underline{B}_2 \end{bmatrix} \\ \underline{d}_L &= \underline{d}_1 \quad \underline{d} = \begin{bmatrix} \underline{d}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La matrice de sortie dans le gaz est obtenue en remplaçant (2.8) dans l'équation (2.7). On obtient ainsi :

$$(2.10) \quad \underline{G}_V(x,t) = \underline{C}_O \cdot \underline{a}(t) + \underline{D}_O \cdot \underline{u}_V(t)$$

$$\text{avec :} \quad \underline{C}_O = - \underline{C}_\Psi \cdot \underline{A}_{22}^{-1} \cdot \underline{A}_{21} \quad \text{et} \quad \underline{D}_O = - \underline{C}_\Psi \underline{A}_{22}^{-1} \cdot \underline{B}_2$$

II.1.4. Conclusion

Après l'application des différentes transformations sur les équations du four, on obtient la représentation du système sous la forme suivante :

$$(2.11) \quad \begin{aligned} \dot{\underline{a}} &= \underline{A}_L \cdot \underline{a} + \underline{B}_L \cdot \underline{u}_V + \underline{d}_L \\ \underline{T}_V &= \underline{C}_\Psi \cdot \underline{a} \\ \underline{G}_V &= \underline{C}_O \cdot \underline{a} + \underline{D}_O + \underline{u}_V \end{aligned}$$

Les développements numériques correspondant aux différentes étapes des transformations sont donnés en Annexe I.

II.2 REGULATION AUTOUR DU REGIME DESIRE

II.2.1. Introduction

Dans cette partie nous déterminons une loi de commande en boucle fermée par la minimisation d'un critère quadratique à horizon fini. L'objectif est de maintenir le profil thermique nominal dans le four. Le modèle

d'ordre réduit (2.11) est utilisé pour calculer cette commande.

L'approche du problème par l'augmentation du vecteur d'état pour tenir compte du vecteur $\underline{d}_L$ de l'équation (2.11) a été développée dans des travaux précédents. Cette approche double la dimension du problème et présente des problèmes d'intégration numérique. En plus elle nécessite une précision importante des calculs, ce qui est difficile à réaliser sur le système temps réel prévu pour la mise en oeuvre de la loi de commande.

Nous avons préféré l'utilisation de l'approche développée par Jhonson [Réf. 16] où le terme $\underline{d}$ est considéré comme une perturbation. Après avoir rappelé le principe de cette méthode, nous donnons les résultats de simulations obtenus.

II.2.2. Rappel de la méthode

Soit le système :

$$(2.12) \quad \begin{aligned} \dot{\underline{x}}(t) &= A \cdot \underline{x}(t) + B \cdot \underline{u}(t) + F \cdot \underline{w}(t) \\ y(t) &= C \cdot \underline{x}(t) \end{aligned}$$

$$\text{où } \begin{aligned} \underline{x} &\in \mathbb{R}^n & \underline{y} &\in \mathbb{R}^m \\ \underline{u} &\in \mathbb{R}^r & \underline{w} &\in \mathbb{R}^p \end{aligned}$$

et on suppose que la perturbation $\underline{w}(t)$ vérifie l'équation :

$$\dot{\underline{w}}(t) = D \cdot \underline{w}(t)$$

Cherchons la commande $\underline{u}(t)$, par retour d'état, qui minimise le critère J sur un horizon temporel T :

$$(2.13) \quad J = \underline{x}'(T) \cdot S \cdot \underline{x}(T) + \int_0^T [\underline{x}'(t) \cdot Q \cdot \underline{x}(t) + \underline{u}'(t) \cdot R \cdot \underline{u}(t)] dt$$

avec S et Q non négatives et R définie strictement positive.

La commande qui minimise le critère J est donnée par l'expression :

$$(2.14) \quad \underline{u}(t) = -R^{-1} B' P_1(t) \cdot \underline{x}(t) - R^{-1} B' P_2(t) \cdot \underline{w}(t)$$

où P_1 est la solution de l'équation différentielle matricielle de Ricatti :

$$(2.15) \quad \dot{P}_1(t) = -A' P_1(t) - P_1(t) \cdot A + P_1(t) \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B' \cdot P_1(t) - Q$$

avec $P_1(T) = S$

et où $P_2(t)$ est la solution de l'équation différentielle matricielle
(2.16)

$$(2.16) \quad \dot{P}_2(t) = -A \cdot P_2(t) - P_2(t) D + P_1(t) \cdot B \cdot R^{-1} B' \cdot P_2(t) - P_1(t) \cdot F$$

avec $P_2(T) = 0$

II.2.3. Application aux équations du four

Le four est représenté par son modèle dynamique entre poussées :

$$\dot{\underline{a}} = A_L \underline{a} + B_L \underline{u}_V + \underline{d}_L$$

avec l'équation de la perturbation :

$$\begin{aligned} \dot{\underline{d}} &= \underline{0} \\ \underline{d}(t_0) &= \underline{d}_L \end{aligned}$$

Remarque : La charge est supposée constante. En réalité la charge est susceptible de varier. Les équations du système (1.1 - 1.4) montrent qu'une variation de la charge moyenne se traduit dans le modèle par une variation du vecteur $\underline{d}_L$. La répartition de la charge ne peut varier qu'au moment de la poussée. Le terme $\underline{d}_L$ sera donc constant entre deux poussées successives.

La périodicité des poussées impose le choix d'un critère à horizon fini, l'horizon étant l'intervalle entre deux poussées successives. Une forte pondération sur l'état final permet d'avoir un écart à l'instant final suffisamment faible par rapport au régime nominal.

Le critère s'écrit sous la forme :

$$(2.17) \quad J = \underline{a}'(t_f) \cdot S \cdot \underline{a}(t_f) + \int_0^{t_f} \left[\underline{a}'(t) \cdot Q \cdot \underline{a}(t) + \underline{u}_V(t) \cdot R \cdot \underline{u}_V(t) \right] dt$$

t_f : intervalle de temps entre deux poussées.

La commande qui minimise le critère (2.17) est obtenue en utilisant (2.14).

$$(2.18) \quad \underline{u}_V(t) = -R^{-1} \cdot B_L' P_1(t) \cdot \underline{a}(t) - R^{-1} B_L' P_2(t) \cdot \underline{d}(t)$$

où $P_1(t)$ et $P_2(t)$ vérifient les équations suivantes :

$$(2.19) \quad \dot{P}_1(t) = -A_L' \cdot P_1(t) - P_1(t) \cdot A_L + P_1(t) \cdot B_L \cdot R^{-1} \cdot B_L' \cdot P_1(t) - Q$$

$$(2.20) \quad \dot{P}_2(t) = -A_L' \cdot P_2(t) - P_1(t) + P_1(t) \cdot B_L \cdot R^{-1} \cdot B_L' \cdot P_2(t)$$

avec les conditions finales :

$$(2.21) \quad P_1(t_f) = S \quad P_2(t_f) = 0$$

Les équations (2.19) et (2.20) sont obtenues en remplaçant dans les équations (2.15) et (2.16) les équations du cas général par celles du four.

II.2.4. Intégration des équations

Le calcul de la commande du système nécessite l'intégration des équations (2.19) et (2.20). Deux approches sont possibles :

. La première consiste à faire l'intégration en ligne. Ce qui nécessite la connaissance des conditions initiales. De plus elle nécessite un outil de calcul performant et l'implantation d'algorithme performant en temps réel. Ce qui est très difficile à réaliser sur les systèmes fonctionnant en temps réel où il faut toujours respecter un compromis entre la rapidité et la complexité des algorithmes.

. La seconde approche est l'intégration hors ligne et la mémorisation des résultats obtenus pour leur utilisation ultérieure en ligne. Elle présente l'avantage de la facilité de mise en oeuvre sur des systèmes fonctionnant en temps réel et l'avantage de la rapidité par rapport à la précédente. Son inconvénient est la place mémoire nécessaire pour la mémorisation des matrices obtenues par l'intégration.

Nous avons fait l'intégration en temps inversé hors ligne en partant de l'instant final. La période d'échantillonnage utilisée est de 48 secondes. Cette période sera celle du système temps réel utilisé pour la réalisation de cette loi de commande. Nous avons ensuite regroupé les matrices obtenues afin de réduire la place mémoire nécessaire pour le stockage des résultats.

a) Intégration de l'équation (2.19) : plusieurs méthodes sont développées dans la littérature. Nous avons utilisé la méthode de Kalman Englar [Réf. 19] qui s'adapte bien au cas des systèmes invariants.

On peut la résumer ainsi : partant de l'instant final t_f :

$$P_1(t_f) = S$$

On choisit un pas d'intégration temporel Δt , et on définit les matrices :

$$(2.22) \quad Z = \begin{bmatrix} A_L & -B_L R^{-1} B_L' \\ Q & -A_L \end{bmatrix}$$

$$(2.23) \quad \dot{y} = e^{-Z \Delta t}$$

Remarque : y est calculé par un développement en série des puissances croissantes de $Z \Delta t$.

y est décomposé en quatre matrices :

$$y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}$$

Les matrices $P_1(t_i)$ sont alors données par :

$$(2.24) \quad P_1(t_{i+1}) = \left[y_{21} + y_{22} P_1(t_i) \right] \left[y_{11} + y_{12} P_1(t_i) \right]^{-1}$$

avec $t_{i+1} = t_i - \Delta t$

b) Intégration de l'équation (2.20)

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$(2.25) \quad \dot{P}_2(t) = \left[-A_L + P_1(t) \cdot B_L \cdot R^{-1} \cdot B_L' \right] \cdot P_2(t) - P_1(t)$$

Δt étant la période d'échantillonnage et M la matrice suivante :

$$(2.26) \quad M(t_i) = -A_L + P_1(t_i) \cdot B_L \cdot R^{-1} \cdot B_L'$$

on a :

$$(2.27) \quad P_2(t_{i+1}) = e^{-M(t_i) \cdot \Delta t} \cdot P_2(t_i) - M^{-1}(t_i) \left[e^{-M(t_i) \Delta t} - I \right] P_1(t_i)$$

avec $\begin{cases} P_2(t_f) = 0 \\ t_{i+1} = t_i - \Delta t \end{cases}$

II.2.5. Simulations et commentaires

Dans ce paragraphe nous présentons les résultats de simulations faites avec l'hypothèse que la température de la charge est mesurable.

Nous avons choisi un pas temporel de 48 sec. pour l'intégration hors ligne des équations (2.19) et (2.20). Ce pas correspond à la période de fonctionnement du système temps réel chargé de commander le four.

Nous présentons successivement :

a) Le profil spatial à quatre instants équirépartis sur l'intervalle de temps séparant deux poussées successives. Pour une simulation effectuée à partir du modèle à paramètres localisés d'ordre réduit et pour une charge nominale et homogène (fig. 2.5).

b) Le profil spatial aux mêmes instants qu'au cas précédent mais avec une simulation faite à partir du modèle à paramètres répartis linéaire (fig. 2.6).

c) L'évolution temporelle en quatre points du four sur l'horizon de quatre poussées successives (fig. 2.7).

d) Le profil spatial à quatre instants équirépartis sur l'intervalle de temps séparant deux poussées successives. Pour une simulation effectuée à partir du modèle à paramètres localisés d'ordre réduit et pour une augmentation de 20% de la charge du four (fig. 2.8).

e) Le profil spatial aux mêmes instants que dans le cas précédent mais avec simulation faite à partir du modèle à paramètres répartis linéaire et pour une augmentation de 20% de la charge du four (fig. 2.9).

f) L'évolution temporelle de la température en quatre points du four sur l'horizon temporel de quatre poussées successives et pour une augmentation de 20% de la charge du four (fig. 2.10).

Nous avons fait une simulation en regroupant les matrices $P_1(t_i)$ et $P_2(t_i)$ afin de pouvoir réduire la place mémoire requise à l'implantation de la loi de commande. Le groupement est le remplacement des matrices obtenues sur plusieurs intervalles temporels par leur moyenne. Les meilleurs résultats sont obtenus par un groupement sur 144 secondes (trois pas temporels). Si l'on dépasse cette période, on obtient des oscillations sur les valeurs de la commande. Nous représentons successivement :

a) Le profil spatial obtenu à quatre instants équirépartis sur l'intervalle de temps séparant deux poussées successives et avec un groupement sur 144 secondes (fig. 2.11). La simulation est faite sur le modèle localisé d'ordre réduit avec une charge nominale.

b) Le profil spatial obtenu aux mêmes instants que pour le cas précédent mais avec une simulation faite avec le modèle à paramètres répartis linéaire (fig. 2.12).

c) L'évolution temporelle en quatre points du four sur l'horizon temporel de quatre poussées successives dans les mêmes conditions que dans les deux cas précédents (fig. 2.13).

Remarque : toutes les courbes présentées dans ce paragraphe représentent des écarts de température par rapport au régime nominal donné en (fig. 1.5).

Dans cette partie nous avons supposé que la température de la charge est mesurable en tout point du four. En réalité on ne dispose que de 12 points de mesure de température dans le gaz. Dans le paragraphe suivant nous exposons le calcul d'un observateur de l'état du système nécessaire pour l'estimation de la température dans la charge.

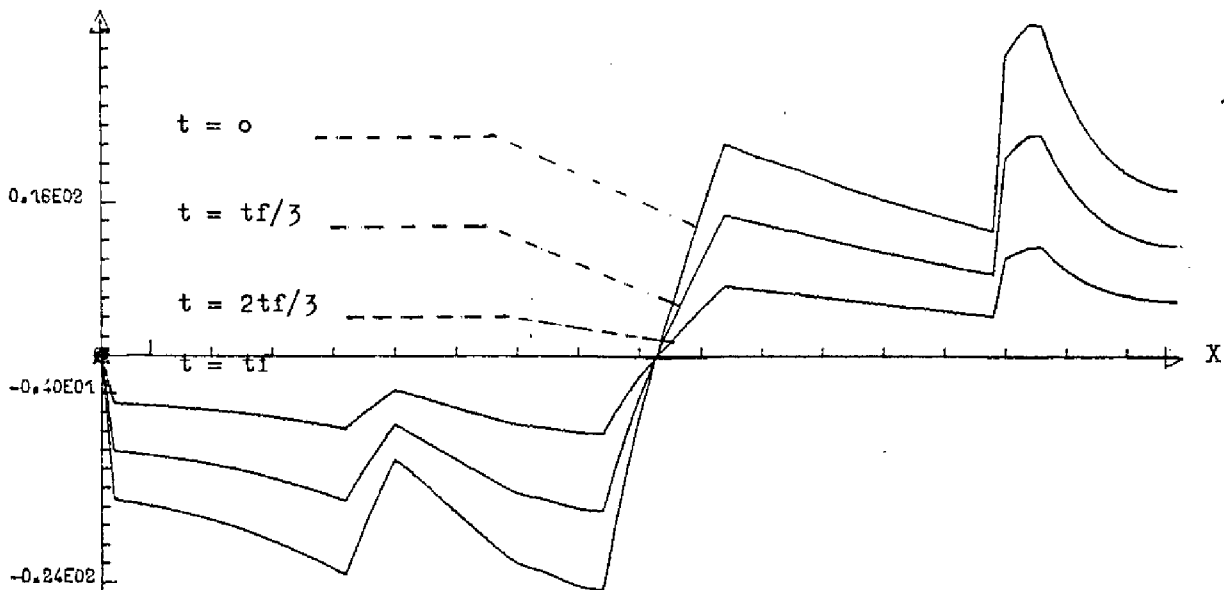


Fig. 2.5 : Système d'ordre réduit, charge nominale

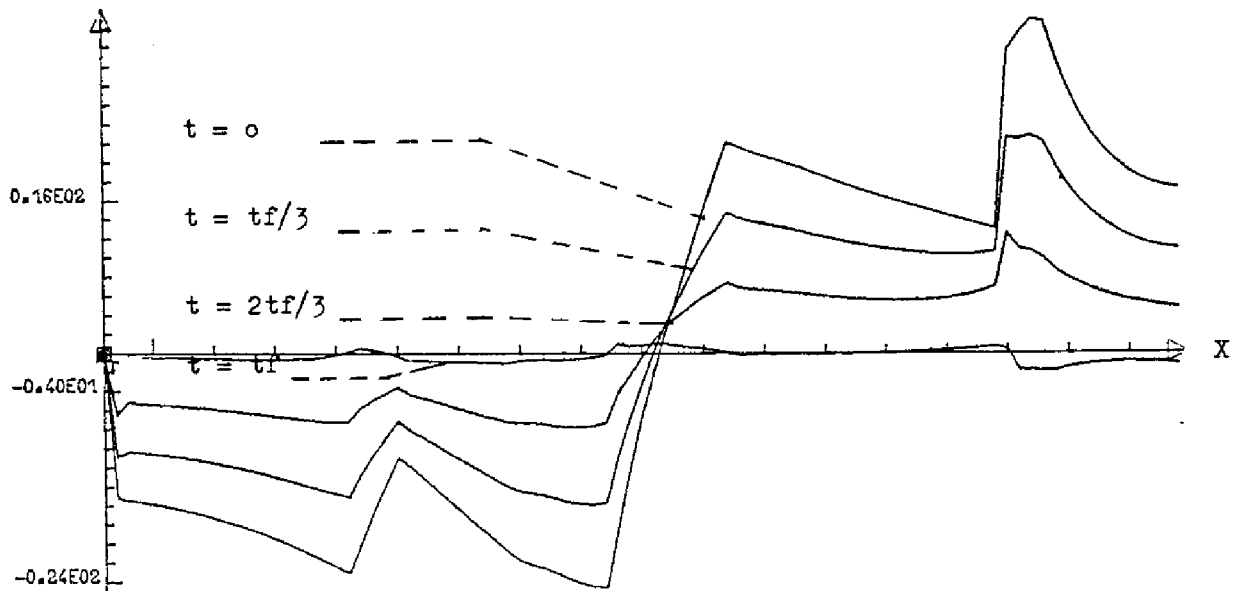


Fig. 2.6 : Système réparti, charge nominale

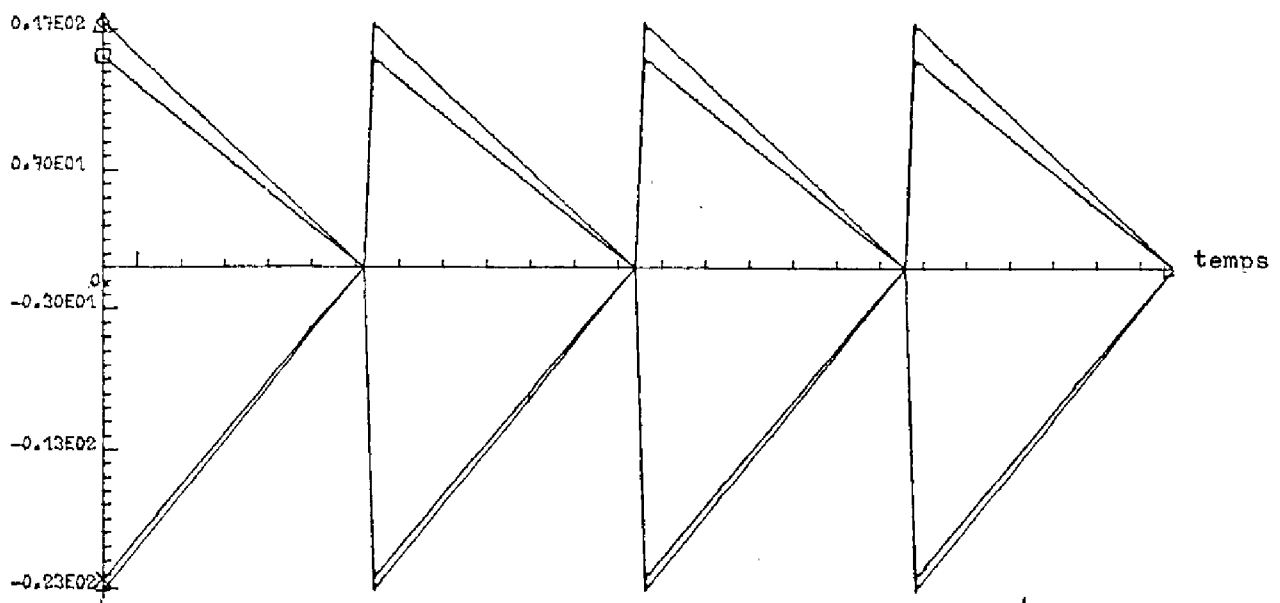


Fig. 2.7 : Evolution de T_v en quatre points, charge nominale

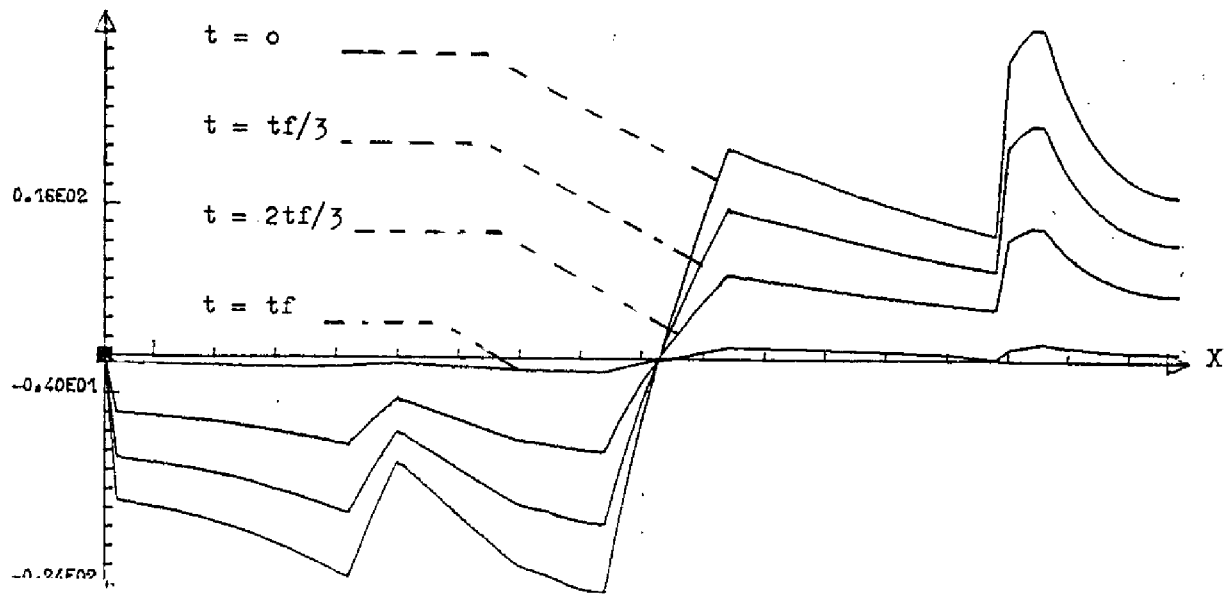


Fig. 2.8 : Système d'ordre réduit, + 20% de charge

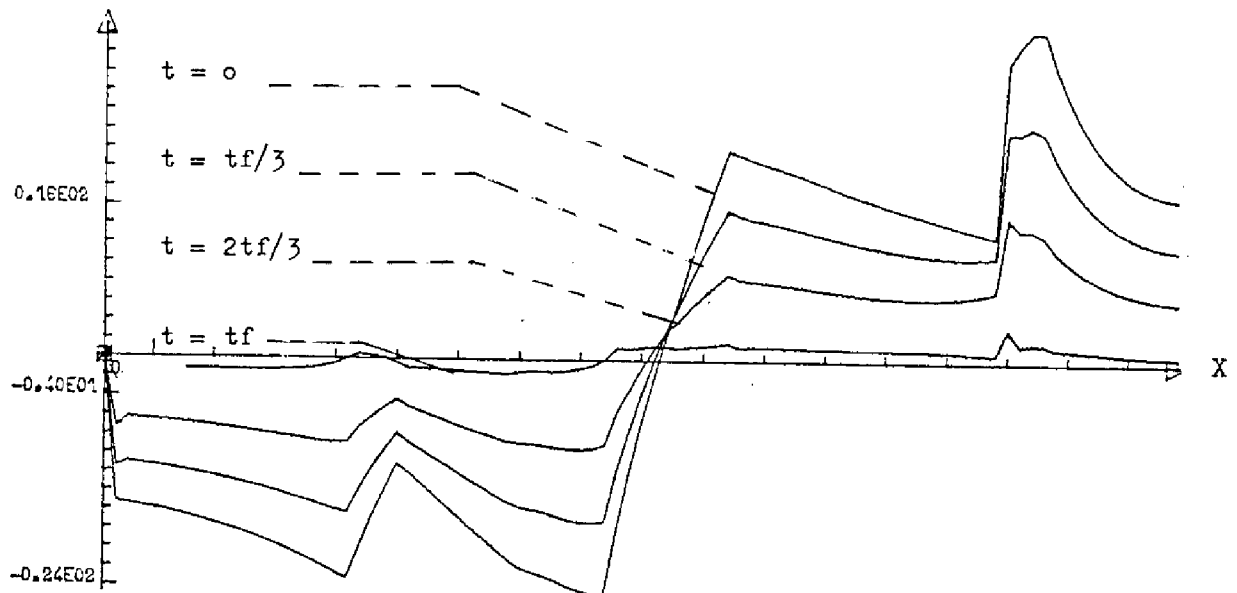


Fig. 2.9 : Système réparti, + 20% de charge

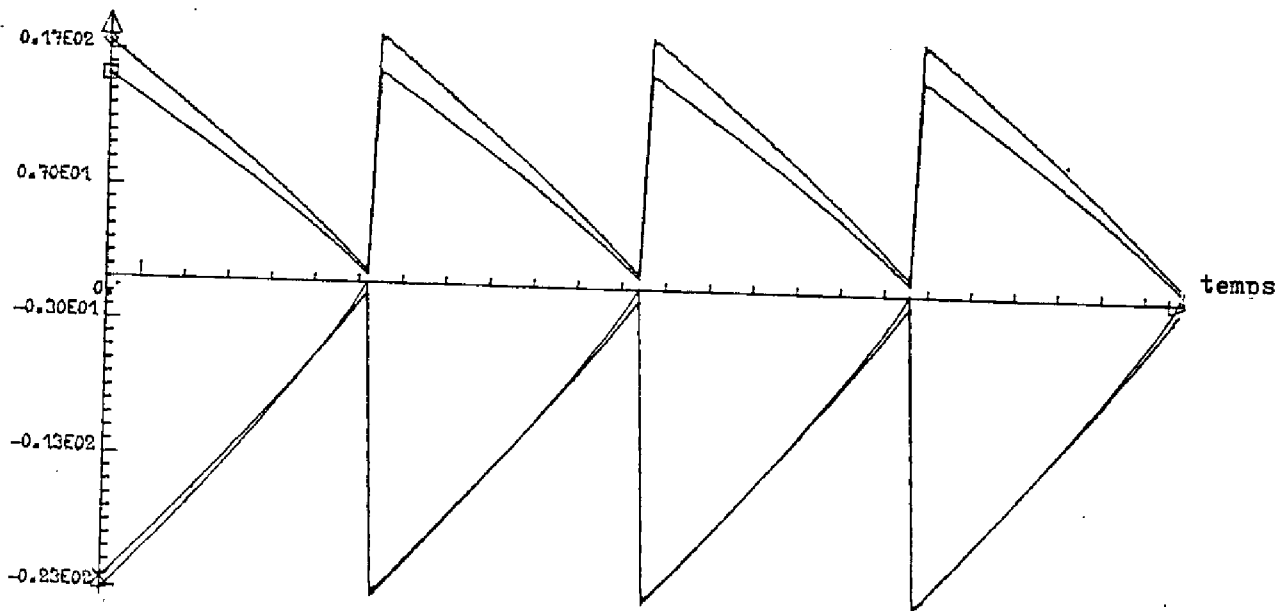


Fig. 2.10 : Evolution de T_v en quatre points, + 20% de charge

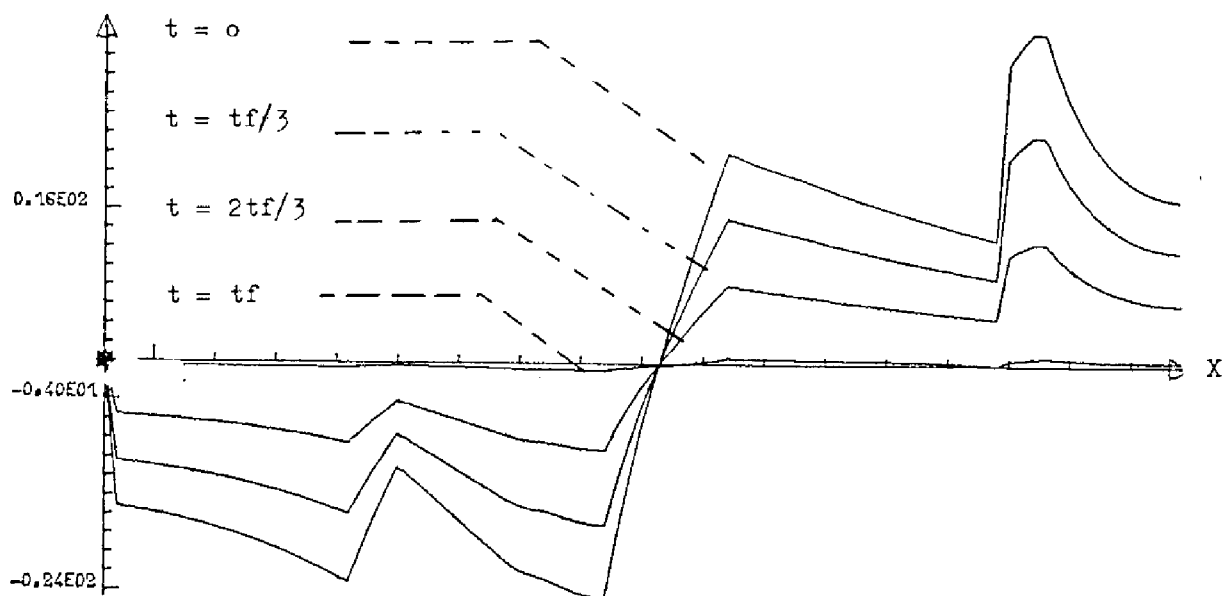


Fig. 2.11 : Système d'ordre réduit; groupement des matrices P_i

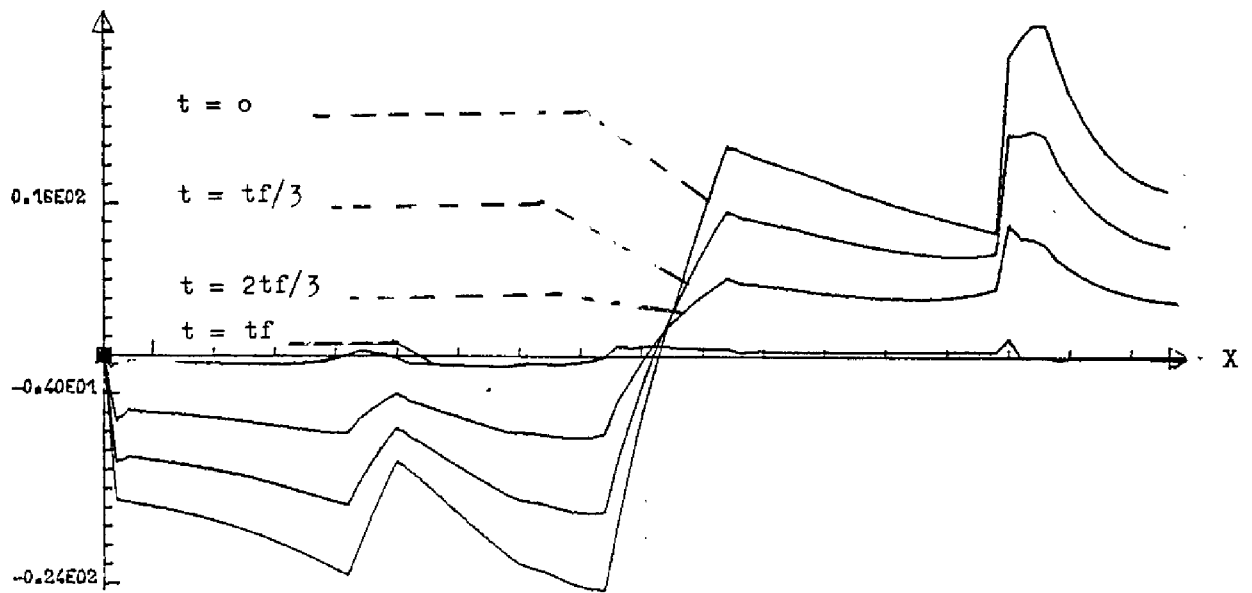


Fig. 2.12 : Système réparti; groupement des matrices P_i

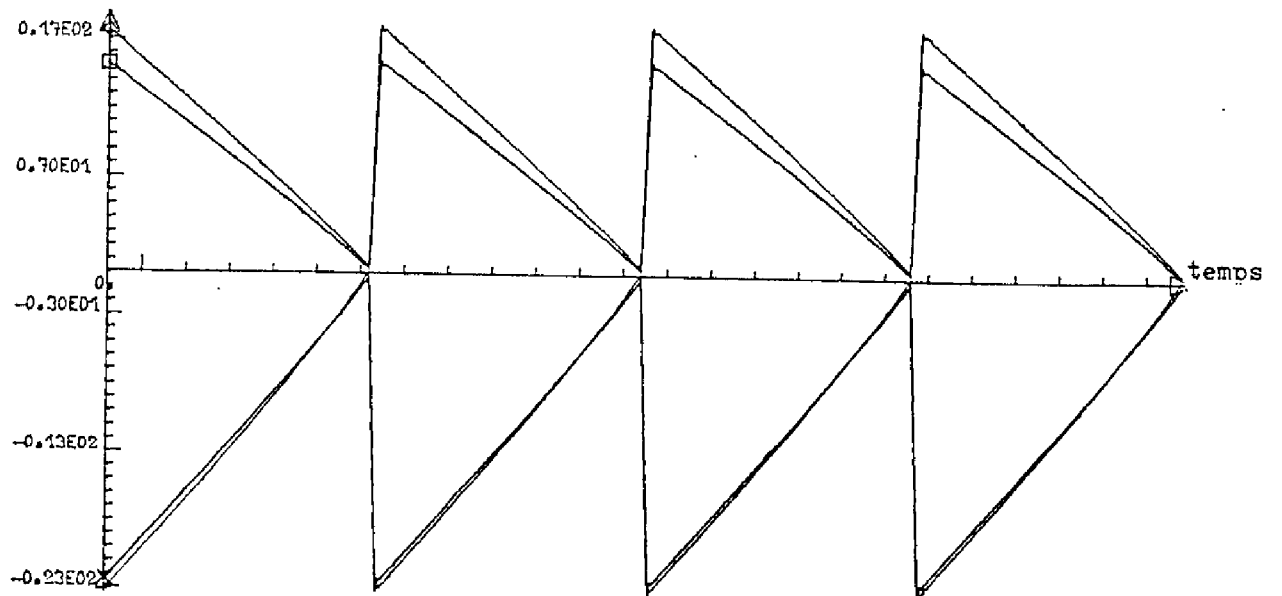


Fig. 2.13 : Evolution de T_v en quatre points; groupement des matrices P_i

II.3 OBSERVATION DE L'ETAT DU SYSTEME

II.3.1. Introduction

Dans le paragraphe précédent nous avons développé le calcul d'une boucle de commande pour réguler le système autour du profil thermique nominal. Dans toutes les simulations précédentes nous avons supposé mesurable l'état du système à partir de la connaissance supposée des profils de température dans la charge et dans le gaz. En réalité on dispose uniquement de 12 points de mesure de température dans le gaz et il n'est pas possible de mesurer la température de la charge en fonctionnement normal.

Dans ce paragraphe nous présentons le calcul d'un observateur identité pour la reconstitution de l'état du système à partir des mesures faites dans le gaz.

Les poussées successives des chariots dans le four constituent une perturbation périodique et "prévisible" du système. Nous présentons le calcul d'un recalage de l'état observé du système au moment de la poussée pour résoudre le problème du transitoire.

II.3.2. Rappels sur la théorie des observateurs

Etant donné un système représenté par l'équation d'état (2.30)

$$(2.30) \quad \begin{aligned} \dot{\underline{x}} &= A \underline{x} + B \underline{u} \\ \underline{y} &= C \underline{x} \end{aligned}$$

le système (2.31) est dit observateur de (2.30) avec F stable s'il existe une matrice T qui vérifie les conditions (2.32) [Réf. 19].

$$(2.31) \quad \begin{aligned} \dot{\underline{z}} &= F \underline{z} + K \underline{y} + H \underline{u} \\ \hat{\underline{x}} &= M \underline{z} + N \underline{y} \end{aligned}$$

$$(2.32) \quad \begin{aligned} TA - FT &= K \cdot C \\ H &= TB \\ MT + NC &= I \end{aligned}$$

on démontre que T existe si A et F ont des valeurs propres distinctes et si le système (F, K) est commandable [Réf. 21].

Si en plus $T = I$ alors on a l'observateur identité et dans ce cas on a :

$$M = I \quad N = 0$$

et l'équation de l'observateur devient :

$$(2.33) \quad \dot{\underline{\hat{x}}} = A \underline{\hat{x}} + B \cdot \underline{u} - K [\underline{y} - C \underline{\hat{x}}]$$

II.3.3. Application aux équations du four

Le four est représenté par son modèle dynamique entre poussées

$$\dot{\underline{a}} = A_L \cdot \underline{a} + B_L \cdot \underline{u}_V + \underline{d}_L$$

$$\underline{G}_V = C_O \cdot \underline{a} + D_O \cdot \underline{u}_V$$

Nous cherchons un observateur identité de la forme :

$$\dot{\underline{\hat{a}}} = F \cdot \underline{\hat{a}} + k \cdot \underline{G}_V + H \cdot \underline{u}_V + \underline{w}$$

en utilisant les résultats du paragraphe précédent on obtient :

$$F = A_L - K \cdot C_O$$

$$H = B_L - K \cdot D_O$$

$$\underline{w} = \underline{d}_L$$

et l'équation de l'observateur est :

$$(2.34) \quad \dot{\underline{\hat{a}}} = [A_L - K \cdot C_O] \underline{\hat{a}} + [B_L - K \cdot D_O] \underline{u}_V + \underline{d}_L + K \cdot \underline{G}_V$$

Choix de la dynamique :

La dynamique de l'observateur doit être choisie plus rapide que celle du système pour annuler suffisamment vite l'erreur d'observation, elle ne doit pas être trop rapide pour filtrer les erreurs de mesures.

Dans le cas de notre système la dynamique de l'observateur doit être choisie rapide par rapport à la période de la poussée et non seulement par rapport à la constante de temps du système qui est beaucoup plus grande.

La matrice dynamique de l'observateur est calculée en utilisant l'algorithme développé par COURDESSES [Réf. 22] en calculant la matrice de retour d'état par minimisation d'un critère quadratique pour le système (A'_L, C'_O) selon les références [23] et [24]. Nous donnons dans l'annexe 2 les valeurs numériques obtenues.

Discretisation de l'équation de l'observateur :

Le système (2.34) est discrétisé selon la même méthode que pour

l'équation (2.20). Cette discrétisation est nécessaire pour l'implantation de l'estimateur sur le calculateur numérique chargé de la gestion du système.

L'observateur discrétisé est représenté par l'équation (2.35) :

$$(2.35) \quad \hat{a}_{k+1} = A_o \cdot \hat{a}_k + B_o \cdot \frac{u}{v_k} + \frac{d}{o} + K_o \cdot \frac{G}{v_k}$$

où $A_o = e^{F \cdot \Delta t}$

$$B_o = F^{-1} \cdot [A_o - I] \cdot H$$

$$\frac{d}{o} = F^{-1} [A_o - I] \cdot \underline{w}$$

$$K_o = F^{-1} [A_o - I] \cdot K$$

Δt est la période de discrétisation. Les matrices F, H, w et K sont définies en II.3.3.

Résultats des simulations

Nous présentons les résultats de deux simulations faites sur le modèle linéaire entre poussées en boucle fermée. Dans la première simulation, la commande est calculée en supposant que l'état du système est mesurable et ceci pour tester la convergence de l'observateur (fig. 2.14 et fig. 2.16). Dans la seconde, la commande est calculée à partir de l'état reconstitué (fig. 2.15 et 2.17). Pour chaque simulation nous donnons l'évolution sur l'horizon de quatre poussées successives des 5 composantes du vecteur d'état et de la température de la charge en quatre points du four. Pour chaque composante du vecteur d'état nous donnons la valeur réelle, la valeur estimée et l'erreur d'estimation.

On remarque en particulier la sensibilité par rapport à la poussée des chariots, ceci est dû au choix de la dynamique imposé par la période séparant deux poussées successives. On remarque la rapidité de convergence de l'estimateur ce qui était l'objectif recherché par le choix d'une dynamique rapide.

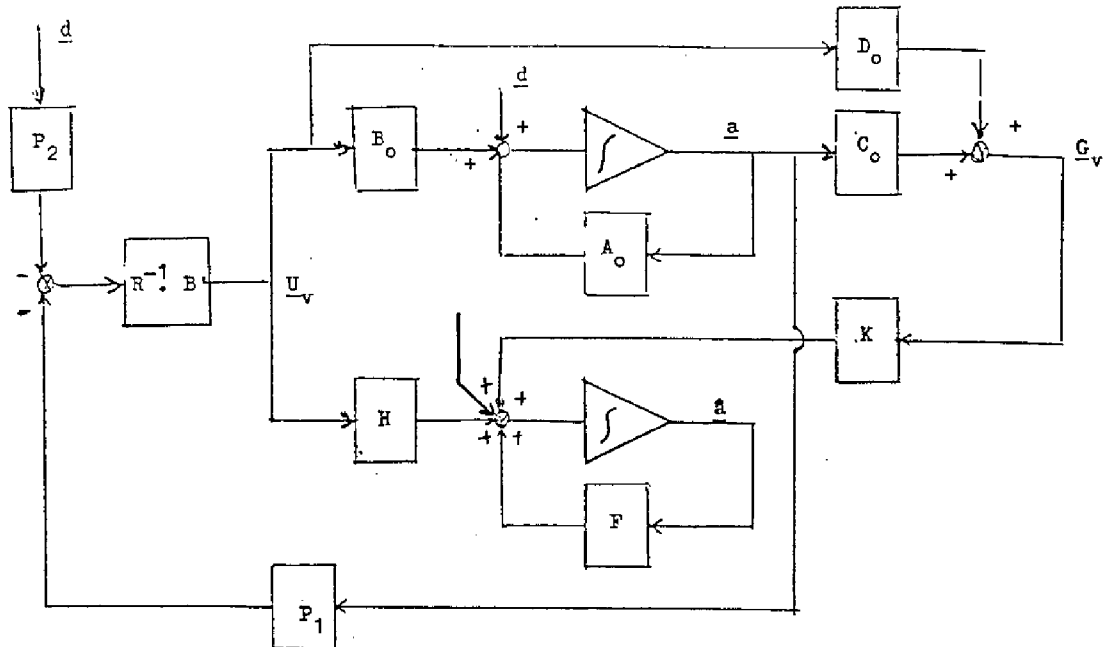


Fig. 2.14 : Simulation du système linéaire; état supposé mesurable pour tester la dynamique de l'observateur.

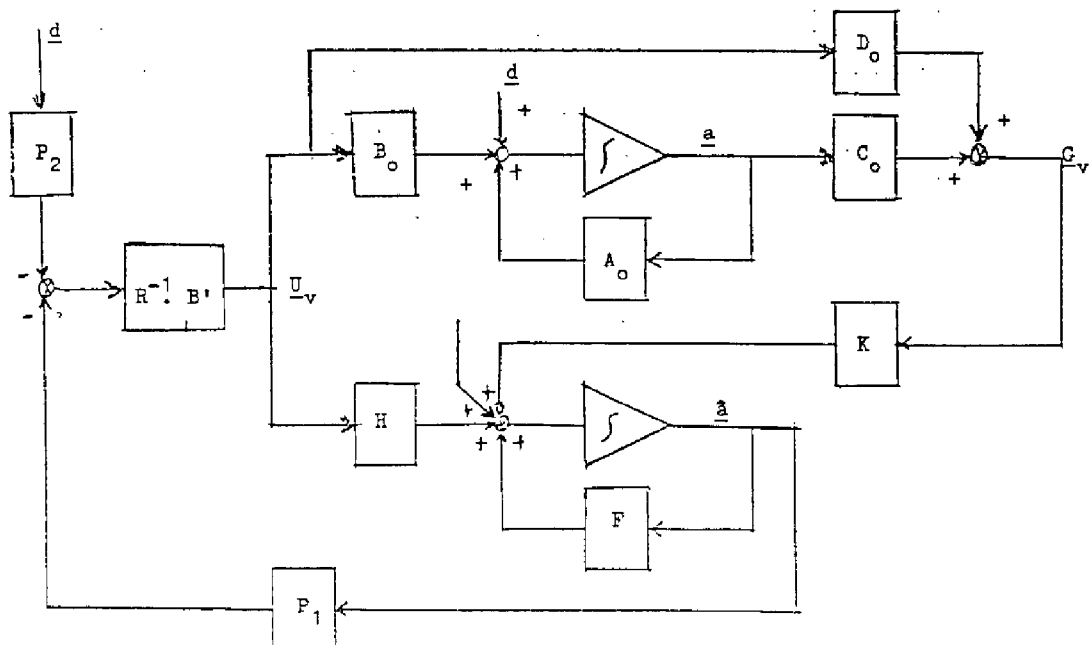


Fig. 2.15 : Simulation du système linéaire; observateur dans la boucle

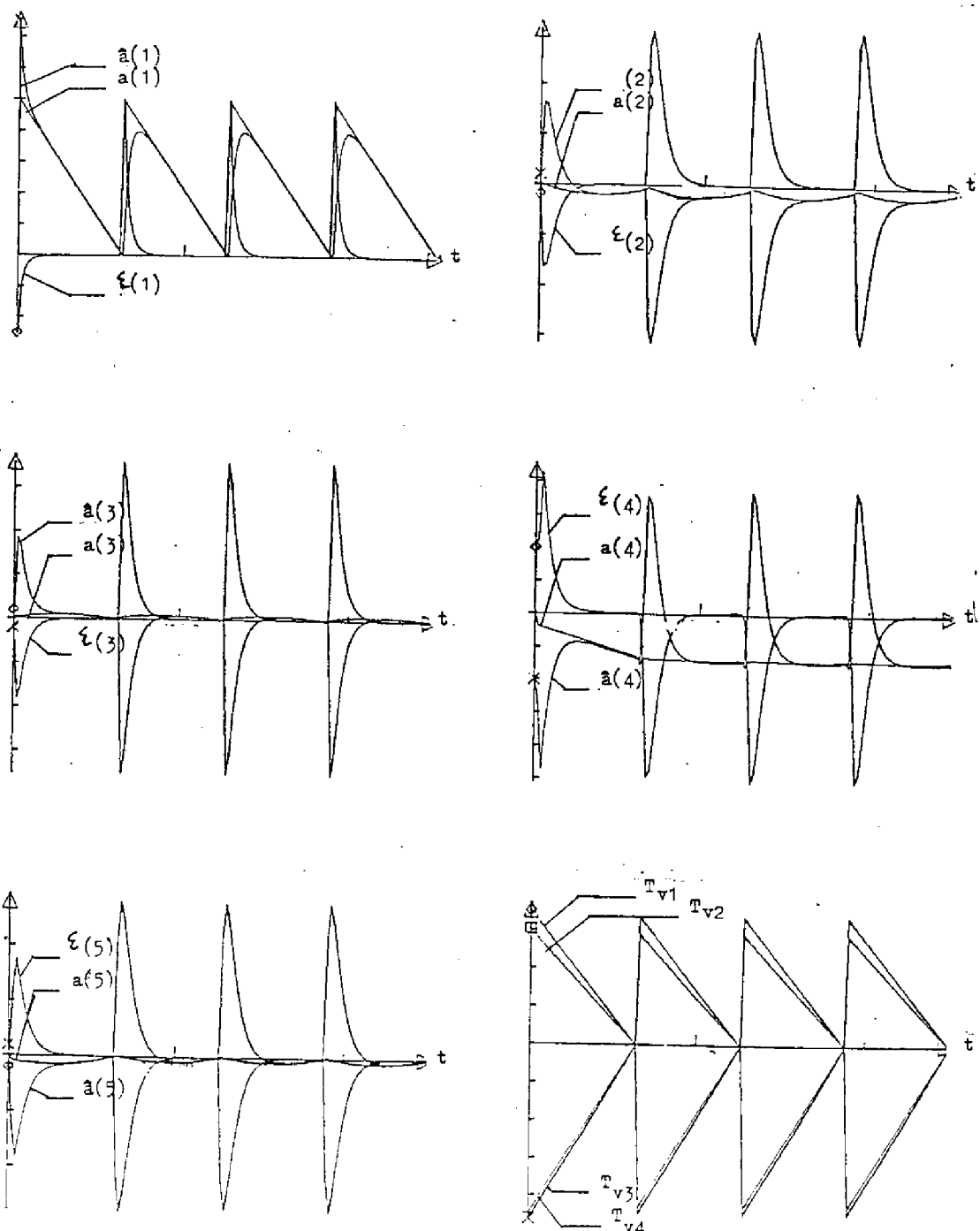


Fig. 2.16 : Evolution des composantes de $a(t)$, $\hat{a}(t)$, et l'erreur d'observation sur l'horizon de quatre poussées; état supposé mesurable pour tester la dynamique de l'observateur

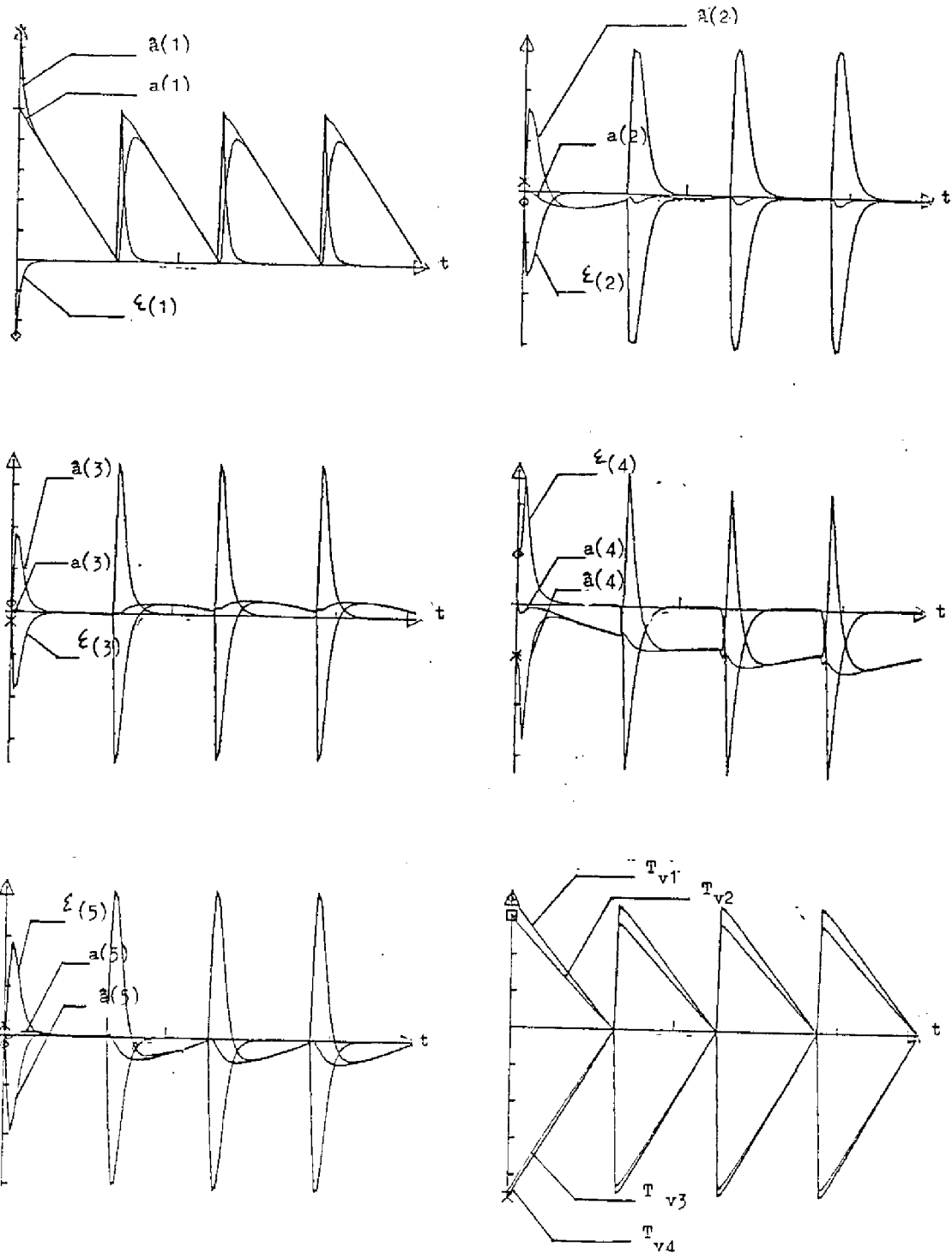


Fig. 2.17 : Evolution des composantes de $\underline{a}(t)$, $\hat{\underline{a}}(t)$ et l'erreur d'observation (t) sur l'horizon de quatre poussées; observateur dans la boucle.

II.3.4. Recalage de l'état au moment de la poussée

Les simulations (fig. 2.15 et 2.16) ont montré que la poussée des chariots présente une perturbation importante pour la reconstitution de l'état du système. D'après l'hypothèse faite que la poussée est instantanée par rapport à la constante de temps du four, le profil de température dans la charge obtenu juste après la poussée peut être déduit de celui existant juste avant la poussée par un simple décalage de 0,5 m de ce profil (longueur de la poussée).

Soit en posant t_f l'instant de la poussée :

$$(2.36) \quad \underline{T}_V(t_f + t) \begin{bmatrix} 0 & . & . & . & . & . & . & . & 0 \\ 1 & 0 & & & & & & & . \\ 0 & 1 & & & & & & & . \\ 0 & & & & & & & & . \\ . & & & & & & & & . \\ . & & & & & & & & . \\ . & & & & & 1 & 0 & 0 & . \\ . & . & . & . & . & . & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} T_V(t_f) + \begin{bmatrix} T_{Vini} \\ 0 \\ . \\ . \\ . \\ . \\ . \\ . \\ 0 \end{bmatrix}$$

T_{Vini} est la température dans la charge à l'entrée du four (supposée connue)

D'autre part nous avons :

$$(2.37) \quad \begin{cases} T_V(t_f) = C_\varphi \cdot \underline{a}(t_f) \\ T_V(t_f + t) = C_\varphi \cdot \underline{a}(t_f + t) \end{cases}$$

Ayant vérifié que C_φ est de rang plein, la pseudo-inverse existe et est unique [Réf. 25]. On obtient ainsi :

$$(2.38) \quad \underline{a}(t_f + t) = \bar{C}_\varphi \cdot T_V(t_f + t)$$

en remplaçant (2.38) dans (2.36) en utilisant (2.37) on obtient :

$$(2.39) \quad \underline{a}(t_f + t) = \bar{\Phi} \cdot \underline{a}(t_f) + \varphi$$

avec

$$\bar{\Phi} = \bar{C}_\varphi \cdot \begin{bmatrix} 0 & . & . & . & . & . & . & . & 0 \\ 1 & 0 & . & . & . & . & . & . & 0 \\ 0 & 1 & 0 & . & . & . & . & . & 0 \\ 0 & . & . & . & . & . & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot C_\varphi$$

$$\varphi = \bar{C}_\varphi \cdot \begin{bmatrix} T_{Vini} \\ 0 \\ . \\ . \\ 0 \end{bmatrix}$$

La poussée étant supposée instantanée, l'équation (2.39) peut être considérée comme une équation algébrique qui donne la modification de l'état du système due à la poussée.

Dans la figure (2.18) nous représentons les résultats de simulations faites avec recalage de l'état du système à la poussée. La figure (2.19) représente la commande du système en boucle fermée sans et avec le recalage de l'état du système. On constate la diminution importante de l'amplitude de l'erreur à la poussée des chariots, ainsi que la diminution des variations des variables de la commande du système.

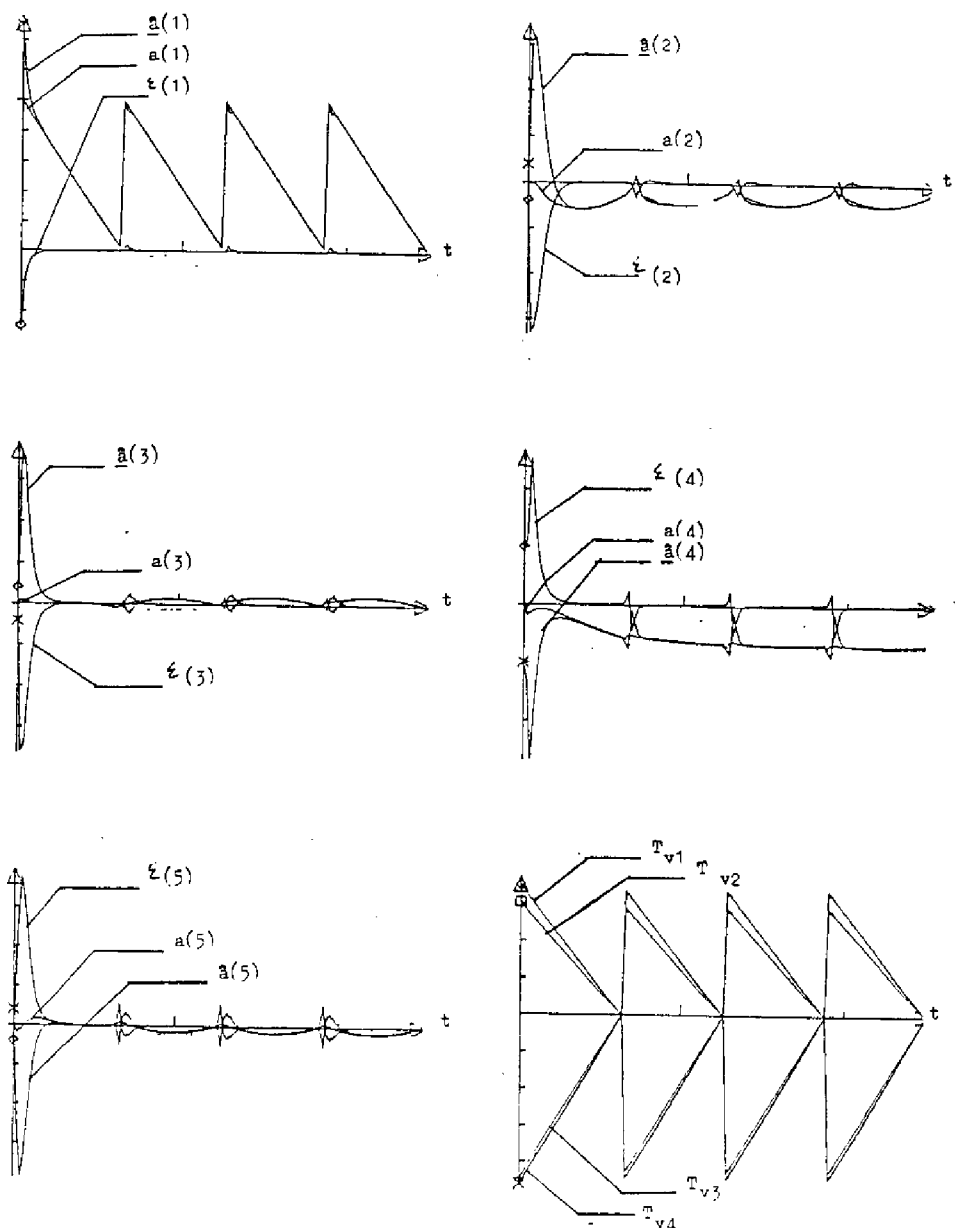


Fig. 2.18 : Evolution des composantes de $\underline{a}(t)$, $\hat{\underline{a}}(t)$ et de l'erreur d'observation $\underline{e}(t)$ sur l'horizon de quatre poussées; recalage de l'état à la poussée

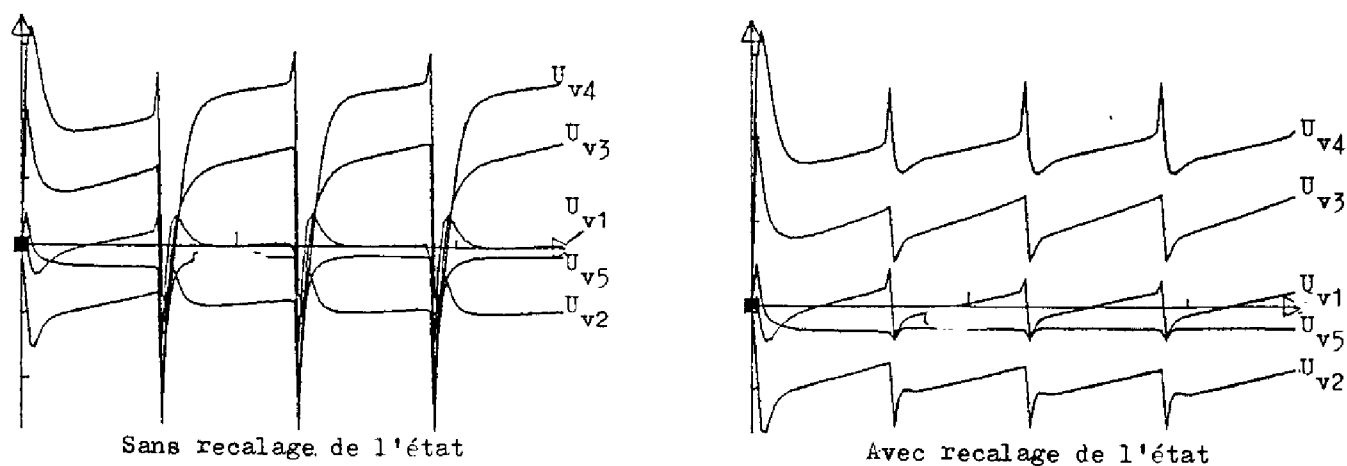


Fig. 2.19 : Evolution de la commande sur quatre poussées

CONCLUSION.

La dynamique choisie de l'estimateur nous paraît satisfaisante, une dynamique plus rapide aurait entraîné des perturbations plus grandes à la poussée, une dynamique plus lente aurait entraîné une convergence lente sur l'horizon de temps séparant deux poussées successives.

Le recalage de l'état du système à la poussée diminue fortement la perturbation à cet instant, ce qui réduit fortement les variations de la commande (Fig. 2.19).

L'ensemble des résultats numériques est donné en Annexe 2.

CHAPITRE III

CONDUITE DU FOUR PAR CALCULATEUR NUMÉRIQUE

-:-

INTRODUCTION

L'évolution rapide de la microinformatique a permis à la conduite numérique des processus industriels de prendre une nouvelle dimension en contrôlant des procédés de plus en plus complexes et ceci avec des algorithmes de plus en plus élaborés. Dans le cas particulier de l'industrie céramique, le coût de revient relativement bas d'un microcalculateur, par rapport au coût global de la construction d'un four tunnel permet d'opter pour des solutions "convenables" pour le développement et la réalisation de la conduite en temps réel du processus.

Les possibilités offertes par un système informatique travaillant en temps réel changent la politique de conduite des processus. Les fonctions principales qui peuvent être traitées par un ordinateur temps réel sont les suivantes :

- l'acquisition des mesures
- la commande du processus physique
- la surveillance du fonctionnement et la détection d'anomalies
- la visualisation de l'"état" du système
- la gestion du processus.

Dans notre cas, un problème supplémentaire est posé par la distance séparant le laboratoire du site du four (100 km), sachant que nous souhaitons faire l'étude d'analyse et de commande du processus, depuis le laboratoire.

Dans ce chapitre nous décrivons la réalisation de ces fonctions à l'aide d'une structure à deux ordinateurs afin de résoudre ce problème. Nous décrirons successivement :

- les interfaces avec le processus
- l'outil informatique qui a servi pour la réalisation des objectifs
- les logiciels développés et le fonctionnement en temps réel du système dans sa globalité.

Remarque : les logiciels élaborés pour la conduite du four ont fait l'objet d'une note technique [Réf. 29] où l'on trouve l'ensemble des informations nécessaires à la compréhension du fonctionnement du système.

III.1 INTERFACES AVEC LE PROCESSUS

Les interfaces avec le processus sont de deux types :

- les capteurs
- les actionneurs

III.1.1. Les capteurs

- Capteurs de température : 12 thermocouples de type K sont installés sous la voûte à l'intérieur du four. La répartition est choisie en fonction des gradients de température longitudinaux dans le four. Ce type de thermocouple donne une indication valable jusqu'à 1400°C, ce qui est ici suffisant.

- Capteurs de débit d'air primaire : un capteur de débit est installé par groupe de brûleurs. Ce capteur donne le débit d'air au niveau de la vanne qui contrôle la distribution d'air aux brûleurs du groupe. Le schéma de principe est donné en fig; 3.1.. Les transistors T_1 et T_2 sont liés thermiquement. Le transistor T_1 chauffe l'ensemble " $T_1 T_2$ " pour maintenir un écart constant entre la température de " $T_1 T_2$ " et la température de l'air (référence). Cette température est donnée par la jonction T_3 . La puissance dissipée pour obtenir cette régulation varie avec la vitesse d'écoulement de l'air, donc avec son débit. Le signal de mesure est la tension de commande du transistor T_1 (fig. 3.2). Nous avons ainsi 5 capteurs pour les cinq groupes.

- Capteurs de débit de gaz naturel : cinq capteurs, de même type que les précédents, sont installés pour les cinq groupes. Ces capteurs donnent le débit de gaz naturel réglé par les vannes de distribution de gaz.

- Positions des vannes : un capteur à potentiomètre donne la position de la vanne d'air et ceci pour chaque groupe de brûleur. Cette position est donnée sur une échelle 0 - 100% par une tension haut niveau (1 - 2,5 V).

- Mesure du débit d'air secondaire : un capteur de position à potentiomètre donne l'ouverture du registre des fumées. Ce registre commande le débit des fumées dans la cheminée de soutirage. La connaissance de ce débit et de ceux d'air primaire et de gaz pour chaque groupe, permet de calculer le débit d'air primaire à la sortie du four.

- Identification des chariots : les chariots entrant dans le four ne portent pas le même type de charge. Chacun a une masse différente. Pour connaître la liste des chariots traversant le four, chaque chariot est identifié à son entrée dans le four par une information binaire sur 6 bits délivrée par des contacts électromécaniques associés à un signal de validation.

- Pesée des chariots : un système de pesée par jauge manométrique est installé à l'entrée du four (sur le chariot transbordeur). Ce qui nous permet de peser les chariots dont le poids peut atteindre 5 tonnes. Nous pouvons avoir ainsi la répartition de la charge dans le four.

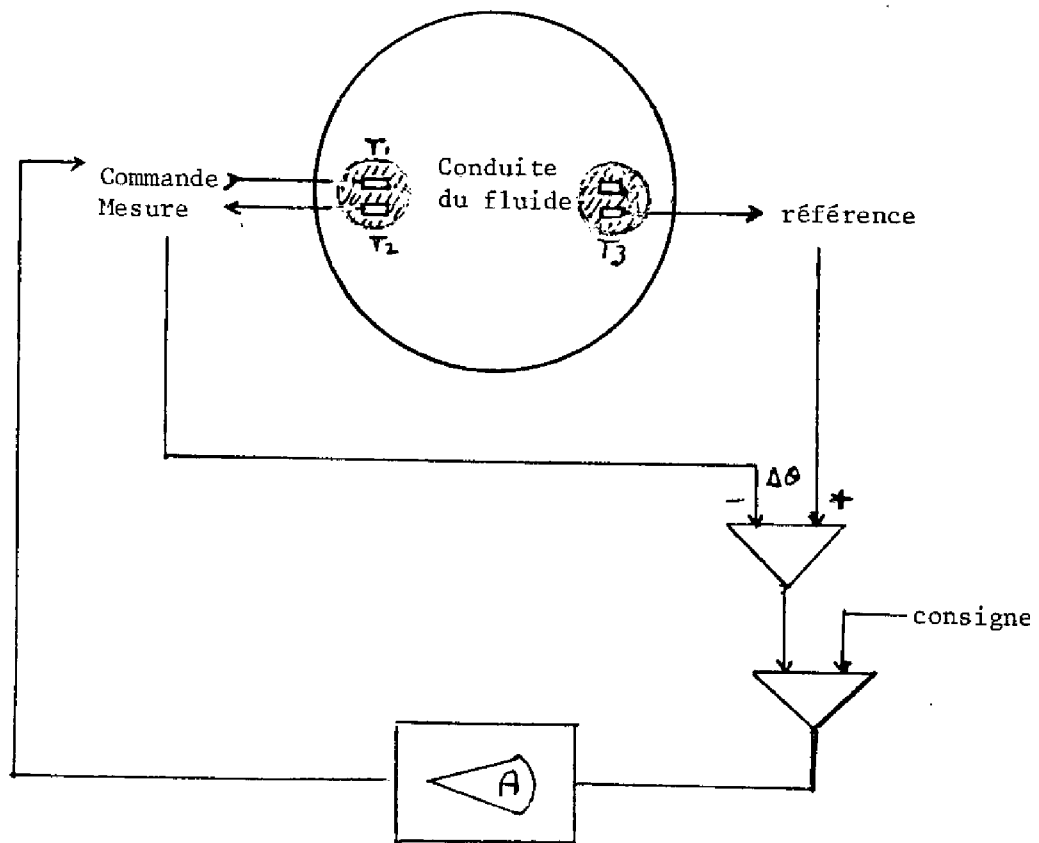


Fig. 3.1 Schéma de principe du capteur de débit

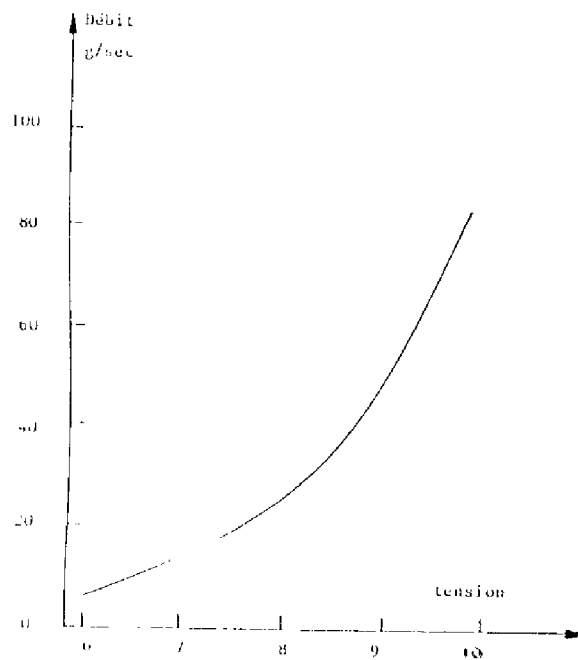


Fig. 3.2 Caractéristique du capteur de débit

III.1.2. Les actionneurs

- Débit d'air primaire : une vanne motorisée à papillon commande le débit d'air primaire pour chaque groupe. Une logique à relais en permet l'ouverture, la fermeture ou l'arrêt.

- Débit de gaz naturel : ce débit est asservi localement à celui d'air primaire pour chaque groupe. Ceci nous permet de maintenir un rapport air/gaz constant. Ceci n'est pas valable pour le premier groupe de brûleurs pour lequel le débit d'air est constant.

- Débit d'air secondaire : une interface à relais permet l'ouverture, la fermeture ou l'arrêt du registre des fumées.

- Période de poussée : cette période est modifiable par action sur une minuterie située dans l'armoire de commande du four. Cette période ne peut être modifiée que manuellement.

III.2. L'OUTIL MICROINFORMATIQUE

Tout système informatique peut être décomposé en deux ensembles : le matériel et le logiciel.

III.2.1. Le support matériel

La distance entre le laboratoire et le site du four étant de 100 km environ, une structure à deux microcalculateurs est adoptée (fig. 3.3). Le premier microcalculateur, appelé "MicroMANE" dans la suite de ce mémoire, est installé à côté du four. Il joue le rôle d'"interface" charge de faire les acquisitions des données, de commander les actionneurs et de surveiller le fonctionnement du four.

Le second microcalculateur, qu'on appellera "MicroLAAS" dans la suite de ce mémoire, est installé au laboratoire. Il est chargé de calculer la commande du four à partir des mesures reçues, de visualiser ces mesures. De plus il assure la surveillance et la gestion de la liaison avec le MicroMANE.

Les deux microcalculateurs sont reliés par une liaison téléphonique du

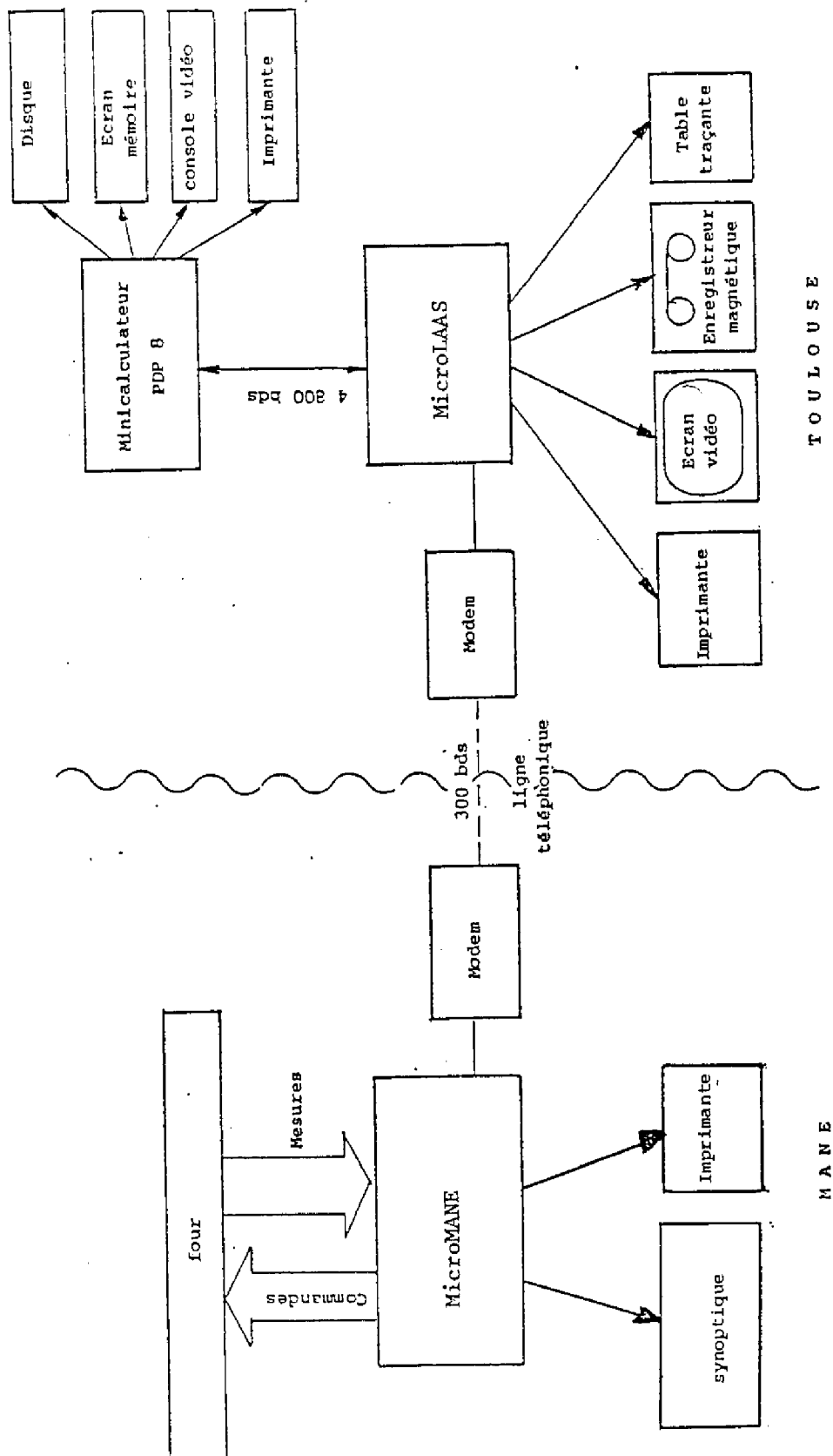


Fig. 3.3 Synoptique de l'installation

réseau commuté via deux modems (modulateur-démodulateur). Ils échangent les données à la vitesse de 300 bauds (30 caractères par seconde). Cette vitesse limite la quantité d'informations échangées. Notons qu'avec cette vitesse, les transferts de l'ensemble d'informations de mesure et de commande durent 33 secondes.

La structure du MicroMANE

C'est un microcalculateur construit autour du microprocesseur Motorola 6800; il se compose des modules suivants (fig. 3.4) [Réf. 30].

- . Module unité centrale (M68 ADS 1) avec liaison asynchrone connectée au modem.

- . Module de supports pour mémoires mortes reprogrammables (M68MM04) de capacité maximale de 16 K octets.

- . Module de 8 K octets de mémoires vives dynamique (MEX 6815)

- . Une horloge temps réel de période 20 ms et un système de redémarrage automatique en cas de panne du logiciel ("chien de garde").

- . Module de 32 entrées/32 sorties numériques compatible TTL (M68MM03)

- . Module d'acquisition de tensions analogiques (M68MM05) configuré en 8 entrées différentielles multiplexées. La durée de "multiplexage + conversion" est de 40 μ s.

- . Un système de conditionnement des tensions délivrées par les thermocouples assure l'amplification et la compensation de la température de soudure froide. Un multiplexage à relais (commandé par 4 lignes du module de sorties logiques) permet l'exploitation des 12 thermocouples au moyen d'une seule entrée du module de conversion analogique-numérique. (fig. 3.5).

- . Multiplexage des débits d'air primaire, positions des vannes et débits de gaz : les groupes de brûleurs sont au nombre de 5. Un multiplexage à relais permet de définir le groupe de brûleur (codage par trois sorties numériques). Seulement trois entrées analogiques sont ainsi utilisées pour effectuer les 15 acquisitions (fig. 3.6).

- . Module de visualisation synoptique : ce module (fig. 3.7) (réalisé par M. POURCIEL) permet la surveillance du fonctionnement du four par la visualisation permanente de l'ensemble des mesures. Il comporte 12 colonnes de 5 diodes électroluminescentes (led) pour la visualisation de la répartition longitudinale des températures, cinq colonnes de 10 leds chacune pour la visualisation de l'ouverture des vannes, cinq fois 2 leds pour la visualisation de l'action sur les moteurs des vannes et dix afficheurs 7 segments pour l'affichage de

l'heure et des renseignements concernant la charge (n° d'ordre des chariots, numéro d'identification, poids de la charge).

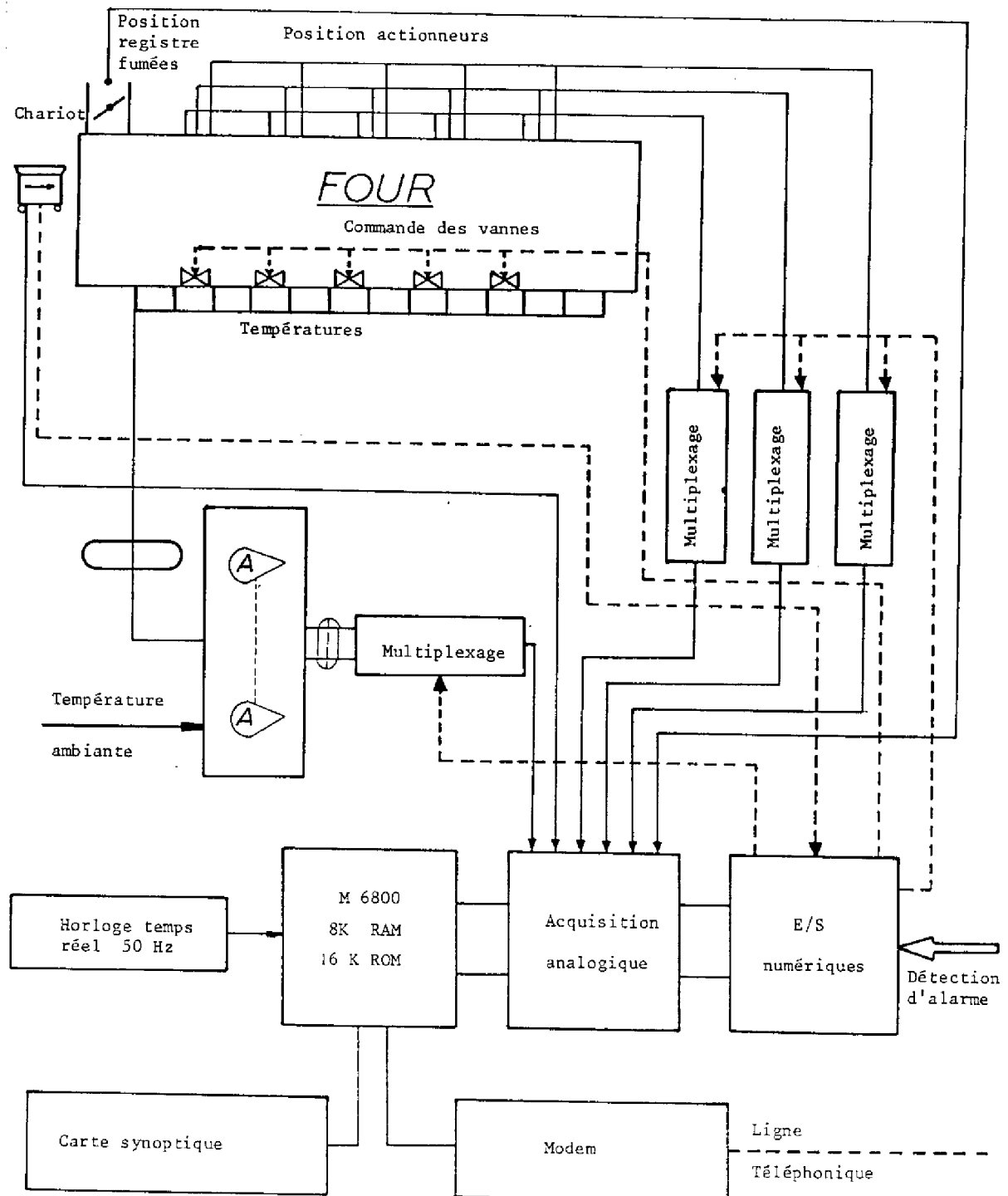


Fig. 3.4 : Structure du MicroMANE

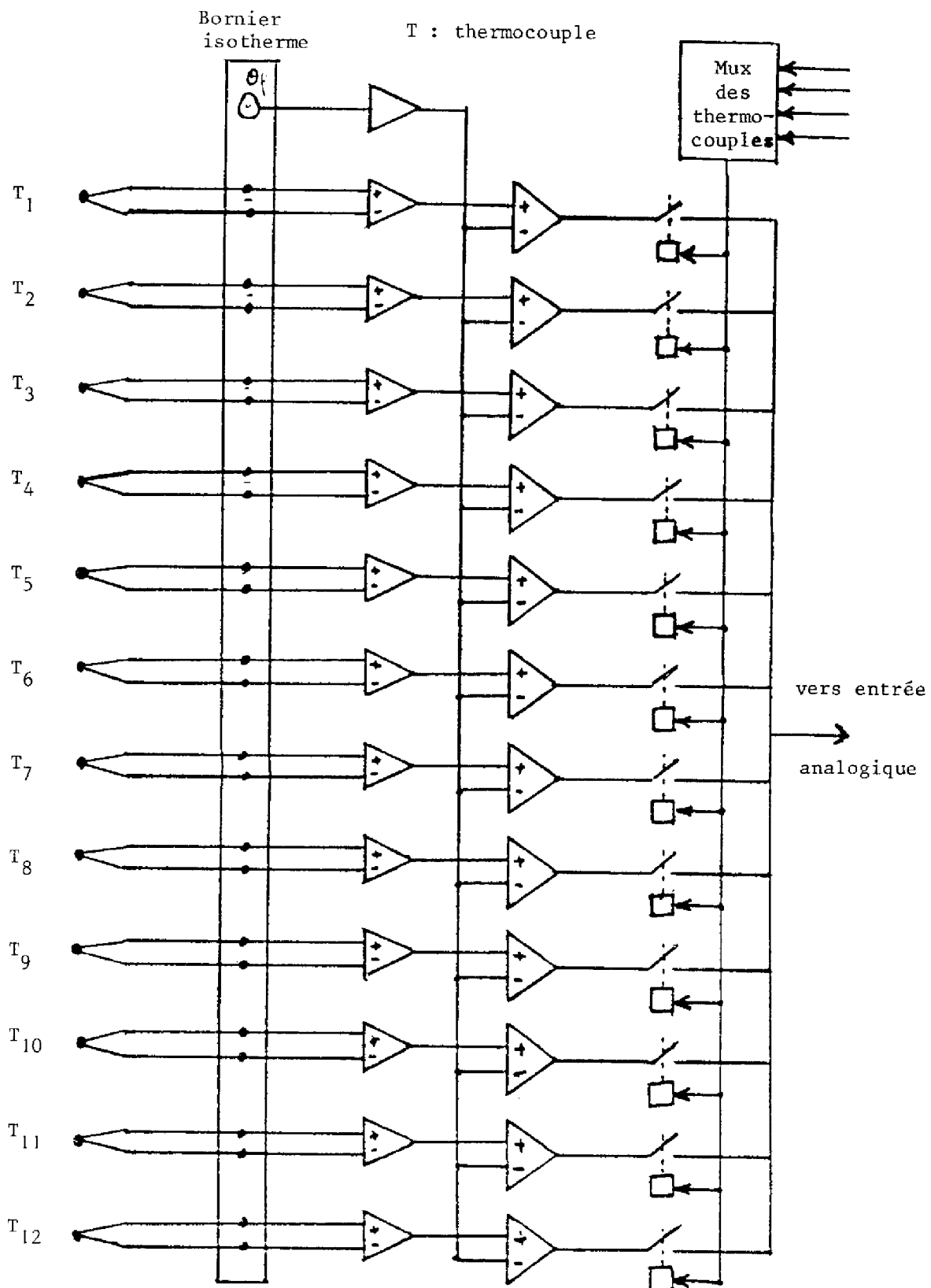


Fig. 3.5 Schéma de principe du multiplexage des thermocouples avec compensation de la soudure froide

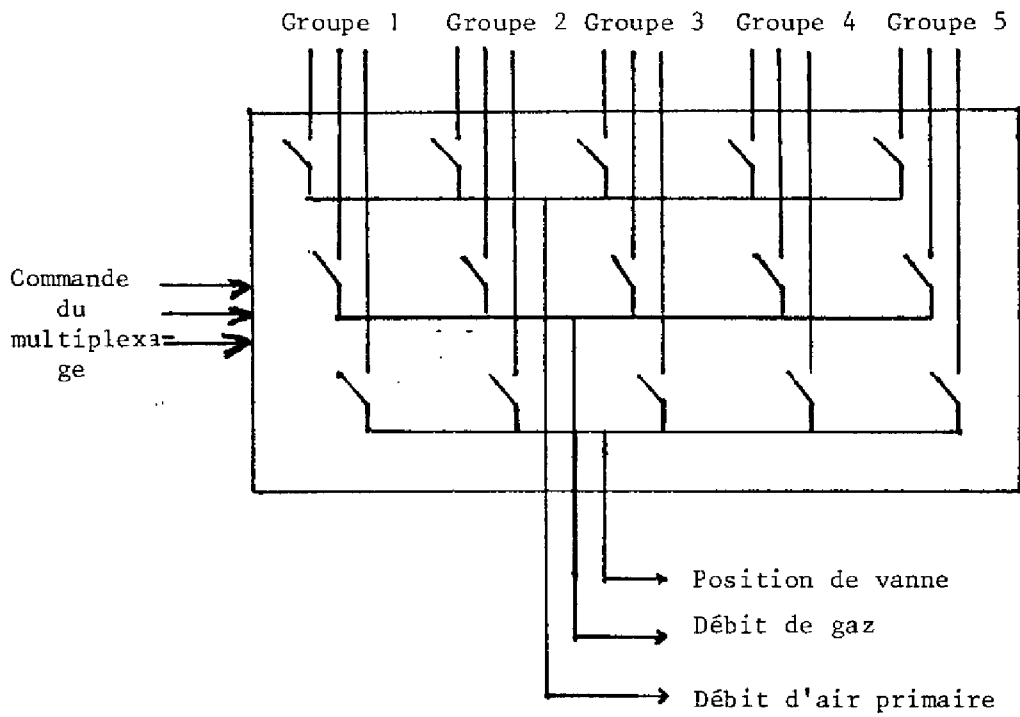


Fig. 3.6 Schéma de principe du multiplexage des groupes

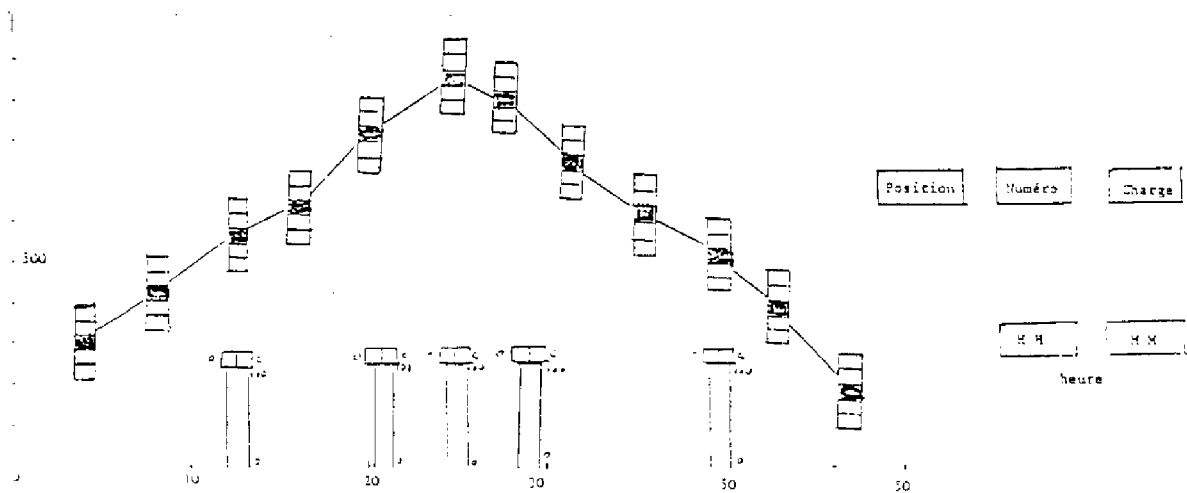


Fig. 3.7 Carte de visualisation synoptique

La structure du MicroLAAS

Ce calculateur est aussi construit autour du microprocesseur Motorola 6800, il se compose des modules suivants :

- . Module unité centrale (M68 ADSI)
- . Module de 32 K octets de mémoires vives dynamiques
- . Modules de supports pour mémoires mortes reprogrammables (M68MM04)
- . Module de visualisation alphanumérique et graphique pour sortie sur écran vidéo.
- . Une carte de liaison asynchrone (RS232) pour la liaison avec un mini-calculateur PDP8A de Digital Equipment.
- . Un clavier ASCII et un écran vidéo.

III.2.2. Le support logiciel : le moniteur temps réel

Les travaux de chacun des deux microcalculateurs sont divisés en tâches spécifiques. Ces tâches sont gérées par un moniteur temps réel développé au L.A.A.S. [Réf. 26] . Ce moniteur est implanté sur chacun des deux microcalculateurs de façon identique afin de pouvoir assurer le transfert de logiciels sans aucune modification.

Le moniteur assure la gestion temporelle des tâches à effectuer. Une tâche est un sous-programme du moniteur temps réel. Elle est écrite en langage d'assemblage 6800.

Elle peut être :

- . périodique : dans ce cas la période d'exécution de la tâche peut être choisie entre 20 ms et 256 sec.
- . non périodique : dans ce cas la tâche est lancée par une interruption.

Toute tâche peut être lancée ou arrêtée par toutes les autres tâches actives. Le moniteur gère 21 tâches périodiques. (ce nombre peut être augmenté). Une tâche périodique est arrêtée par la mise à zéro de sa période. Elle est activée par la mise à une valeur non nulle dans la mémoire correspondante à sa période.

Les tâches peuvent avoir deux niveaux de priorité :

- . niveau 0 : dans ce cas la tâche est interruptible par les tâches de niveau de priorité 1.
- . niveau 1 : dans ce niveau, la tâche n'est interruptible que par l'inter-

Tâches à 20 ms			Tâches à 1 sec						
9FE4	CHARGE 1		9FC8	MEMDEP		9FAC	CHO		→ capteur
9FE5	7C	433F	9FC9	76	432A	9FAD	5D	4315	} → adresse
9FE6	A0	4340	9FCA	00	432B	9FAE	A3	4316	
9FE7	0A	4341	9FCB	0A	432C	9FAF	38	4317	
9FE8	TOTF		9FCC			9FB0	ARRET		→ période
9FE9	5D	4342	9FCD		432D	9FB1	70	4318	
9FEA	BA	4343	9FCE		432E	9FB2	00	4319	
9FEB	00	4344	9FCF		432F	9FB3	00	431A	
9FEC	IMPRI		9FD0	CVASMA		9FB4	LANC		
9FED	72	4345	9FD1	71	4330	9FB5	70	431B	
9FEE	00	4346	9FD2	00	4331	9FB6	47	431C	
9FEF	B3	4347	9FD3	10	4332	9FB7	00	431D	
9FF0	ACQMAN		9FD4	CREN		9FB8			
9FF1	7E	4348	9FD5	5D	4333	9FB9		431E	
9FF2	00	4349	9FD6	68	4334	9FBA		431F	
9FF3	19	434A	9FD7	01	4335	9FBB		4320	
9FF4	ACQTF		9FD8			9FBC	BOBF		
9FF5	70	434B	9FD9	1D	4336	9FBD	5C	4321	
9FF6	A0	434C	9FDA	A0	4337	9FBE	00	4322	
9FF7	19	434D	9FDB	01	4338	9FBF	1E	4323	
9FF8	VISU 2		9FDC	VISU 1		9FC0	CHARGE 2		
9FF9	5B	434E	9FDD	5A	4339	9FC1	7C	4324	
9FFA	72	434F	9FDE	00	433A	9FC2	40	4325	
9FFB	05	4350	9FDF	01	433B	9FC3	28	4326	
9FFC	VISU 3		9FE0	CALAND		9FC4	LIMITE		
9FFD	59	4351	9FE1	43	433C	9FC5	58	4327	
9FFE	40	4352	9FE2	80	433D	9FC6	00	4328	
9FFF	05	4353	9FE3	07	433E	9FC7	00	4329	

Fig. 3.8 Exemple de table des tâches : Tâches MicroMANE

ruption non masquable du 6800 (NMI).

Le moniteur travaille à partir d'une table des tâches existante dans la mémoire vive. Cette table est initialisée à la mise sous tension ou au lancement du système à partir d'une table de valeurs dans la mémoire morte du calculateur (fig. 3.8). Ceci permet le démarrage automatique du système à la mise sous tension.

Le moniteur implanté sur le MicroMANE a été légèrement modifié de façon à ne pas affecter la valeur de l'heure au moment du démarrage, ceci pour ne pas avoir à initialiser l'heure à chaque redémarrage automatique du système (sauf en cas de coupure secteur, la mémoire vive n'étant pas sauvegardée dans la version laboratoire sur laquelle nous avons travaillé).

Toute la mémoire adressable est accessible par toutes les tâches actives.

La communication entre les tâches se fait de deux façons :

- . par un drapeau; généralement utilisé pour spécifier l'état des tâches et les choix faits par l'utilisateur à l'initialisation du système.

- . par une zone de la mémoire vive, où une tâche vient lire ce qu'une autre tâche a déjà écrit.

Nous disposons aussi sur chaque microcalculateur d'une bibliothèque de sous-programmes de calcul en virgule flottante en simple précision (32 bits), qui réalise quelques fonctions particulières nous permettant d'effectuer des calculs.

Nous avons développé une bibliothèque de sous-programmes de calcul matriciel qui contient les programmes élémentaires de traitement de matrices (addition, soustraction, multiplication, impression, transposition). Cette bibliothèque est développée en langage d'assemblage M6800, afin de réduire les temps de calcul et la place mémoire nécessaire à son implantation.

III.3 ANALYSE ORGANIQUE : LES LOGICIELS

Le système informatique a pour rôle essentiel d'effectuer :

- . l'acquisition des données
- . la commande des actionneurs
- . la surveillance du fonctionnement

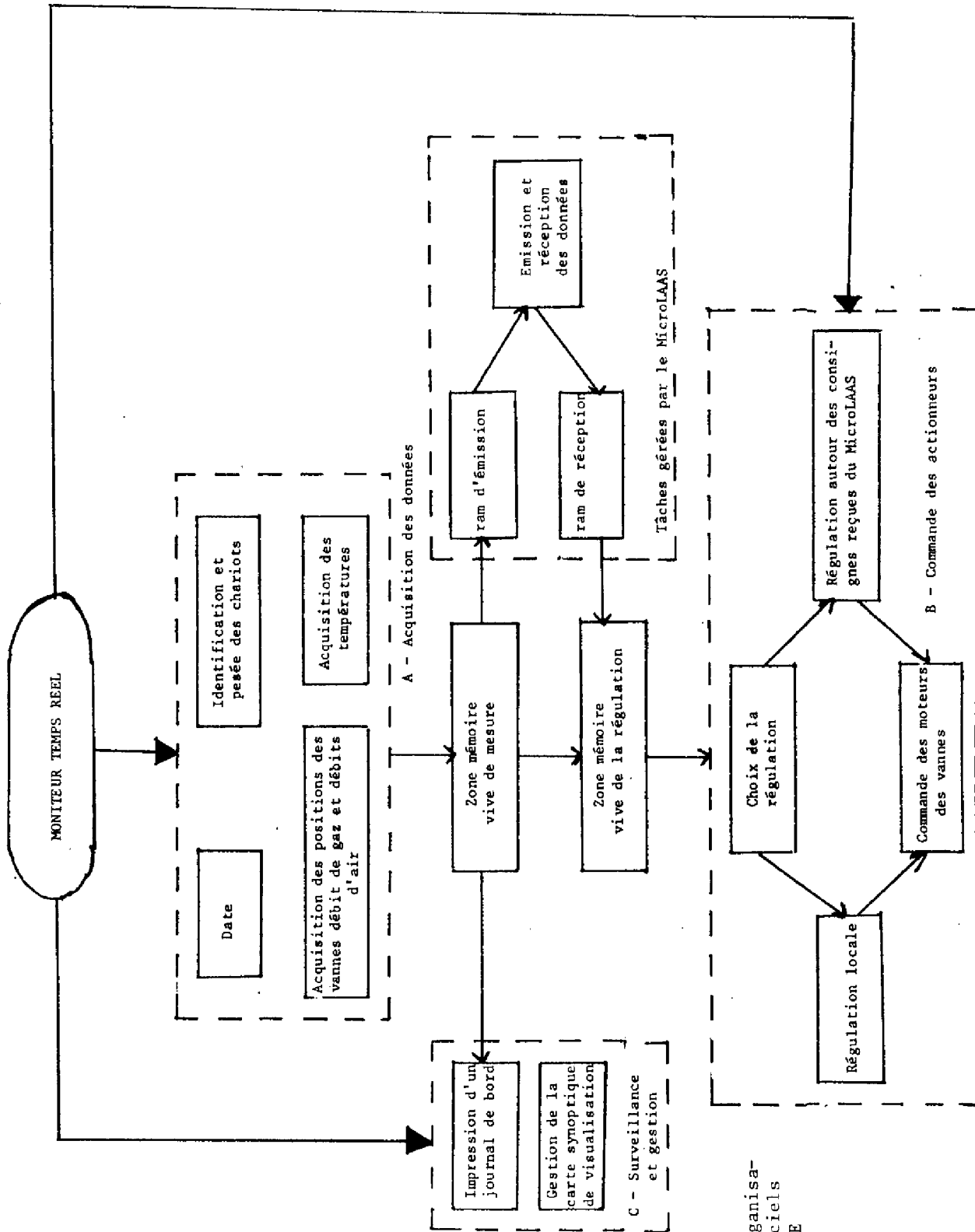


Fig. 3.9 : Organisation des logiciels du Micromane

- . la visualisation des mesures
- . le calcul de la commande
- . le stockage des résultats.

Les trois premiers points sont traités par le MicroMANE. Les trois derniers sont traités par le MicroLAAS. Nous décrivons ici les logiciels développés pour réaliser ces objectifs.

III.3.1. Les logiciels du MicroMANE

Ces tâches sont organisées selon l'organigramme de la figure 3.9. On distingue les parties suivantes :

A - Acquisition des données

- Mesure des températures. Cette tâche permet le relevé des tensions issues du système de multiplexage et d'amplification des tensions délivrées par les 12 thermocouples installés sous la voûte. La période de mesure de toutes les températures est de 16 secondes.

- Mesure des débits de gaz, position des vannes et des débits d'air primaire. Les tensions données par les capteurs de ces trois grandeurs sont mesurées, après leur passage par le système de multiplexage. Une mesure complète pour les cinq groupes est faite toutes les 5 secondes (1 groupe par seconde). Cette période est imposée par le temps de commutation des relais de multiplexage et par la constante de temps des capteurs de débit.

Ces acquisitions sont faites en permanence pour permettre la détection et la visualisation rapide d'anomalies.

- Identification et pesée des chariots : chaque chariot est identifié à son entrée dans le four par la lecture du mot de 6 bits correspondant. Le relevé des tensions délivrées par deux jauges manométriques (1 par demi chariot) se fait en deux temps avec un intervalle d'une minute. Nous obtenons ainsi le poids total du chariot et de sa charge.

Le résultat est mis dans une table qui contient ainsi la liste des chariots et de leurs charges à l'intérieur du four.

L'ensemble des mesures est mis dans une zone de la mémoire vive où les autres tâches viennent lire "l'état" du four. Cette zone est transférée périodiquement dans une autre zone de la mémoire où le MicroLAAS vient lire les mesures. Ce transfert est nécessaire pour assurer la lecture correcte des données par le MicroLAAS.

B - Commande des vannes (fig. 3.10)

La commande du four se fait par action sur les vannes qui contrôlent le débit d'air primaire (5 vannes pour les 5 groupes). Le débit de gaz naturel est asservi localement à celui d'air primaire, au niveau de chaque groupe. Nous pouvons ainsi régler le coefficient d'excès d'air primaire.

Dans cette partie, nous avons développé la commande du four en offrant à l'utilisateur deux possibilités :

- remplacement par le microcalculateur des régulateurs analogiques en service avant le début de cette étude (boucle locale)
- application des consignes reçues du MicroLAAS et calculées selon la méthode exposée dans le chapitre précédent.

Cette solution présente l'avantage d'une possibilité de prise en main de la conduite du processus par le MicroMANE dans le cas d'une panne ou par simple choix de l'opérateur au niveau du MicroLAAS. Ceci est très utile dans la phase de mise au point des algorithmes de calcul de la commande ou dans le cas de perte de porteuse sur la ligne téléphonique.

Dans le cas du choix d'une régulation locale, un thermocouple donne la température du gaz sous la voûte au niveau de chaque groupe de brûleurs. Cette température est comparée à une température de consigne. Si l'écart est positif, la vanne est commandée dans le sens de la fermeture, sinon, elle est commandée dans le sens de l'ouverture.

Dans le cas du choix de l'application des consignes reçues du MicroLAAS, le temps d'application de la commande (ouverture ou fermeture des vannes) est proportionnel à l'écart entre la valeur désirée de consigne et le débit mesuré et ceci pour tous les groupes des brûleurs (fig. 3.11.). Notons que pour une position donnée de la vanne d'air, le débit varie selon la pression d'air à l'entrée de cette vanne et ceci à cause des perturbations provoquées par l'ouverture ou la fermeture des autres vannes sur le circuit d'air.

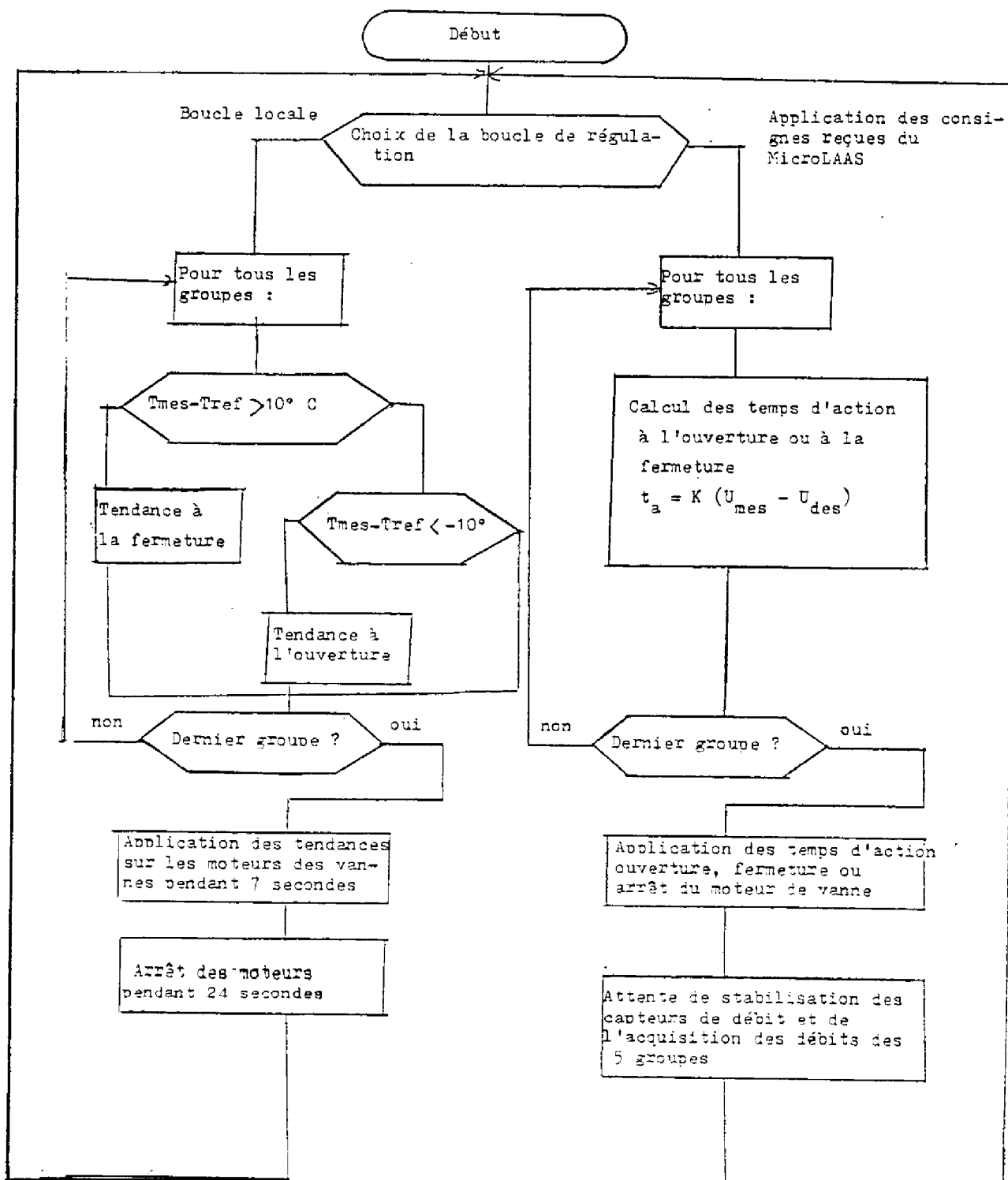


Fig. 3.10 : Organigramme de la commande des vannes

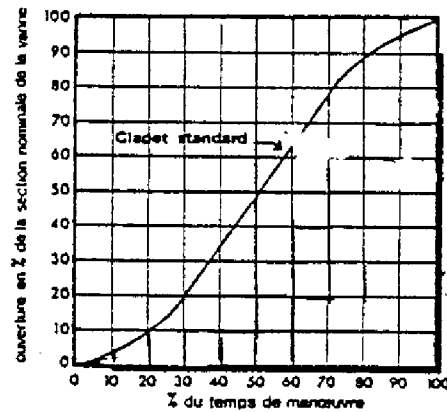


Fig. 3.11: Ouverture de la vanne en fonction du temps d'action sur son moteur.

C - Surveillance du fonctionnement

La surveillance du fonctionnement du four représente une partie indispensable de la qualité d'une conduite numérique d'un processus industriel de cuisson. La détection de panne ou de mauvais fonctionnement est en rapport direct avec le taux de produits cuits non utilisables, bien que la relation ne soit pas connue de façon exacte.

Il est évident que l'efficacité de la surveillance est en rapport avec les performances du calculateur. Dans notre cas nous avons réalisé la visualisation des mesures à l'aide du module synoptique. Cette visualisation permanente donne la possibilité à l'opérateur de constater rapidement toute anomalie éventuelle.

Les températures sont visualisées aux points de mesure par une colonne de 5 leds. Une verte indique un fonctionnement normal. Deux leds, de couleur orange, indiquent un écart de température, par rapport à la consigne, entre 50 et 100°K; deux leds de couleur rouge indiquent un écart supérieur à 100°K. Le délai maximum pour visualiser une anomalie à ce niveau est de 26 secondes (16 pour l'acquisition des températures et 10 pour le balayage de la carte synoptique). Les fourchettes de 50°K et de 100°K ont été, dans une phase préliminaire, fixées de façon arbitraire.

La visualisation de l'heure sur quatre digits permet la détection

des pannes de logiciels, de blocage du Moniteur Temps Réel, ou simplement des pannes du secteur.

Avec deux boutons poussoirs (avance-arrière) et six afficheurs numériques, nous pouvons voir défiler la liste des chariots dans le four. Ceci permet la surveillance de la progression des chariots (et par conséquent de la charge) durant leur séjour dans le four.

L'affichage des positions des vannes d'air avec les barres lumineuses à 10 positions permet de surveiller la réponse des moteurs des vannes à la commande appliquée.

D - Tâches diverses

Bien que le stockage des mesures soit une des fonctions affectées au MicroLAAS, nous avons implanté sur le microcalculateur installé sur le site du four un logiciel d'édition d'un journal de bord. Ce journal est listé sur une imprimante en mode asynchrone. Notons que la présence de l'imprimante n'est pas obligatoire, si elle n'est pas connectée, le moniteur temps réel n'est pas bloqué.

III.3.2. Les Logiciels du MicroLAAS

Ce calculateur joue le rôle d'unité centrale chargée de gérer la liaison téléphonique, de calculer la commande et de visualiser l'ensemble des mesures reçues.

Ces logiciels sont organisés selon l'organigramme de la figure 3.12. On peut distinguer trois parties principales :

A - La gestion de la ligne téléphonique et le calcul de la commande du système,

B - La visualisation des mesures reçues,

C - La sortie périodique des données sur une ligne asynchrone pour le stockage des mesures pour une utilisation hors ligne.

A - Gestion de la ligne téléphonique et calcul de la commande

Gestion de la ligne téléphonique : La synchronisation du transfert des données

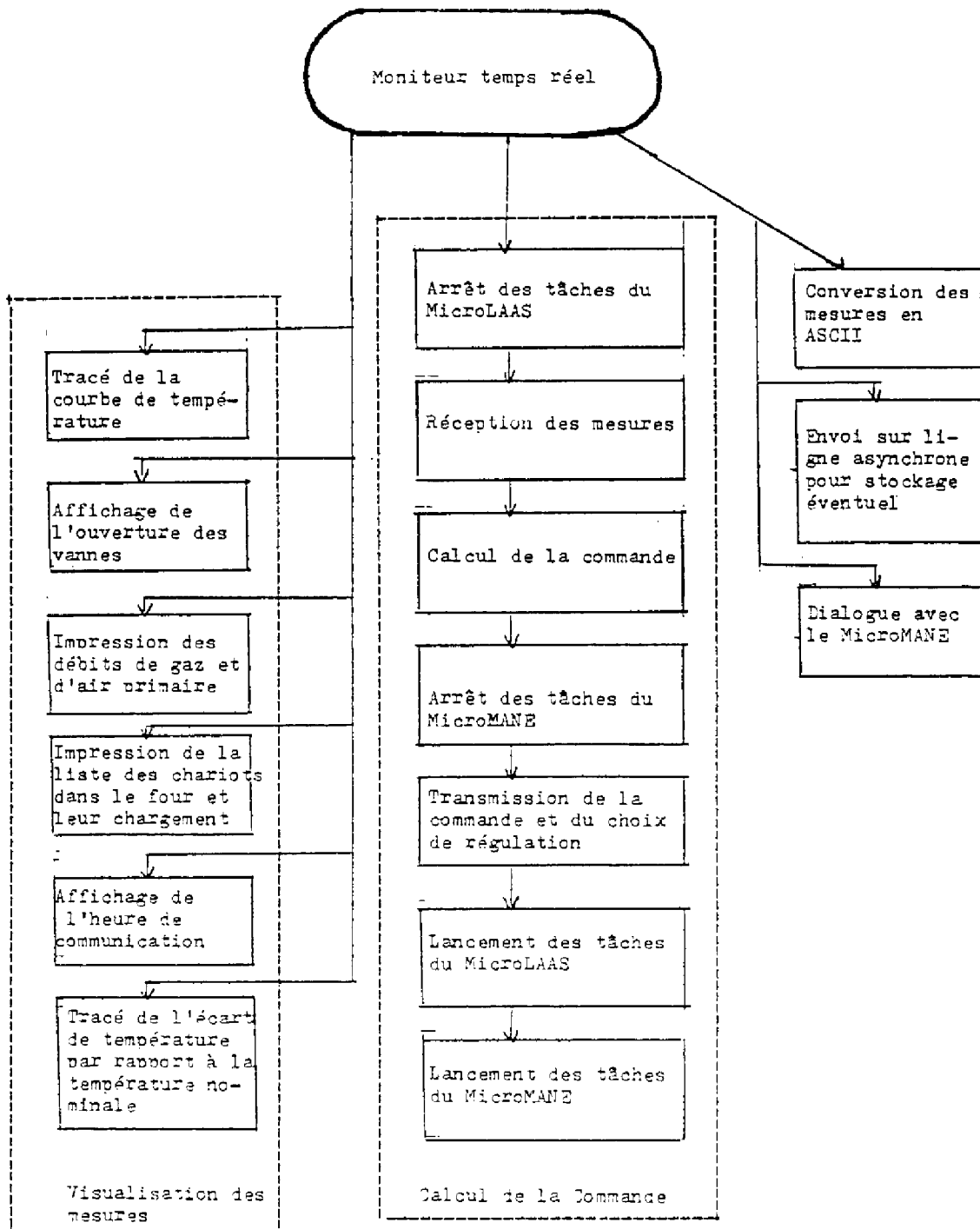


Fig. 3.12 Organisation des logiciels du MicroLAAS

sur la ligne est nécessaire pour ne pas avoir des problèmes de priorité d'excès à la ligne ou de perte de données. Pour assurer cette synchronisation, les transferts sont faits en deux temps. D'abord la réception des mesures transmises par le MicroMANE. Ensuite l'émission des nouvelles valeurs de consignes et des choix de régulation définis à l'initialisation du MicroLAAS. La vitesse de transmission est de 300 bauds (en raison du passage par une ligne téléphonique). La durée globale de la communication (émission + réception) occupe une partie importante du temps de l'unité centrale. Ceci entraîne une limitation dans le choix de la période d'échantillonnage du système pris dans sa globalité (MicroLAAS + MicroMANE). Notons que ce problème n'existera pas dans une application industrielle puisqu'on aurait un seul calculateur pour l'exécution de l'ensemble des travaux.

Calcul de la commande et estimation de l'état du système : Le calcul de la commande et l'estimation de l'état constituent une partie importante du logiciel de ce microcalculateur.

La structure adoptée à la réalisation de cette partie donne à l'utilisateur des choix possibles en fonction des réalisations techniques. Ceci a été rendu nécessaire à cause des retards pris par la réalisation et l'étalonnage des capteurs nécessaires au calcul de la commande. Ces choix sont fixés par la réponse à un questionnaire au moment du lancement du moniteur temps réel du MicroLAAS.

Remarques :

- La prise en compte de la charge variable du four dépend de l'installation et de l'étalonnage des jauges manométriques installées sous les rails à l'entrée du four. La variation de charge est prise en compte dans cette partie de la façon suivante :

$$\mu = \frac{\text{charge effective}}{\text{charge moyenne}}$$

où la charge effective est définie par la somme des poids des chariots à l'intérieur du four et de leurs charges. La charge moyenne est la moyenne obtenue sur une longue période [Réf. 5].

- La régulation du débit d'air secondaire dépend de l'étalonnage du capteur

de position du registre des fumées. La valeur prise par défaut est celle obtenue au premier chapitre.

L'estimateur de l'état du système est donné par l'équation (2.34) que nous rappelons ici :

$$(3.1) \quad \hat{\underline{a}}_{k+1} = \underline{A}o, \hat{\underline{a}}_k + \underline{B}o \cdot \underline{u}_{v_k} + \underline{d}o + \underline{k}o \cdot \underline{G}_{v(k)}$$

La commande du système est donnée par l'équation :

$$(3.2) \quad \underline{u}_v(t_i) = - R^{-1} B_L' P_1(t_i) \cdot \hat{\underline{a}}(t_i) - R^{-1} B_L' P_2(t_i) \cdot \underline{d}_L \cdot \mu$$

Dans la réalisation de cet algorithme nous nous sommes heurtés à trois problèmes :

- la place mémoire nécessaire pour la mémorisation des constantes matricielles ($\underline{A}o, \underline{B}o \dots P_1(t_i), P_2(t_i)$).
- la quantité de calcul à réaliser en ligne
- le choix de la période d'échantillonnage de l'équation de l'estimateur par rapport à la période de communication des deux calculateurs.

Place mémoire : D'après la remarque précédente, le deuxième terme du second membre de l'équation (3.2) varie avec le coefficient de surcharge μ . Les produits $P_2(t_i) \cdot \underline{d}_L$ sont effectués hors ligne et les résultats sont stockés dans la mémoire du calculateur, ce qui permet de réduire dans un rapport 5 la place mémoire nécessaire.

Le groupement des matrices $P_1(t_i)$ d'après la simulation faite au chapitre II (fig. 2.11 - 2.13) permet de réduire à 8 (au lieu de 31) le nombre des matrices $P_1(t_i)$.

Quantité de calcul : L'inversion de la matrice R ainsi que les produits matriciels $R^{-1} \cdot B_L' \cdot P_i$ sont effectués hors ligne. Nous avons ainsi à sauvegarder dans la mémoire du calculateur les matrices et vecteurs :

$$\begin{aligned} RBP_i &= - R^{-1} B_L' P_{1i} \\ \underline{r}_i &= - R^{-1} B_L' P_{2i} \cdot \underline{d}_L \end{aligned}$$

La commande du système s'écrit alors sous la forme :

$$\underline{u}_v = RBP_i \cdot \hat{a}(t_i) + \underline{r}_i$$

avec

$$\underline{u}_{\text{réel}} = \underline{u}_v + \underline{u}_N$$

nous obtenons ainsi l'algorithme de calcul de la commande donné en figure 3.13.

Dynamique de l'observateur : Nous avons choisi, pour l'estimateur de l'état du système, une dynamique rapide par rapport à la période séparant deux poussées et non seulement par rapport à la dynamique du four (qui est beaucoup plus lente). D'un autre côté, la période d'échantillonnage du système est limitée par la vitesse de communication entre les deux calculateurs ainsi que par les constantes de temps des capteurs et des actionneurs.

Pour résoudre ce problème, nous avons choisi une période d'échantillonnage de l'observateur 10 fois plus faible que celle du système (4,8 sec/48 sec). L'équation (3.1) est ainsi itérée 10 fois à chaque communication.

B - Visualisation des mesures

Cette fonction du MicroLAAS permet le suivi du fonctionnement du four à partir du laboratoire. L'ensemble des mesures reçues est visualisé sur l'écran vidéo du MicroLAAS.

- courbe de température : cette tâche trace sur un plan quadrillé la courbe de température dans le four. Cette courbe est obtenue par une interpolation linéaire des températures mesurées. Cette tâche trace aussi deux courbes limites de température entre lesquelles la courbe de température réelle doit se situer.

- visualisation de la commande : ce logiciel visualise la commande mesurée dans le four en imprimant pour chaque groupe de brûleurs les valeurs du débit d'air primaire et du débit de gaz naturel. L'ouverture de vanne pour chaque groupe est aussi visualisée avec une barre lumineuse sur une échelle allant de 0 à 100%.

- visualisation de la charge : cette tâche édite sur l'écran la liste des chariots se trouvant dans le four et de leurs charges mesurées lors de leur

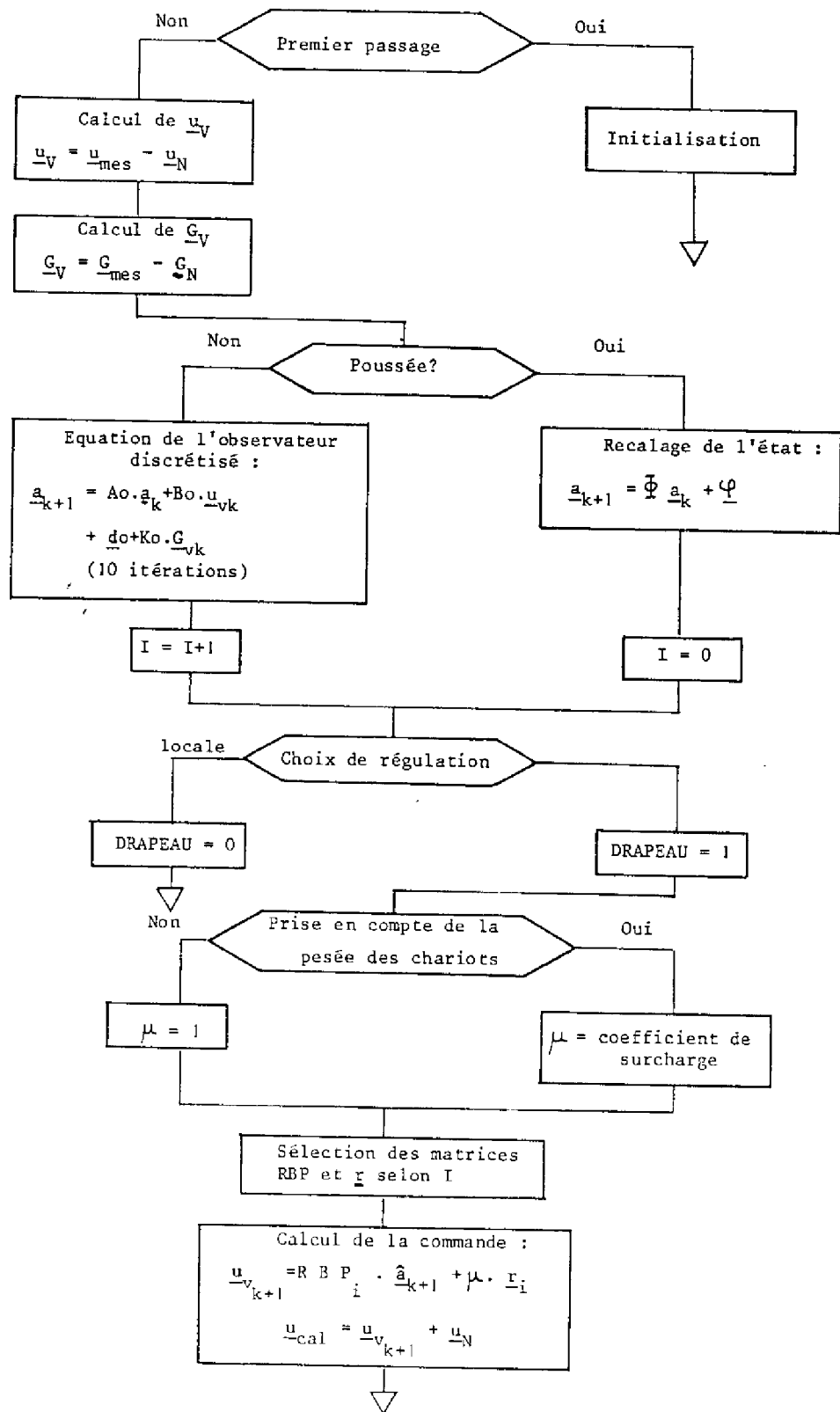


Fig. 3.13 : Calcul de la commande en temps réel.

entrée dans le four.

C - Stockage

Cette fonction du MicroLAAS est assurée, par l'émission d'une façon périodique sur une ligne asynchrone, des mesures reçues de l'autre calculateur, en vue de leur stockage sur une mémoire de masse.

III.4 FONCTIONNEMENT EN TEMPS REEL

La structure adoptée pour la conduite du four est une structure de développement. Elle doit servir à tester des algorithmes de commande dans la phase de mise au point, pour cela elle ne doit pas perturber le fonctionnement du système réel. En plus de cet aspect, la ligne téléphonique peut être coupée d'une façon aléatoire, ce qui nécessite la reprise du contrôle du système par le MicroMANE, c'est-à-dire appliquer la régulation autour des consignes de température (régulation locale).

Pour répondre à ces deux problèmes, le MicroMANE fonctionne d'une façon indépendante et l'intervention du MicroLAAS se fait en priorité inférieure pour ne pas perturber l'exécution des tâches. La régulation selon les consignes reçues du MicroLAAS se fait par le test d'un drapeau placé pendant le transfert et remis à zéro au moment de lecture des consignes par le MicroMANE. D'où un basculement en régulation locale de celui-ci en cas de coupure de la ligne téléphonique ou par simple choix fait par l'utilisateur au moment du lancement du Moniteur Temps Réel du MicroLAAS. Si pour une raison quelconque, aucune tâche du MicroMANE n'est exécutée, le système de redémarrage automatique (hardware) relance ce calculateur au bout d'une période d'attente.

Les tâches d'acquisition et de gestion de la carte synoptique de visualisation sont activées en permanence (sauf pendant la période de réception des consignes) pour assurer la surveillance du processus en visualisant les anomalies très rapidement (quand le cas se présente).

Le journal de bord est édité par paquets de 3 caractères par passage, pour ne pas bloquer le temps de l'unité centrale pour cette édition.

L'émission des données du MicroMANE se fait avec une priorité inférieure par rapport aux tâches d'acquisition, le transfert des données est donc interruptible par ces tâches, ce qui peut entraîner des erreurs de transmission. Pour résoudre ce problème, un transfert périodique des mesures est fait dans une zone mémoire "d'émission" où le MicroLAAS vient lire les mesures. Ce transfert se fait avec une priorité égale à celle des tâches.

Le MicroLAAS fonctionne de façon séquentielle. Il arrête ses tâches pour diminuer la probabilité d'erreur durant les transmissions, provoque l'émission des mesures par le MicroMANE, ensuite il calcule les nouvelles valeurs des consignes, provoque l'arrêt des tâches du MicroMANE et émet les valeurs calculées. Après cette phase de transmission, le MicroLAAS relance ses tâches de visualisation sur l'écran et d'émission des données pour le stockage sur mémoire de masse. A cet instant le MicroMANE relance aussi ses tâches. Ce cycle est recommencé de façon périodique. Cette période est celle d'échantillonnage fixée au chapitre précédent. (fig. 3.14).

Notons que le MicroMANE démarre automatiquement à la mise sous tension et prend le contrôle du four en mode local. Ceci est très important pour remédier au problème de coupure du secteur.

CONCLUSION

L'introduction d'un calculateur dans la conduite d'un four de cuisson céramique nous paraît être un des points essentiels pour l'amélioration du fonctionnement du système. En effet, le système informatique permet des études de longue durée par la capacité de stockage qu'il nous offre. Ce qui permet d'observer rapidement l'évolution de la cuisson qui est un phénomène très long à l'observation directe. (défilement en accéléré des enregistrements).

Les mesures en ligne et les régulations sont faites avec une précision suffisante. Les programmes d'acquisition sont faits de façon à éliminer les points de mesures aberrants, ceux-ci pouvant perturber de façon importante le fonctionnement du système.

Bien que nous n'ayons pas pu tester en ligne la conduite totale du four par le calculateur, et ceci à cause des retards importants pris dans les réalisations techniques, en particulier l'étalonnage et l'installation des

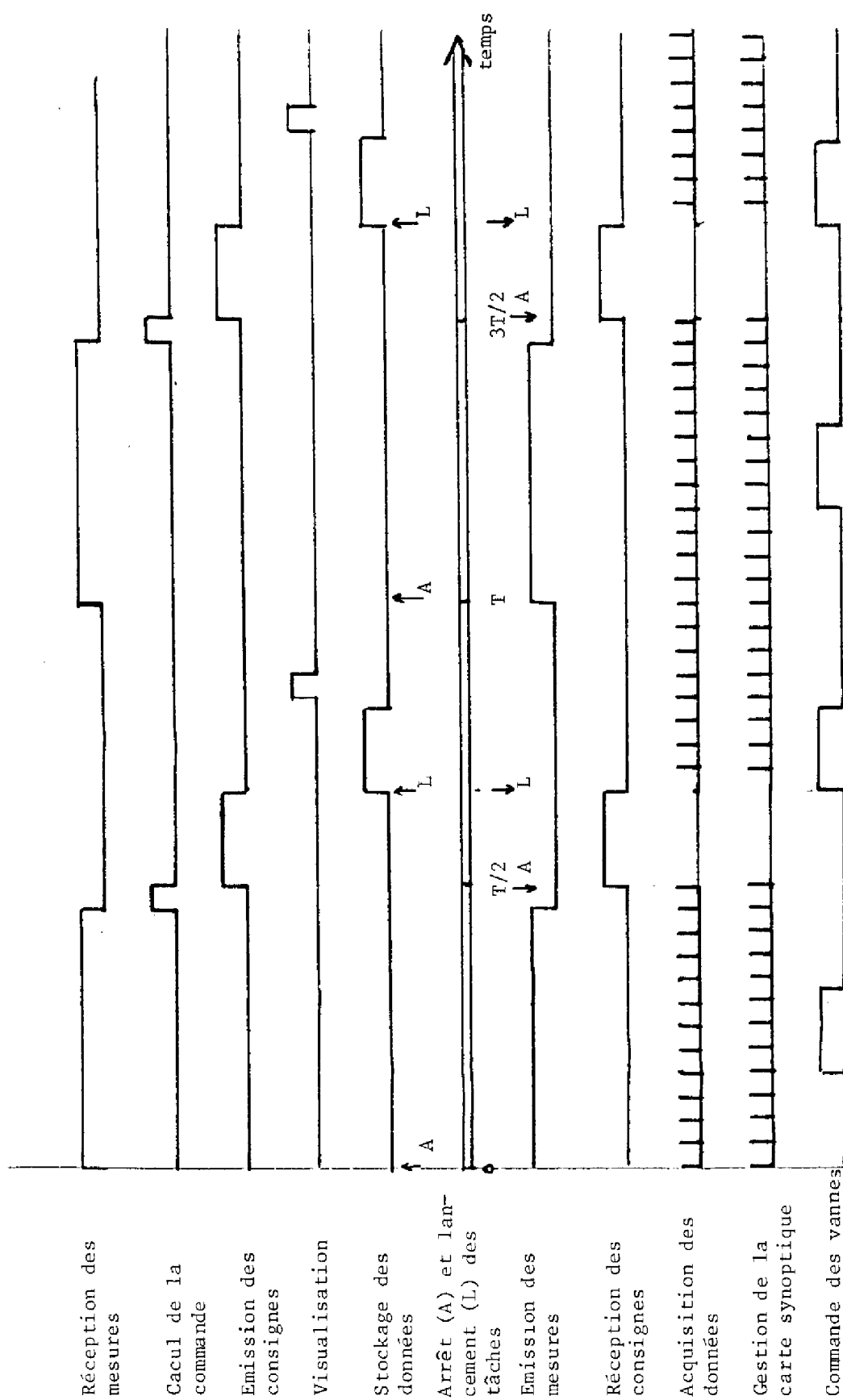


Fig. 3.14 : Organisation des logiciels des deux calculateurs

capteurs de débit, nous pensons que les logiciels réalisés sont modifiables facilement.

Le système microinformatique offre à l'utilisateur du four une capacité de visualisation et de surveillance qu'on ne trouve pas sur les régulations analogiques qui sont classiquement installées sur les fours tunnels.

En dehors des considérations techniques, le système informatique dont nous disposons (deux microcalculateurs couplés à un environnement périphérique et à un processus réel), nous a permis de nous familiariser avec de nombreux aspects de la conduite en temps réel de processus industriels, ce qui représente un enrichissement personnel non négligeable.

CONCLUSION

Dans ce mémoire ont été développées des études concernant l'optimisation du régime de fonctionnement, le calcul d'un algorithme de régulation et la conduite numérique d'un four d'industrie céramique par microcalculateur.

A partir d'une modélisation du fonctionnement thermique du four sous la forme d'un système d'équations différentielles non-linéaires aux dérivées partielles, nous avons établi des modèles simplifiés.

Le modèle statique moyen a servi pour la définition d'un régime nominal de fonctionnement et ceci par l'optimisation d'un critère de type économique. Cette optimisation nous a amené à proposer des modifications dans la structure de l'action par l'introduction de deux groupes supplémentaires de brûleurs et de refroidisseurs. L'introduction du premier groupe de brûleurs dans la zone de préchauffage a permis d'augmenter la production du four de 15%. L'amélioration apportée par l'introduction d'un second groupe dans la zone de refroidissement et des refroidisseurs n'a pas été encore chiffrée. Notons que ces résultats sont confirmés par les nouvelles réalisations techniques dans le domaine de la céramique lourde.

Le modèle à paramètres localisés linéaire nous a permis de calculer une loi de commande en boucle fermée du four, Cet algorithme a donné des résultats satisfaisants en ce qui concerne la dynamique de la commande et sa robustesse par rapport à des perturbations de la charge du four. L'estimation de l'état du système a permis la reconstitution du profil thermique dans la charge et le recalage de l'état à chaque poussée permet de réduire d'une façon importante le transitoire provoqué par cette poussée.

La conduite numérique du processus a été réalisée, à notre avis, d'une façon souple de façon à pouvoir modifier facilement une ou plusieurs parties des logiciels. Toutefois il reste deux problèmes à traiter :

- . l'étalonnage du capteur de débit des fumées de soutirage en fonction de la position du registre des fumées, ce qui permettra la prise en compte du débit d'air secondaire du four au niveau de l'algorithme de commande. Notons que l'algorithme de régulation tient compte de ce problème en offrant à l'utilisateur le choix entre la régulation de ce débit ou la prise d'une valeur moyenne.

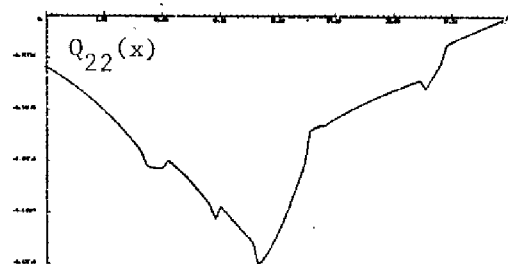
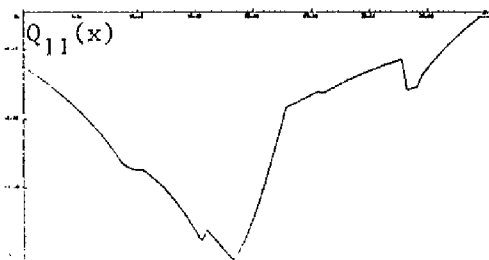
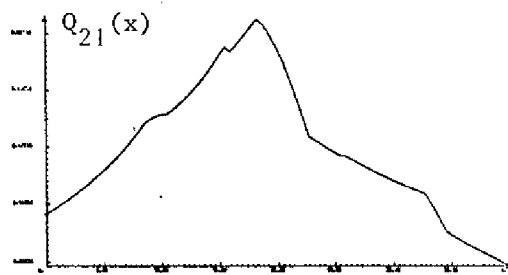
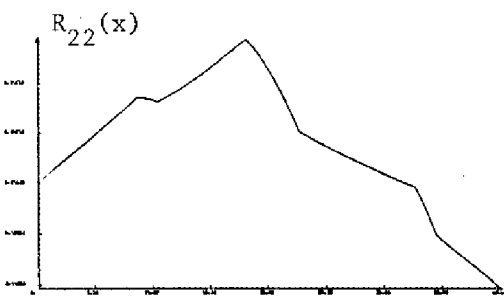
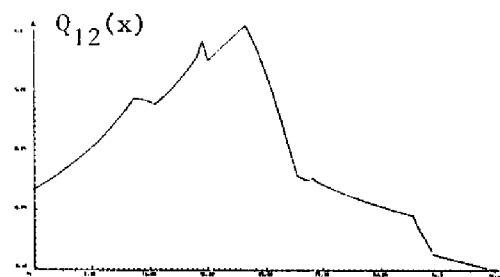
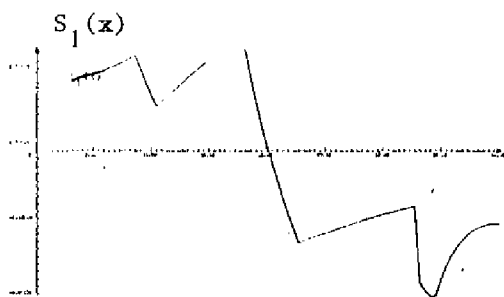
- . Le transfert de l'ensemble des logiciels sur un seul calculateur pour le fonctionnement dans une configuration industrielle. Ceci reviendrait à déplacer les adresses d'implantation de quelques tâches ce qui ne doit pas poser de problèmes majeurs.

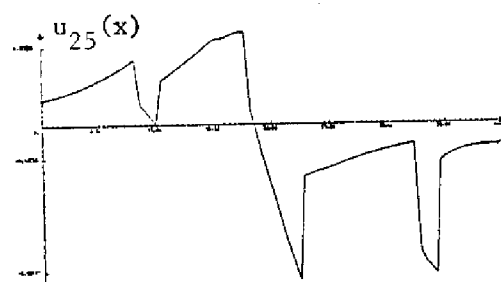
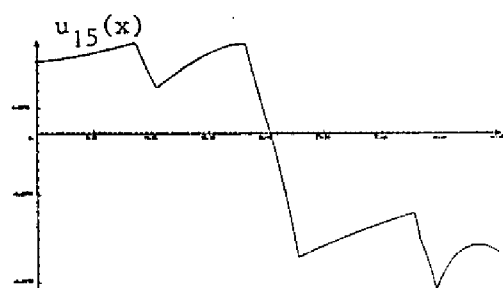
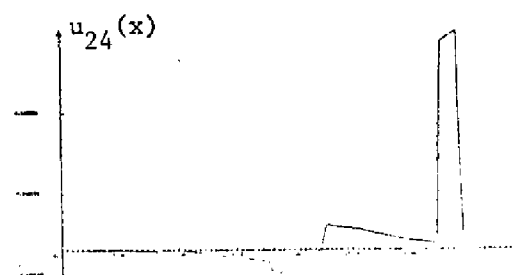
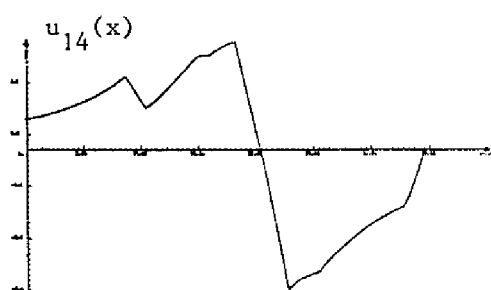
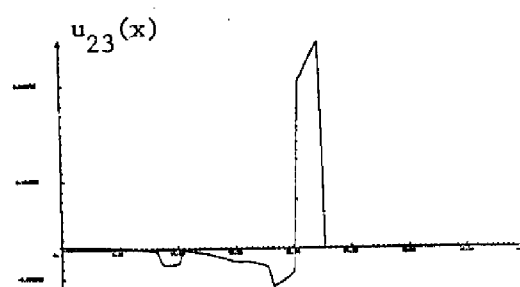
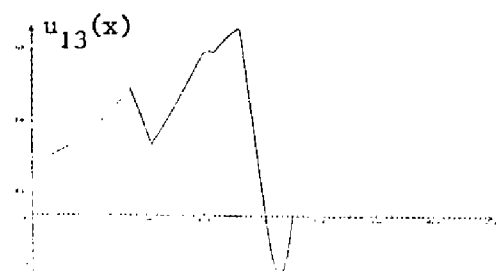
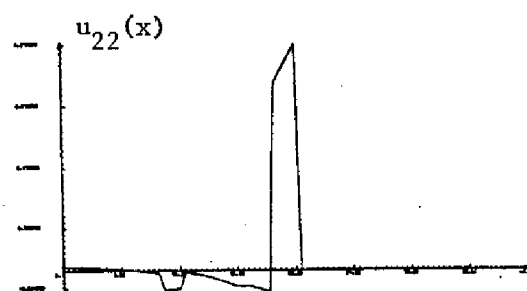
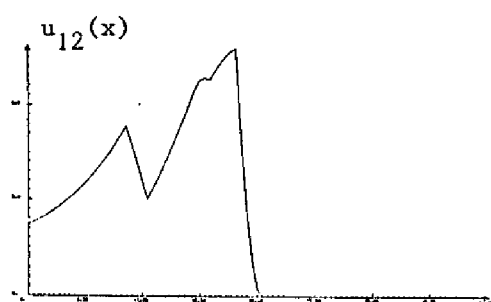
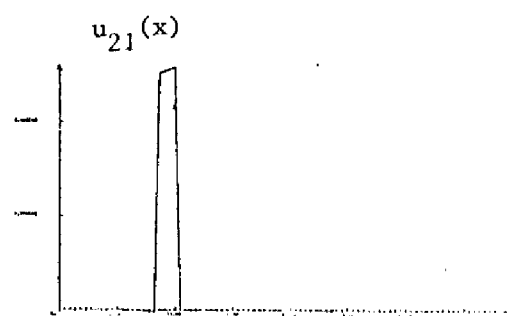
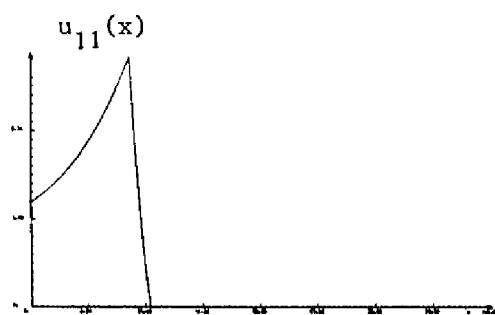
Hormis ces deux problèmes, nous pensons que la conduite du processus telle qu'elle a été réalisée offre à l'utilisateur un moyen performant de surveillance du fonctionnement du four, surtout si l'on doit la comparer avec les régulations classiques (analogiques ou par automate programmable) où l'on dispose d'un nombre plutôt faible d'informations sur l'état du système.

ANNEXE I

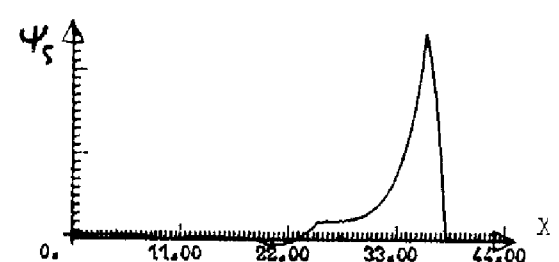
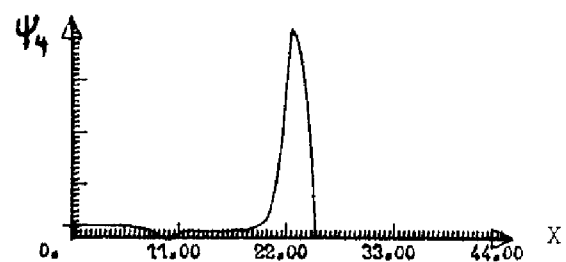
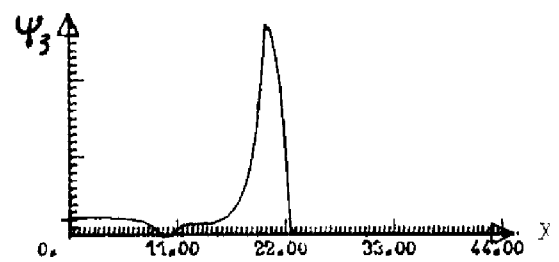
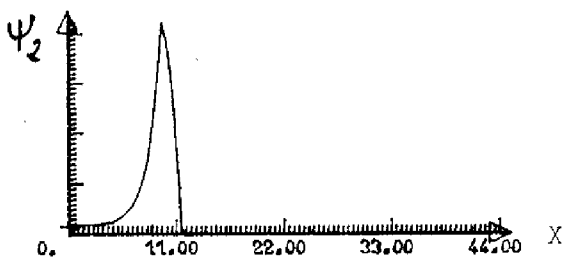
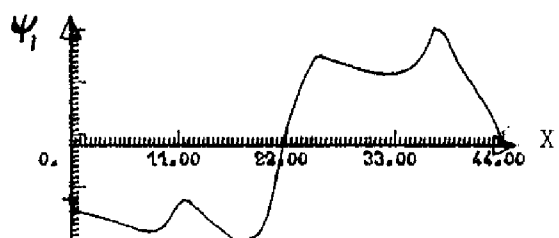
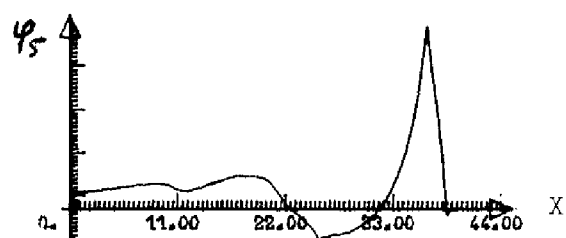
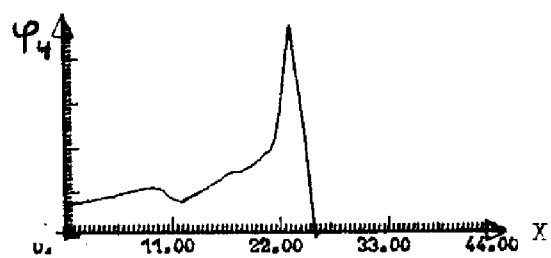
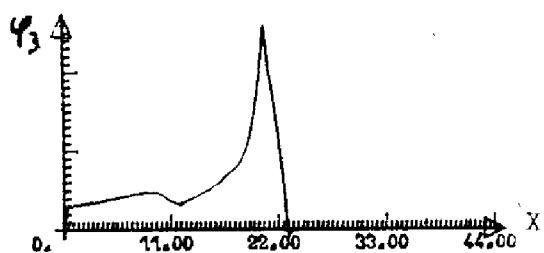
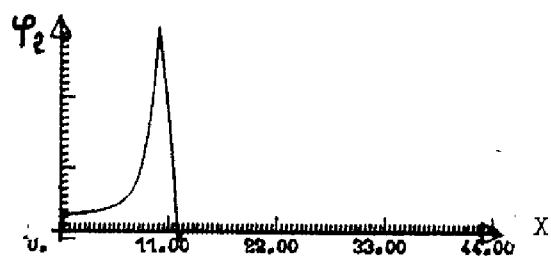
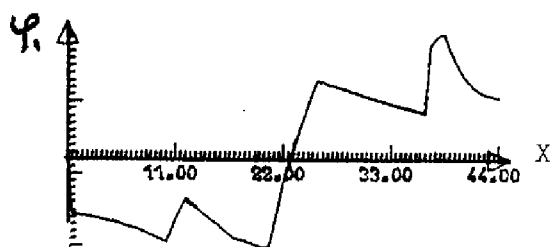
COEFFICIENTS DE LINEARISATION

-;-





FONCTIONS DE BASE POUR L'APPROXIMATION DE GALERKIN



1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-15.2542	0.1241	0.3248	0.3405	0.2004
3	-15.4404	0.1156	0.3025	0.3170	0.1866
4	-15.6058	0.1290	0.3127	0.3279	0.1970
5	-15.8676	0.1238	0.3218	0.3373	0.1985
6	-16.1117	0.1281	0.3313	0.3473	0.2044
7	-16.3805	0.1330	0.3415	0.3580	0.2107
8	-16.6751	0.1387	0.3523	0.3692	0.2174
9	-16.9963	0.1455	0.3636	0.3811	0.2244
10	-17.3450	0.1539	0.3756	0.3937	0.2317
11	-17.7221	0.1645	0.3881	0.4068	0.2394
12	-18.1288	0.1766	0.4011	0.4204	0.2475
13	-18.5658	0.1977	0.4144	0.4343	0.2557
14	-19.0343	0.2245	0.4277	0.4483	0.2639
15	-19.5331	0.2623	0.4409	0.4621	0.2720
16	-20.0611	0.3191	0.4531	0.4749	0.2795
17	-20.6212	0.4024	0.4636	0.4859	0.2860
18	-21.2119	0.5275	0.4709	0.4936	0.2905
19	-21.9339	0.7167	0.4728	0.4956	0.2917
20	-22.4876	1.0050	0.4660	0.4883	0.2874
21	-23.1735	1.4460	0.4439	0.4661	0.2746
22	-19.6738	1.1463	0.3958	0.4146	0.2440
23	-16.7360	0.8718	0.3583	0.3751	0.2208
24	-13.7594	0.4636	0.3310	0.3471	0.2042
25	-10.9410	-0.0699	0.3226	0.3373	0.1984
26	-12.0345	0.0065	0.3564	0.3719	0.2187
27	-13.1418	-0.0104	0.3652	0.4012	0.2359
28	-14.2661	0.0000	0.4150	0.4318	0.2537
29	-15.4103	0.0	0.4478	0.4632	0.2719
30	-16.5650	0.0	0.4813	0.4953	0.2904
31	-17.7198	0.0	0.5184	0.5282	0.3091
32	-18.8958	0.0	0.5584	0.5615	0.3277
33	-19.9951	0.0	0.6055	0.5972	0.3471
34	-20.9805	0.0	0.6635	0.6348	0.3665
35	-21.9380	0.0	0.7204	0.6679	0.3828
36	-22.3790	0.0	0.7685	0.6700	0.3784
37	-22.6922	0.0	0.8401	0.6704	0.3697
38	-23.2397	0.0	0.9305	0.7035	0.3756
39	-23.8182	0.0	1.1780	0.7346	0.3722
40	-24.2764	0.0	1.4721	0.7723	0.3624
41	-24.5878	0.0	1.9144	0.8206	0.3406
42	-24.7009	0.0	2.5851	0.8867	0.3021
43	-17.9742	0.0	2.0082	0.9180	0.2094
44	-12.0443	0.0	1.6349	1.0758	0.1354
45	-6.6023	0.0	1.1889	1.3813	0.0665
46	-1.7191	0.0	0.6346	1.9077	0.0666
47	2.6993	0.0	-0.0988	2.3310	-0.0410
48	6.6359	0.0	0.0093	1.8827	-0.0906
49	10.9221	0.0	-0.0006	1.5051	-0.1463
50	14.8402	0.0	0.0000	1.0575	-0.2054
51	18.5482	0.0	0.0	0.5367	-0.2735
52	22.1580	0.0	0.0	-0.0031	-0.3562
53	21.5947	0.0	0.0	0.0047	-0.3261
54	21.1002	0.0	0.0	-0.0003	-0.3116
55	20.6596	0.0	0.0	0.0000	-0.2766
56	20.2505	0.0	0.0	0.0	-0.2914
57	19.8542	0.0	0.0	0.0	-0.2023
58	19.4499	0.0	0.0	0.0	-0.2714
59	18.9418	0.0	0.0	0.0	-0.2379
60	18.4636	0.0	0.0	0.0	-0.2055
61	18.0031	0.0	0.0	0.0	-0.1678
62	17.5581	0.0	0.0	0.0	-0.1239
63	17.1165	0.0	0.0	0.0	-0.0720
64	16.6857	0.0	0.0	0.0	-0.0104
65	16.2730	0.0	0.0	0.0	0.0635
66	15.8765	0.0	0.0	0.0	0.1525
67	15.4944	0.0	0.0	0.0	0.2604
68	15.1158	0.0	0.0	0.0	0.3918
69	14.7481	0.0	0.0	0.0	0.5522
70	14.3991	0.0	0.0	0.0	0.7483
71	14.0490	0.0	0.0	0.0	0.9887
72	13.7127	0.0	0.0	0.0	1.2835
73	13.3889	0.0	0.0	0.0	1.6453
74	13.0764	0.0	0.0	0.0	2.0896
75	31.5255	0.0	0.0	0.0	1.5854
76	33.4007	0.0	0.0	0.0	1.1592
77	34.8269	0.0	0.0	0.0	0.6071
78	34.7227	0.0	0.0	0.0	-0.0690
79	30.8164	0.0	0.0	0.0	0.0049
80	27.6566	0.0	0.0	0.0	-0.0002
81	25.1064	0.0	0.0	0.0	0.0000
82	23.0546	0.0	0.0	0.0	-0.0000
83	21.4139	0.0	0.0	0.0	0.0
84	20.1164	0.0	0.0	0.0	0.0
85	19.1094	0.0	0.0	0.0	0.0
86	18.3528	0.0	0.0	0.0	0.0
87	17.8164	0.0	0.0	0.0	0.0
88	17.4781	0.0	0.0	0.0	0.0
89	17.3233	0.0	0.0	0.0	0.0

$\phi =$

1	-10.4407	0.1517	0.3931	0.4121	0.2423
2	-12.7646	0.1711	0.4010	0.4023	0.2719
3	-12.8624	0.1713	0.4371	0.4582	0.2695
4	-13.0563	0.1748	0.4364	0.4195	0.2702
5	-13.2662	0.1785	0.4396	0.4602	0.2706
6	-13.4948	0.1844	0.4392	0.4604	0.2707
7	-13.7422	0.1931	0.4387	0.4599	0.2704
8	-14.0081	0.2056	0.4374	0.4585	0.2696
9	-14.2917	0.2245	0.4350	0.4560	0.2681
10	-14.5912	0.2522	0.4310	0.4518	0.2656
11	-14.9039	0.2932	0.4250	0.4455	0.2619
12	-15.2251	0.3539	0.4161	0.4362	0.2564
13	-15.5473	0.4436	0.4033	0.4227	0.2485
14	-15.8583	0.5757	0.3650	0.4035	0.2372
15	-16.1396	0.7700	0.3591	0.3763	0.2211
16	-16.3829	1.0549	0.3222	0.3376	0.1984
17	-16.4640	1.4715	0.2698	0.2626	0.1660
18	-16.4340	2.0786	0.1950	0.2040	0.1197
19	-16.1056	2.9608	0.0679	0.0915	0.0535
20	-15.3311	4.2381	-0.0659	-0.0701	-0.0416
21	-14.0565	3.7934	-0.0413	-0.0449	-0.0268
22	-12.3568	2.9773	0.0087	0.0067	0.0035
23	-11.1205	1.8124	0.1045	0.1059	0.0617
24	-10.5073	0.0939	0.2655	0.2727	0.1596
25	-10.6795	-0.0146	0.2623	0.2665	0.1555
26	-11.5774	0.0014	0.2671	0.2673	0.1554
27	-12.4403	-0.0001	0.2710	0.2649	0.1532
28	-13.3013	0.0000	0.2763	0.2607	0.1495
29	-14.1520	0.0	0.2849	0.2552	0.1443
30	-14.9812	0.0	0.3002	0.2491	0.1379
31	-15.7694	0.0	0.3303	0.2476	0.1327
32	-16.5094	0.0	0.3762	0.2482	0.1265
33	-17.1950	0.0	0.4560	0.2551	0.1206
34	-17.9650	0.0	0.5632	0.2741	0.1165
35	-18.1327	0.0	0.7553	0.2934	0.1060
36	-18.0028	0.0	0.9950	0.3063	0.0809
37	-17.9628	0.0	1.3492	0.3260	0.0438
38	-17.7168	0.0	1.8021	0.3704	-0.0024
39	-17.0109	0.0	2.6638	0.4403	-0.0681
40	-15.6683	0.0	3.8063	0.5509	-0.1608
41	-13.3456	0.0	5.4665	0.7233	-0.2913
42	-9.9208	0.0	5.3111	1.3346	-0.2905
43	-5.2731	0.0	4.6866	2.2504	-0.2885
44	-0.9740	0.0	3.7920	3.6689	-0.2579
45	3.2364	0.0	2.3526	5.8145	-0.1988
46	6.2576	0.0	0.1449	7.9660	-0.0639
47	8.9784	0.0	-0.0232	7.6618	0.0689
48	11.4372	0.0	0.0022	6.7874	0.2685
49	13.5942	0.0	-0.0001	5.3036	0.5040
50	15.3555	0.0	0.0	3.2340	0.7797
51	16.6950	0.0	0.0	0.1143	1.0989
52	17.0311	0.0	0.0	-0.0136	1.0714
53	16.5946	0.0	0.0	0.0010	1.0796
54	16.2104	0.0	0.0	-0.0001	1.0949
55	15.9320	0.0	0.0	0.0	1.1196
56	15.6411	0.0	0.0	0.0	1.1452
57	15.3592	0.0	0.0	0.0	1.1765
58	15.0858	0.0	0.0	0.0	1.2162
59	14.7484	0.0	0.0	0.0	1.2892
60	14.4448	0.0	0.0	0.0	1.3933
61	14.1734	0.0	0.0	0.0	1.5366
62	13.9386	0.0	0.0	0.0	1.7251
63	13.7406	0.0	0.0	0.0	1.9707
64	13.6038	0.0	0.0	0.0	2.2856
65	13.5234	0.0	0.0	0.0	2.6897
66	13.4190	0.0	0.0	0.0	3.1862
67	13.2932	0.0	0.0	0.0	3.8115
68	13.1461	0.0	0.0	0.0	4.5882
69	12.9842	0.0	0.0	0.0	5.5495
70	12.8192	0.0	0.0	0.0	6.7330
71	12.6516	0.0	0.0	0.0	8.1647
72	12.4731	0.0	0.0	0.0	9.9758
73	12.2843	0.0	0.0	0.0	12.1620
74	12.0848	0.0	0.0	0.0	10.6605
75	11.8739	0.0	0.0	0.0	8.2405
76	11.6545	0.0	0.0	0.0	4.8337
77	11.4354	0.0	0.0	0.0	0.1076
78	11.2162	0.0	0.0	0.0	-0.0125
79	10.9966	0.0	0.0	0.0	0.0009
80	10.7769	0.0	0.0	0.0	-0.0001
81	10.5572	0.0	0.0	0.0	0.0
82	10.3375	0.0	0.0	0.0	0.0
83	10.1178	0.0	0.0	0.0	0.0
84	9.8981	0.0	0.0	0.0	0.0
85	9.6784	0.0	0.0	0.0	0.0
86	9.4587	0.0	0.0	0.0	0.0
87	9.2390	0.0	0.0	0.0	0.0
88	9.0193	0.0	0.0	0.0	0.0
89	8.7996	0.0	0.0	0.0	0.0

cφ =

$$A_L = \begin{bmatrix} -8.8070-02 & -1.7120-03 & -8.5290-03 & -5.2300-03 & -2.6150-03 \\ -1.0440+00 & -3.2280-01 & -7.1500-02 & -9.1140-02 & 1.6130-02 \\ 3.2470+00 & -2.5390-02 & -3.2710-01 & 2.4880-01 & -6.6680-02 \\ 1.3870+00 & 1.6030-02 & -1.2870-01 & -4.7080-01 & 1.7070-02 \\ -8.6660-01 & 3.0720-02 & 1.3690-01 & 5.3010-02 & -2.6020-01 \end{bmatrix}$$

$$B_L = \begin{bmatrix} -8.8180-03 & -2.2440-03 & 1.2340-02 & 1.2540-03 & -1.1840-03 \\ -1.5150+01 & -6.6430-01 & -4.9680-01 & -5.0320-02 & -1.4010-03 \\ -1.0090-01 & 6.6370+00 & 1.2030+00 & -1.0700-01 & -6.9680-03 \\ 1.3190-01 & -3.9320-01 & 5.2840+00 & -1.4320-01 & -6.9250-03 \\ 1.6400-01 & 1.9460-01 & -1.3560-01 & 7.2450+00 & -2.0930-03 \end{bmatrix}$$

$$\frac{d'}{L} = \begin{bmatrix} -2.7810+00 & 2.0670-01 & 6.2820-02 & -4.4380+00 & -6.4920+00 \end{bmatrix}$$

Matrices C_o et D_o (aux 12 points de mesure)

$$C_o = \begin{bmatrix} -1.6180+01 & 2.0950-02 & 4.3710-01 & 4.1760-01 & 2.7520-01 \\ -1.8550+01 & 1.7640-01 & 4.6640-01 & 4.4620-01 & 2.9990-01 \\ -1.4970+01 & 8.2000-01 & 2.8620-01 & 3.1640-01 & 1.7070-01 \\ -1.5800+01 & 5.0190-02 & 3.7790-01 & 3.4520-01 & 2.5270-01 \\ -2.1050+01 & 5.8980-02 & 6.8030-01 & 5.3850-01 & 3.2010-01 \\ -4.1750+00 & -2.7830-02 & 1.4070+00 & 1.1140+00 & 3.8530-02 \\ 1.2630+01 & -4.4570-03 & -2.7600-01 & 9.6290-01 & -1.0660-01 \\ 1.9390+01 & -5.2950-02 & -3.0870-01 & -2.7290-01 & -1.1960-01 \\ 1.6670+01 & -3.9000-02 & -2.2920-01 & -2.0560-01 & 1.2550-02 \\ 1.6500+01 & -1.4610-02 & -9.3730-02 & -9.6810-02 & 4.3640-01 \\ 2.3490+01 & 1.3580-02 & 5.7260-02 & 1.5050-02 & 1.2290+00 \\ 1.6650+01 & -5.3310-02 & -3.0860-01 & -2.6920-01 & -2.4110-01 \end{bmatrix}$$

$$D_o = \begin{bmatrix} 9.3410-01 & 1.9970-01 & 3.7790-02 & -1.5710-01 & 1.0080-02 \\ 2.6740+00 & -2.9210-02 & -1.8770-01 & -3.4350-01 & 1.1560-02 \\ 1.7220+01 & -1.1500+00 & -1.0930+00 & -8.0680-01 & 4.9560-03 \\ 5.9340-02 & -3.3800-02 & -2.3620-01 & -4.0250-01 & 1.1190-02 \\ 6.8530-02 & 1.1090+00 & -4.0400-01 & -8.5550-01 & 1.3270-02 \\ -4.2110-02 & 8.3080+00 & 3.3400+00 & -1.2120+00 & -1.4270-02 \\ -7.2210-03 & 3.6320-02 & 1.1740+01 & 1.1870+00 & -2.2350-02 \\ -6.3760-02 & 5.4240-01 & 6.8240-01 & 3.4080+00 & -1.7370-02 \\ -4.7410-02 & 4.0520-01 & 5.1310-01 & 4.7330+00 & -1.6210-02 \\ -1.9650-02 & 1.7600-01 & 2.3660-01 & 1.1310+01 & -2.0700-02 \\ 1.1080-02 & -7.1590-02 & -5.1230-02 & 2.5600+01 & -3.6160-02 \\ -6.3670-02 & 5.3930-01 & 6.7470-01 & 7.6430-01 & -1.3400-02 \end{bmatrix}$$

8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43						
44						
45						
46						
47						
48						
49						
50						
51						
52						
53						
54						
55						
56						
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
66						
67						
68						
69						
70						
71						
72						
73						
74						
75						
76						
77						
78						
79						
80						
81						
82						
83						
84						
85						
86						
87						
88						
89						
90						
91						
92						
93						
94						
95						
96						
97						
98						
99						
100						

1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					
45					
46					
47					
48					
49					
50					
51					
52					
53					
54					
55					
56					
57					
58					
59					
60					
61					
62					
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70					
71					
72					
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					
81					
82					
83					
84					
85					
86					
87					
88					
89					
90					
91					
92					
93					
94					
95					
96					
97					
98					
99					
100					

1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	
82	
83	
84	
85	
86	
87	
88	
89	
90	
91	
92	
93	
94	
95	
96	
97	
98	
99	
100	

A N N E X E I I

ESTIMATION DE L'ÉTAT DU SYSTÈME

-:-

Matrice K

-3.093D-01	-3.367D-01	-1.805D-01	-2.640D-01	-3.831D-01	6.374D-02
2.022D-01	5.568D-01	4.585D-01	3.771D-01	2.641D-01	6.494D-01
1.120D+00	4.203D+00	5.570D+01	-4.369D+00	-6.731D+00	-5.899D+00
-2.896D+00	4.978D+00	3.923D+00	2.570D+00	-6.115D-01	5.322D+00
4.503D+00	6.041D+00	5.661D+00	6.971D+00	1.520D+01	5.896D+01
-1.344D+01	6.198D+00	4.858D+00	3.038D+00	-1.174D+00	6.558D+00
5.512D+00	6.785D+00	4.137D+00	7.067D+00	9.934D+00	5.841D+00
4.693D+01	3.077D-01	2.398D-01	1.276D-01	-1.666D-01	3.149D-01
2.334D+00	2.777D+00	1.044D+00	2.866D+00	3.984D+00	-1.160D+00
-1.752D+00	-4.852D+00	-2.255D+00	4.625D+00	2.706D+01	-8.903D-01

DISCRETISATION DE L'OBSERVATEUR

MATRICE A0

$$\begin{bmatrix} 9.1880-01 & 3.9690-04 & 1.2650-03 & 8.6340-04 & 1.5860-04 \\ 5.1220-01 & 9.4610-01 & 1.3510-05 & -1.6350-03 & -7.3460-03 \\ 8.6170-01 & -4.9770-03 & 8.8560-01 & -7.0600-02 & -1.3190-02 \\ 1.2670-02 & -6.3130-03 & -1.2400-02 & 9.2300-01 & -4.6370-03 \\ -3.6370-01 & -3.0790-03 & -9.7390-03 & -5.0600-03 & 9.5250-01 \end{bmatrix}$$

MATRICE B0

$$\begin{bmatrix} 4.7910-03 & -1.7630-03 & -5.1690-03 & -1.9290-02 & 7.4690-05 \\ -1.1280+00 & 1.3240-01 & 1.1920-01 & -2.3460-02 & -9.6370-05 \\ -1.2280-01 & -5.7460-01 & -1.8610-02 & 6.2900-02 & 4.6000-04 \\ -1.0610-01 & -6.4400-02 & -6.4860-01 & -5.4150-02 & 8.9560-04 \\ -3.2140-02 & 1.6990-02 & 4.2560-02 & -8.3070-01 & 8.5720-04 \end{bmatrix}$$

MATRICE D0

$$\begin{bmatrix} -3.2460-03 & -6.0730-04 & -1.1660-03 & -5.1960-03 & -7.0690-03 \end{bmatrix}$$

MATRICE C0

$$\begin{bmatrix} -3.5360-04 & -3.8290-04 & -1.8980-04 & -2.9920-04 & -4.3050-04 & 1.2300-04 \\ 2.5010-04 & 6.5530-04 & 5.3960-04 & 4.4340-04 & 3.0960-04 & 7.6400-04 \\ 1.2100-03 & 4.8470-03 & 6.5350-02 & -5.2760-03 & -8.1780-03 & -6.9660-03 \\ -3.4040-03 & 6.0900-03 & 4.7980-03 & 3.1400-03 & -7.6260-04 & 6.5090-03 \\ 4.7210-03 & 6.3970-03 & 6.0130-03 & 7.5160-03 & 1.6740-02 & 6.7330-02 \\ -1.7350-02 & 7.4110-03 & 5.6690-03 & 3.6890-03 & -1.4170-03 & 7.8390-03 \\ 6.3940-03 & 7.8570-03 & 4.5670-03 & 8.2130-03 & 1.1510-02 & 6.3950-03 \\ 5.4980-02 & 3.1100-04 & 2.3780-04 & 1.0500-04 & -2.5940-04 & 3.0460-04 \\ 2.7940-03 & 3.3070-03 & 1.1270-03 & 3.4060-03 & 4.7050-03 & -1.7560-03 \\ -2.1890-03 & -5.9350-03 & -2.8130-03 & 5.3620-03 & 3.2000-02 & -1.2540-03 \end{bmatrix}$$

RECALAGE DE L'ETAT A LA POUSSEE

$$\Phi = \begin{bmatrix} 9.8990-01 & -3.5580-04 & 2.8460-03 & 1.2710-03 & -1.8910-03 \\ 1.4890+00 & 6.9370-01 & -7.4460-03 & -2.1030-03 & -3.2490-03 \\ -1.8960+00 & -2.5620-03 & 1.3160+00 & -1.2080-01 & 3.6220-02 \\ -1.5370+00 & 3.5770-03 & -9.3460-02 & 1.2240+00 & 2.0230-02 \\ 5.4920-01 & 3.3330-03 & -3.1750-02 & -1.3810-02 & 7.9860-01 \end{bmatrix}$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} 1.0000+00 & -7.7720-15 & -7.7720-15 & -4.8570-16 & -5.5910-17 \end{bmatrix}$$

BIBLIOGRAPHIE

- 1 M. KASSINOPOULOS
Modélisation et commande sous-optimale d'un four d'industrie céramique.
Diplôme de Docteur 3ème cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse,
30 Juin 1980.
2. J.P. BABARY, D. BERNAT, J.B. POURCIEL
Automatisation et optimisation du fonctionnement d'un four d'industrie
céramique. Contrat de Prédéveloppement DIELI, BERNAT SAULIERE - LAAS,
Rapport final, Juillet 1982.
- 3 J.P. BABARY, M. MEIREILLES RIBEIRO
Simulation du fonctionnement thermique d'un four d'industrie céramique.
First IASTED International Conference and Exhibition. Lyon, 7 - 11 Septem-
bre 1981.
- 4 J.P. BABARY, M. MEIREILLES RIBEIRO, J.B. POURCIEL
Sur la commande numérique d'un four d'industrie céramique.
Congrès AFCET Automatique et Instrumentation, Nantes, 27-29 Octobre 1981.

- 5 M. MEIREILLES RIBEIRO
Régulation d'un four d'industrie céramique autour d'un régime optimal de production. Diplôme de Docteur-Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse, 25 Mai 1981.
- 6 BARRETEAU, LAGUERIE, BABARY, KASSINOPOULOS
Modelling of a Tunnel-furnace in the ceramic industry. Congrès IFAC, Rabat 1980.
- 7 M.J.D. POWELL
An efficient method for finding the minimum of a function of a several variables without calculating derivatives. Computer Journal vol. 7, n° 4, pp. 303, 1964.
- 8 Harwell Subroutine Library
Harwell, Oxfordshire.
- 9 RAO,
Optimization. Wiley, New-Delhi, 1978.
- 10 POLSINELLI D.
Automatisation et optimisation du fonctionnement d'un four d'industrie céramique. Stage ENSEEIHT, 1981.
- 11 RICHTMYER - MORTON
Difference methods for initial value problems. Interscience, New-York 1967.
- 12 VICHNEVETSKY R.
Use of functional approximation methods in the computer solution of initial value partial differential equation problems. IEEE, Transactions on Computers, vol. C-18, June 1969.
- 13 KOKOTOVIC
An introduction to singular perturbation systems engineering for power. Davos, Octobre 1979.
- 14 CHEMOUIL P.
Analyse et commande des systèmes dynamiques à plusieurs échelles de temps. Thèse de Docteur-Ingénieur, Nantes, 1978.
- 15 FOSSARD
Représentation des systèmes linéaires.
Cours ENSEEIHT, Toulouse, 1980.

- 16 JHONSON C.D.
Accommodation of external disturbances in linear regulator and servo-mechanism problems. IEEE, Transactions on Automatic Control, vol. AC-16, December 1971.
- 17 FOULARD, GENTIL, SANDAZ
Commande et régulation par ordinateur numérique. Eyrolles, Paris 1977.
- 18 ATHANS and FALB
Optimal control. Mac Graw Hill, 1968.
- 19 KWAKERNAK and SIVAN
Linear optimal control systems. Wiley-interscience, New-York.
- 20 HAJIME A., HIROYUKI I.
Insensitive observers for discrete time linear systems. Automatica, vol. 18, 1978.
- 21 SEVELY Y.
Theorie des observateurs. Cours UPS, 1981.
- 22 COURDESSES M., ALENGRIN G.
Programmes de résolution de l'équation algébrique matricielle de RICCATI. Note Interne LAAS, Novembre 1975.
- 23 KLEINMAN D.L.
On an iterative technique for Riccati equation computations. IEEE Transactions on Automatic Control, Février 1968.
- 24 HEWER G.A.
An iterative technique for the computation of the steady state gains for the discrete optimal regulator. IEEE Transactions on Automatic Control, Août 1971.
- 25 GARBOW B.S., BOYLE J.M., DONGARRA J.J., MOLER C.B.
Lecture notes in computer science. EISPACK Guide Extension. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg - New-York 1977.
- 26 OUDILLE J.P., GREZEZ-RUEFF M.
Synthèse d'un moniteur temps réel sur M 6800. Stage ESE, LAAS-UPS, 1976.
- 27 EL HAJJAR H., POURCIEL J.B.
Control of ceramic furnace using a two microcomputer structure. 3rd IFAC/IFIP, Software for Computer Control, SOCOCO, Madrid (Espagne) 5-8 Octobre 1982.

- 28 EL HAJJAR H., POURCIEL J.B., BABARY J.P.
Digital control of furnaces in ceramic industry, IFAC Symposium on
Real Time Digital Control Applications. Mexico (Mexique), 15-21 Janvier
1983.
- 29 EL HAJJAR H., POURCIEL J.B.
Conduite numérique du four de Mane. Note Technique LAAS, Mars 1983.
- 30 TDS User's Guide. MOTOROLA Semiconductor Products Incorporation, 1978.

رسالة دكتورة في التحكم للسيد هيثم الحجار . تولوز . فرنسا .

موضوع الرسالة :

تحكم وقيادة رقمية لفن نفقي لصناعة الموارد القمارية

موجز

في هذه الاطروحة نذكر بالمعادلات التي تمثل عمل الفن ثم نعين الطور
الآن الأفضل من أجل عملية التمييز .

بعد اجراء عمليات تحويل لهذه المعادلات نقوم بحساب قانون التحكم
الأفضل في الدارة المغلقة عن طريق تنفيذ عملية جمعيات الحالة
التي يجعل تابع الطاقة التريبي أصفرياً وهذا أفيد زمنياً .
إن حساب قدر الحالة قد عرض في هذه الاطروحة سرّاً من أجل الحصول على
المحتوى الحاري داخل الشحنة بعد قياس هذا المحتوى داخل الغاز .
في الحالة نفقي عرضاً ملحظاً للقيادة الرقمية للفن عند طريق
معالج صفري وقد أعطينا اهتماماً خاصاً لموضوع مراقبة الفن
واقترعنا بكل آلي لحظاً تنفيذية بالتوتر .

المفاتيح المعجمية

الافضل . التريب . التام . الأفضل . المراقب .
القيادة الرقمية . الزمن الحقيقي .

Thèse de Monsieur EL HAJJAR Haïssam

« Contrôle et conduite numériques d'un four tunnel d'industrie céramique »

RESUME

Dans ce mémoire nous rappelons la modélisation du fonctionnement thermique d'un four de poterie et nous déterminons le régime statique optimal de cuisson. Après des transformations du modèle, nous calculons une loi de commande en boucle fermée par retour d'état en minimisant un critère quadratique à horizon fini. Le calcul d'un estimateur de l'état est exposé pour la reconstitution du profil dans la charge à partir de mesures faites dans le gaz. Nous exposons à la fin la conduite numérique du four par microcalculateur en portant l'attention sur l'aspect surveillance du fonctionnement et démarrage automatique à la mise sous tension.

MOTS CLEFS : Optimisation, approximation fonctionnelle, commande optimale, observation, conduite numérique, temps réel.

ABSTRACT

In this work we recall the thermal behavior operation modelling of a ceramic furnace and we calculate the optimal static burning temperature profile. After transforming the model, we calculate a finite horizon quadratic state feedback law. We expose the development of a state estimator in order to reconstruct the temperature profile from measurements made at the gas. Afterwards we expose the direct digital control microprocessor implementation. Special attention is given to safety monitoring and to the automatic system start-up on power-on.

KEY WORDS : Optimization, functional approximation, optimal control, observers, real-time, digital control.