

50376
1968
50

N° d'ordre 110

50.376
1968
50

T H E S E

présentée

à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille

pour obtenir

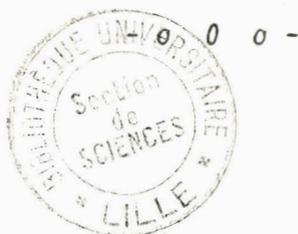
le grade de Docteur de 3ème Cycle en Automatique

par

Monsieur Alain PETTE

Licencié ès-sciences Appliquées

Titre de la thèse



" Conduite automatique et gestion dynamique
d'une batterie de fours Pits "

Soutenue le 10 Octobre 1968 devant la Commission d'Examen :

Messieurs :

DEHORS	Président
VIDAL	Rapporteur
LEBRUN	
LAURENT	

- 0 0 0 -

A mes Parents

A ma Femme

LISTE DES PROFESSEURSDOYENS HONORAIRES

Monsieur PRUVOST P.
 Monsieur LEFEBVRE H.
 Monsieur PARREAU M.
 Monsieur TILLIEU J.

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. ARNOULT, BEGHIN, BROCHARD, CAU, CHAPELION, CHAUDRON,
 CORDONNIER, DEHEUVELS, DEHORNE, DOLLE, FLEURY, P. GERMAIN,
 LAMOTTE, LELONG, KOURGANOFF, Mme LELONG, MM. MAZET, A. MICHEL,
 NORMANT, PARISELLE, PASCAL, PAUTHENIER, ROIG, ROSEAU,
 ROUBINE, WIEMANN, ZAMANSKY, KAMPE DE FERIET.

DOYEN

Monsieur DEFRETIN R.

PROFESSEURS

MM. DURCHON M.	Zoologie (ASSESEUR)
HEUBEL M.	Chimie Minérale (ASSESEUR)
BACCHUS P.	Astronomie et calcul numérique
BECART M.	Physique
BERKER R.	Mécanique des Fluides
BLOCH V.	Psychophysiologie
BONNEMAN-BEMIA P.	Chimie et Physico-chimie industrielles
BONTE A.	Géologie appliquée
BOUISSET S.	Physiologie animale
BOURIQUET R.	Botanique
CELET P.	Géologie
CORSIN P.	Paléobotanique
DECUYPER M.	Mathématique
DEDECKER P.	Mathématique
DEHORS R.	Physique industrielle
DELATTRE Ch.	Géologie

MM. DELEAU P.	Géologie
DELHAYE M.	Chimie Minérale
DESCOMBES R.	Calcul différentiel et intégral
GABILLARD R.	Radioélectricité et Electronique
GERMAIN J.	Chimie général et Chimie organique
GLACET Z.	Chimie
GONTIER G.	Mécanique des fluides
HEIM de BALZAC H.	Zoologie
HOCQUETTE M.	Botanique générale et appliquée
LEBEGUE A.	Botanique, Collège Scientifique Universitaire
Mme LEBEGUE G.	Physique
M. LEBRUN A.	Radioélectricité et Electronique
Mle LENOBLE J.	Physique
MM. LIEBAERT R.	Radioélectricité
LINDER R.	Botanique
LUCQUIN	Chimie
MARION E.	Chimie
Mle MARQUET S.	Mathématique
MM. MARTINOT-LAGARDE A.	Mécanique des fluides
MAUREL R.	Chimie
MENNESSIER G.	Géologie
MONTREUIL J.	Chimie Biologie
PEREZ J.P.	Physique
PHAM MAU QUAN	Mécanique générale
POITOU G.	Algèbre supérieure
POUZET P.	Mathématiques
PROUVOST J.	Géologie, Résidence Académique
ROUELLE E.	Physique et électricité industrielles
SAVARD J.	Chimie générale
SCHALLER F.	Zoologie
SCHILTZ R.	Physique
Mme SCHWARTZ M.H.	Mathématiques
MM. TRIDOT G.	Chimie minérale appliquée
VIVIER G.	Zoologie
WARTERLOT G.	Géologie et minéralogie

MM. WERTHEIMER R. Physique
METTETAL M. Zoologie

MAITRE DE CONFERENCE

MM. ANDRE J. Zoologie
BEAUFILS J.P. Chimie Générale
BLANCHARD J.M. Chimie appliquée
BOILLET P. Physique
BUI TRONG LIEU Mathématiques
CHASTRETTE Chimie générale
COMBET E. Mathématiques
CONSTANT E. Physique
DANZE J. Géologie
DERCOURT Géologie et Minéralogie
DEVRAINNE Chimie Minérale
Mme DRAN Chimie appliquée
MM. FOATA D. Mathématiques
FOURET R. Physique
GAVORET J. Physique théorique
HERZ J. Calcul numérique
HUARD DE LA MARRE Calcul numérique
LACOMBE D. Mathématiques
MAES S. Physique
MONTARIOL F. Chimie minérale et métallurgie
MORIAMEZ M. Physique
MOUVIER G. Chimie
NGUYEN PHONG CHAU Physique Industrielle
PANET Electrotechnique
RAUZY G. Mathématiques
SAADA Physique
SEGARD Chimie Biologique
TUDO Chimie minérale appliquée
VAILLANT Mathématiques
VAZART B. Botanique
VIDAL Physique industrielle

MAITRES-ASSISTANTS

MM. ABBAR M.	Physique
AMIET J.L.	Zoologie
M ^{le} AYATS M.C.	Mathématiques
MM. BELLET J.	Physique
BOSMORIN J.	Mathématiques
M ^{me} BOURDELET F.	Physique
MM. BRIDOUX M.	Chimie Minérale
CALAIS J.P.	Mathématiques
CARLIER J.	Physique
M ^{le} CHARRET R.	Zoologie
M ^{mes} CRUNELLE M.	Chimie minérale
DANZE	Paléobotanique
M. DEBOUDT M.	Physique
M ^{mes} DEFFRETIN S.	Géologie
DELHAYE M.B.	Chimie minérale
M. DEPREZ G.	Physique
M ^{me} DIXMIER S.	Mathématiques
MM. DOUKHAN J.C.	Physique
DUHAMEL A.	Chimie appliquée
DYMENT A.	Mécanique des fluides
FONTAINE J.	Radioélectricité
GROLIER J.	Géologie et minéralogie
HENRY A.	Botanique
M ^{me} HOCQUETTE H.	Botanique
MM. JOURNEL G.	Physique générale
JOLY R.	Zoologie
M ^{me} LECONTE M.J.	Mathématiques
M ^{le} LEGRAND D.	Mathématiques
M. LEROY Y.	Radioélectricité
M ^{le} LUSSIAA-BERDOU J.	Mathématiques
MM. MAIZIERES	Electromécanique
MESSELYN J.	Physique
MIGEON M.	Chimie minérale
MONTUELLE B.	Botanique
PERTUZON E.	Physiologie animale

MM. PILLONS A.	Mathématiques
POIROT P.	Mathématiques
PONCHEL B.	Physique
PONSOLLE L.	Chimie générale
RACZY L.	Radioélectricité
RISBOURG A.	Radioélectricité
ROUSSEAU J.	Physique
VAN HEEMS J.	Physique
WATERLOT M.	Géologie

CHEFS DE TRAVAUX

Mme BOUVIER F.	Chimie appliquée
MM. GOBERT J.	Physique
PARSY F.	Mathématiques
TISON P.	Mathématiques

SECRETAIRE GENERAL, ATTACHE PRINCIPAL

Monsieur LEGROS

ATTACHES D'ADMINISTRATION

Messieurs COLLIGNON
FACON
JANS
LEROY

Avant - Propos

Le travail que nous présentons a été effectué au Laboratoire d'Automatique théorique de la Faculté des Sciences de Lille dirigé par Monsieur le Professeur DEHORS auquel nous exprimons toute notre gratitude pour l'accueil qu'il nous a réservé, et pour le précieux enseignement qu'il a su nous dispenser.

Nous tenons à le remercier tout particulièrement d'avoir accepté la présidence de notre jury de thèse.

Monsieur le Professeur VIDAL nous a suivi et guidé durant toute cette étude avec intérêt et sympathie. Nous sommes très heureux de pouvoir lui exprimer ici toute notre gratitude.

Nous sommes reconnaissant à Monsieur le Professeur LEBRUN d'avoir considéré avec bienveillance nos travaux et de nous avoir fait l'honneur d'être membre du jury.

Que Monsieur LAURENT Docteur ès-sciences qui nous a conseillé tout au long de nos travaux trouve ici l'expression de notre amicale gratitude.

Nous tenons également à témoigner ici notre reconnaissance à la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique qui, par son aide, nous a permis de nous pencher sur des problèmes concrets supports de recherches très prometteuses.

Enfin nous rendons hommage à l'esprit d'équipe qui règne dans le laboratoire où nous avons travaillé et nous adressons à chacun nos plus vifs remerciements.

INTRODUCTION

-:-:-:-:-

L'étude entreprise dans ce mémoire concerne la conduite automatique et la gestion dynamique d'une batterie de fours Pits.

Lors de l'exploitation d'une batterie de fours, les lingots arrivent de l'aciérie en petits groupes, sont réchauffés dans un four jusqu'à la température requise pour le laminage puis sont défournés régulièrement. L'objet de nos recherches, concerne la mise au point d'une loi optimale d'enfournement et de défournement des lingots qui, en tenant compte de diverses contraintes conduit, grâce à l'alimentation régulière du laminoir, à une augmentation du rendement des installations et à l'amélioration de la qualité des produits sidérurgiques.

L'exposé des principaux problèmes technologiques fait apparaître deux aspects sur lesquels nous baserons notre étude : une discrétisation des variables représentatives de chaque coulée, et un aspect logique et séquentiel dû à la mise en oeuvre d'un nombre variable de fours. L'aspect logique, rendant nécessaire la détermination des instants successifs d'enfournement et de défournement au moyen des conditions initiales, introduit une quantification des variables et rend le nombre d'états possibles finis, chaque état dépendant du précédent. Il existe par conséquent un certain nombre de régimes transitoires suivis de régimes cycliques, et le fonctionnement de la batterie de fours Pits résulte de la combinaison de ces cycles élémentaires.

Cette étude conduit alors à une représentation mathématique analogue à celle d'un système discret multivariable et, dans le second volet de cette étude, on étudie la commandabilité d'un tel système. On précise alors la loi de commande du processus en fonction d'un critère d'enfournement choisi, ce qui conduit par l'utilisation de techniques optimales discrètes, à une condition nécessaire d'optimalité.

Signalons enfin que ce problème nous a été suggéré et a été entrepris en collaboration avec la société USINOR et la Compagnie Internationale pour l'Informatique sous l'égide du Comité Automatisation de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (Contrat n° 67.00.674).

CHAPITRE I

ANALYSE DU PROCESSUS

Les données exposées dans le présent chapitre, ont été recueillies au complexe Usinor de Dunkerque (1). Elles semblent malgré tout assez générales pour pouvoir être transposées à de nombreux autres ensembles, et justifier ainsi l'intérêt de l'étude théorique entreprise.

1.1. DESCRIPTION

Les lingots sont transportés en groupe de 6 à 12 unités, depuis l'aciérie jusqu'aux fours. Chaque groupe, dont le volume d'acier correspond à celui d'une coulée, est réchauffé dans un seul four, et est maintenu pendant un temps variable, à la température requise pour le laminage au blooming. Les lingots sont alors défournés un à un, à une cadence fixée par le laminoir.

1.2. LES LINGOTS

Ils ont des dimensions, des poids et des qualités d'acier différents. La provenance des lingots froids est diverse, seuls, les lingots coulés à l'aciérie de Dunkerque, parviennent à une température élevée aux batteries de fours.

1.2.1. Dimensions et poids

La série principale comporte 5 types de lingots, dont les poids s'échelonnent entre 14 et 25 tonnes. Dans l'avenir, aucune augmentation de poids n'est envisagée.

1.2.2. Différentes sortes d'acier

Il faut distinguer les nuances d'acier suivantes :

- | | |
|----------------|--------------------|
| - effervescent | - semi-calmé |
| - stabilisé | - bloqué alu |
| - calmé | - bloqué bouteille |

Parmi celles-ci, deux distinctions essentielles sont à faire :

- les lingots "non masselottés", ou "effervescents", à court track time (le track time est défini comme étant la différence entre les instants de coulée et d'enfournement des lingots).
- les lingots "masselottés" à long track time.

Il faut également tenir compte d'un temps de veilleuse imposé avant la mise en chauffe pour les lingots "calmés", dans le but de diminuer le nombre de criques (fissures provoquées par les tensions internes du métal).

1.3. ACHEMINEMENT DES LINGOTS

L'acier est coulé dans des lingotières ; celles-ci sont ensuite transportées en trains de chariots jusqu'à la halle de strippage. Pendant le strippage (ou démoulage), les lingots sont séparés de leurs moules et sont amenés dans la halle des fours Pits, où ils sont chargés un à un dans une cellule libre.

1.3.1. Notations

Par la suite on utilisera les notations :

- H_C heure de début de coulée
- H_S heure de début de strippage
- H_E heure de début d'enfournement
- H'_E heure de fin d'enfournement
- H_D heure de début de défournement
- H_P heure à laquelle le premier lingot est prêt au laminage.

nous distinguerons encore :

- $DS = H_S - H_C$ délais de strippage
- $TT = H_E - H_C$ track time

La succession de ces diverses opérations est représentée figure 1.1

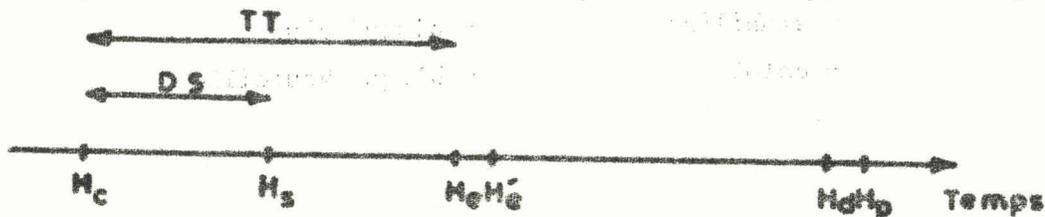


Figure 1.1

1.3.2. Transport et strippage

La coordination des travaux est assurée par le responsable du planning, qui calcule l'heure théorique de strippage à partir de la relation :

$$H_S = H_C + DS - 35 \text{ mn} \pm \Delta T$$

35 mn représente la durée maximale du transport depuis l'acierie jusqu'à la halle de strippage.

ΔT est la marge de manoeuvre de l'acierie.

Le temps moyen de démoulage est de 10 Minutes.

1.3.3. Enfournement

Les lingots sont enfournés dans l'ordre des coulées, à raison d'une coulée par four.

1.4. CHAUFFAGE

1.4.1. Les variations du pouvoir calorifique du gaz employé, pour le chauffage des fours, sont inconnues à court terme, mais elles n'excèdent pas 1 %. Par contre, les variations d'une journée à l'autre peuvent être connues et, dans l'avenir, l'utilisation d'un mélange mieux étudié devrait amener une grande régularité du pouvoir calorifique.

1.4.2. Cycle de chauffage

Après une période facultative de mise en veilleuse, le four est chauffé au maximum jusqu'à la température de 1300 ° C. Un système régulateur de température est alors mis en service afin de conserver constante cette grandeur de consigne, par la diminution progressive du débit du gaz (figure 1.2)

1.5. TEMPS DE SEJOUR AU FOUR

Il peut être déterminé théoriquement par l'une des relations suivantes :

a) $H_p = H_E + x$ (x fixé par des normes)

b) $H_p = H_{mt} + y$ (y fixé par des normes)

H_{mt} : heure à laquelle la température atteint 1300°C .

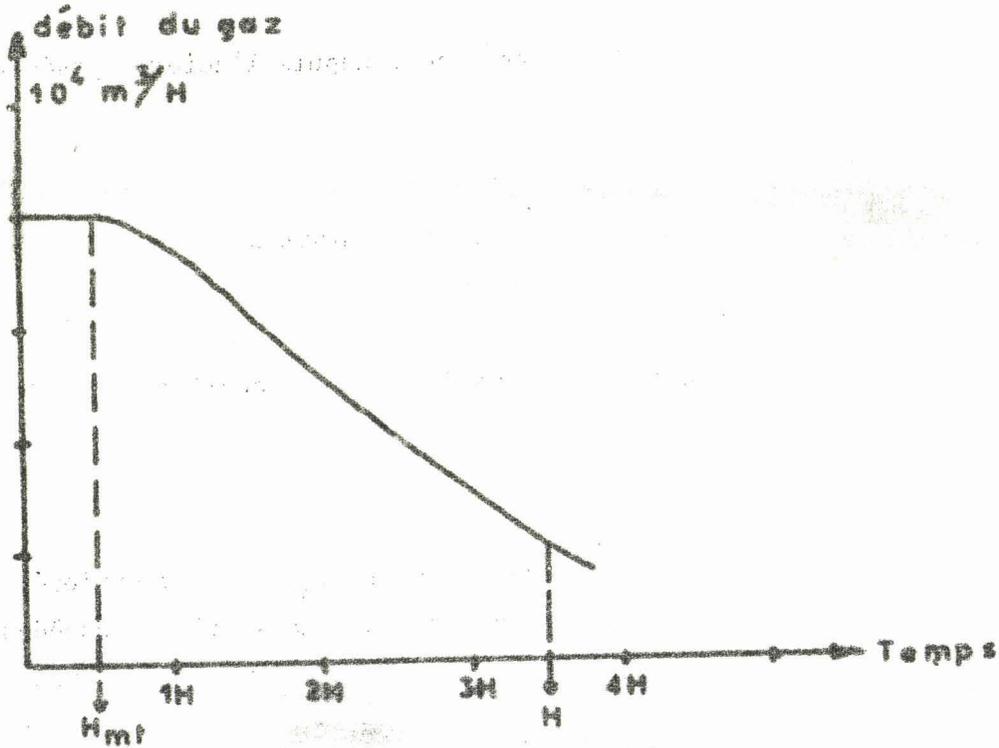


Figure 1.2

- c) $H_p = H + 1$ heure pour les lingots chauds
+ 2 heures pour les lingots froids

H : heure à laquelle le débit du gaz est égal à $2000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Les valeurs x et y , apparaissant en a) et b), proviennent des études faites par Morillon et Mazuel⁽²⁾ sur les fours de Denain, et adaptées aux fours de Dunkerque. La relation a), qui permet d'établir d'une façon aisée, le planning des enfournements, est en fait très imprécise et doit être améliorée : l'on obtient ainsi la relation b), qui élimine une partie des aléas en tenant compte de l'heure de montée en température.

En pratique l'on utilise une combinaison de b et c sous la forme :

- si le débit décroît jusque $2000 \text{ m}^3/\text{h}$: formule C.
- si au bout du temps déterminé par b, le débit est supérieur à $2000 \text{ m}^3/\text{h}$: défournement.

1.6. ACIERIE

Le rythme actuel de l'acierie est de 40 à 45 coulées par jour, soit une production annuelle d'environ 2 Mt. Pour porter la production à 3 Mt, l'acierie devra, dans l'avenir, effectuer 55 à 60 coulées journalières.

La part, dans la production totale, des lingots à long track-time, varie de 30 à 40 %. Remarquons à ce propos que l'acierie ne peut effectuer une coulée unique d'acier à long track-time : il faudra donc prévoir, dans toute politique d'enfournement, la succession d'au moins deux coulées d'acier de ce type.

1.7. LAMINOIR

Les lingots sont défournés un à un, et transportés dans l'ordre jusqu'au laminoir. Le temps minimum de travail est de 15 minutes, et doit être majoré, suivant la nuance d'acier :

- a) nuances de 1 à 3 : de 0 à 25 mm, la valeur moyenne étant de 5 mm.
 - b) nuances de 4 à 6 : de 10 à 55 mm, la valeur moyenne étant de 20 mm.
-

CHAPITRE II

PRESENTATION DU PROBLEME

Nous nous proposons dans cette étude, de définir les principaux objectifs d'une automatisation complète de la batterie de fours⁽³⁾. Le choix du mode de conduite du processus que nous désirons élaborer doit permettre :

- a) L'amélioration de la qualité des produits sidérurgiques et la constance de leurs caractéristiques. Cette régularité présentant en effet un intérêt économique très important.
- b) L'augmentation de la productibilité par la mise en oeuvre d'un automatisme remplaçant l'opérateur humain.
- c) L'optimisation du processus de fabrication.

2.1. INTERET DE L'ETUDE

L'aboutissement des travaux serait l'automatisation complète des batteries de fours Pits, dont la régularité des enfournements et des défournements conditionne la bonne marche des unités sidérurgiques.

Dans le cas étudié les fours Pits, au nombre de 18, ont un taux d'occupation qui varie suivant la personne responsable du planning, entre 70 et 90 %.

A l'avenir, la production devant être augmentée, l'alimentation régulière du train de laminoirs, à partir des fours Pits, conditionne :

- a) l'accroissement du nombre de fours Pits, jusqu'à un nombre optimal à déterminer.
- b) la régularité des instants de défournements des lingots ce qui conduit compte tenu des impératifs technologiques dans la production de l'acierie, et de la capacité des fours, à rechercher une stratégie optimale des enfournements.

Notons déjà que la connaissance des stratégies, impliquant chacune l'utilisation d'une quantité connue de fours détermine par un choix judicieux parmi les stratégies admissibles le nombre minima de fours en service.

En outre, la loi d'enfournement retenue doit permettre le réchauffage du plus grand nombre possible de coulées "chaudes", en provenance directe de l'acierie elle doit également prendre en considération les coulées "froides" (provisoirement abandonnées par suite de pannes, de saturations à l'entrée des fours...), afin de diminuer le stock de lingots "froids" existant, et d'assurer ainsi la production dans les conditions extrêmes.

Le caractère séquentiel du problème est évident. En effet, chaque four peut être représenté par un organe logique qui rend compte de l'état d'occupation du four correspondant. Il convient alors de déterminer quelle combinaison, parmi les séquences d'occupation de chaque four, est la mieux adaptée pour assurer le plein travail du laminoir et par conséquent son rendement maximum.

Dans cette optique, le laminoir apparait comme l'organe réel de commande puisqu'il impose la qualité d'acier et l'instant de défournement de chaque coulée. D'une manière plus générale, le problème consiste à rechercher les entrées d'un système l'ensemble des fours, de façon à respecter plusieurs contraintes : occupation des fours, plein travail du laminoir . L'analogie avec un problème classique d'optimisation est nette, mais l'étude est rendue délicate par l'aspect logique qui ne s'introduit pas de façon simple dans les critères d'optimalité.

2.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Dans ce qui précède, le temps de séjour dans un four, des lingots, apparait comme étant la principale donnée nécessaire à l'établissement d'un modèle de four Pits.

Parmi les relations indiquées paragraphe 15, seules celles basées sur les études de Morillon et Mazuel peuvent être retenues, la relation c apparaissant comme trop expérimentale.

Nous présentons figure (2.1) et (2.2) les courbes issues des données recueillies par la compagnie Internationale pour l'Informatique.

Ces courbes donnent les valeurs du temps de séjour théorique au four, en fonction du track-time équivalent (qui est le délai de strippage augmenté de deux fois le temps de séjour à l'air libre), pour un temps de montée en température donné, et pour diverses nuances d'aciers.

L'examen des graphiques suggère les remarques suivantes :

a) Les temps de séjour théoriques optimaux peuvent être considérés égaux lorsque l'heure de montée en température est prise dans certaines limites. Ainsi, dans le figure (2.1) il apparait que les temps de séjour optimaux sont identiques lorsque le temps de montée en température varie entre 0 et 60 minutes.

b) Pour des temps de montée en température pris dans les limites définies précédemment, les temps de séjour optimaux, pour différentes nuances d'acier, sont assez peu différents.

Ces remarques conduisent alors aux hypothèses suivantes :

a) Les temps de séjour théoriques optimaux sont égaux, quelles que soient les nuances d'aciers et les heures de montée en température.

b) Chaque courbe est assimilée à une parabole.

Toutefois quelques précisions doivent être apportées à propos de l'instant de montée en température. Sa mesure fait apparaitre, celui-ci pour une nuance d'acier fixée, comme directement proportionnel au track time équivalent, et ceci d'une façon pratiquement indépendante du four utilisé.

Il semble donc possible de relier le temps de montée en température au track-time équivalent, si l'on suppose les fours identiques.

Il vient :

$$(2.1) \quad TST = C_1 (TTE)^2 + C_2 (TTE) + C_3$$

avec C_1 , C_2 et C_3 variant suivant la nuance d'acier utilisée.

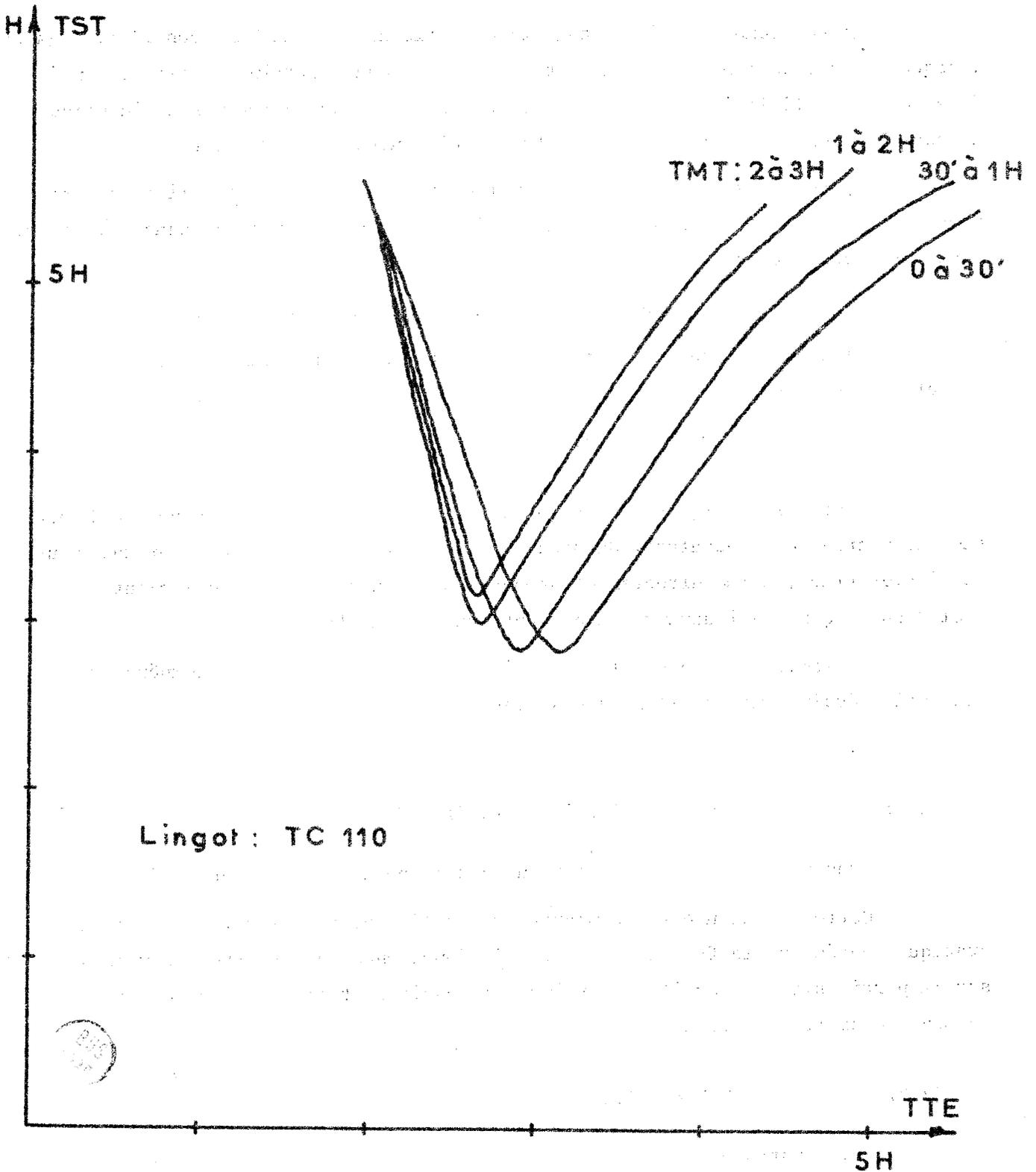
Cette relation est à comparer avec celle couramment utilisée dans la pratique, basée sur le fait que le point de fonctionnement est très souvent situé sur la partie située à droite du minimum. En assimilant alors chaque courbe à un segment de droite, il vient :

$$(2.2) \quad TST = k TTE + C$$

k : constante

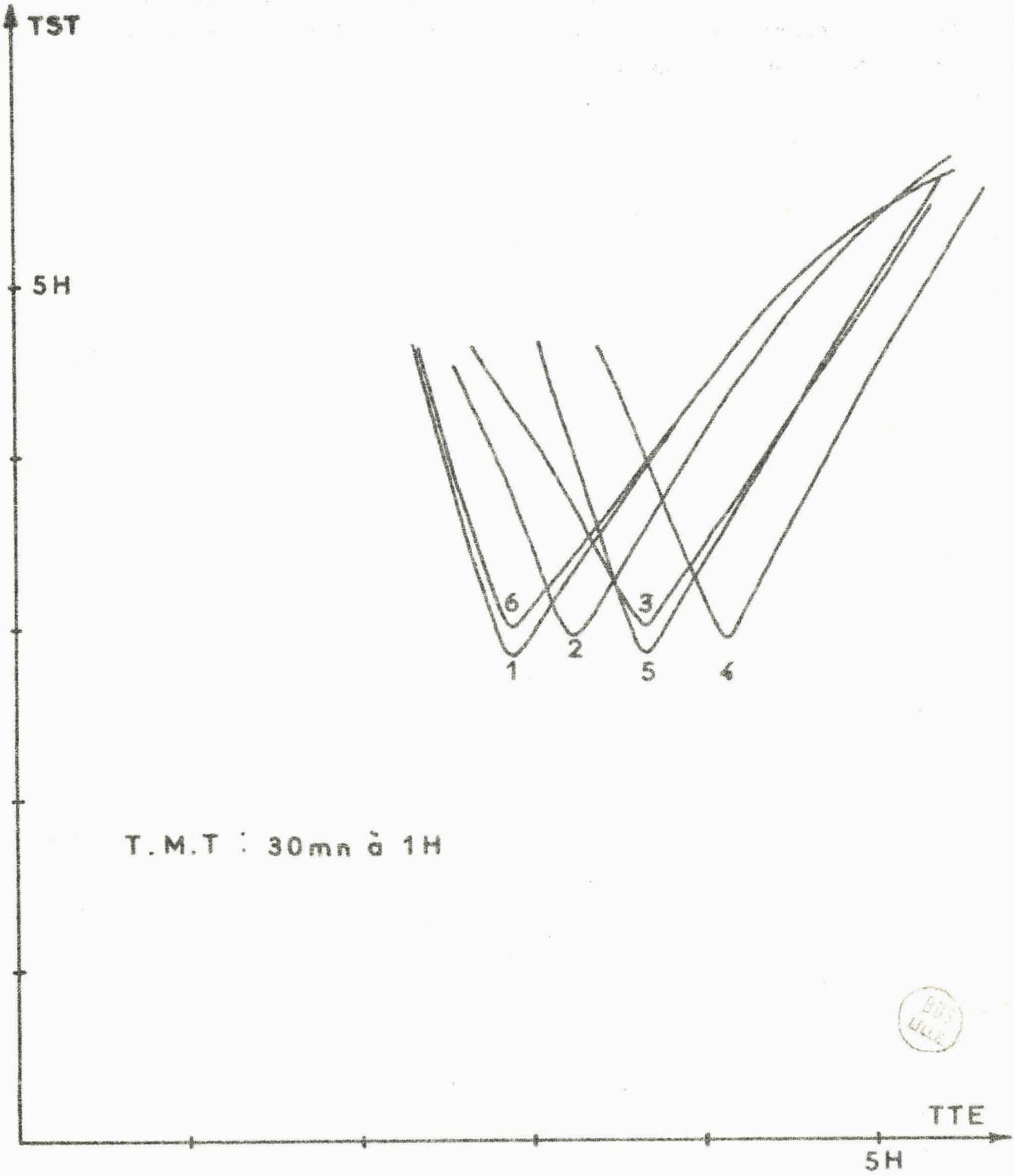
C : variant avec la nuance d'acier utilisée

avec $m \leq TTE \leq M$



Lingot : TC 110

Figure 2.1



T.M.T : 30mn à 1H



Figure 2.2

Remarquons que cette hypothèse est en pratique utilisée fréquemment car elle permet une mise en place relativement aisée du planning des coulées. De même, la linéarisation des caractéristiques $TST = f(TTE)$, permet d'aborder la simulation du fonctionnement des fours d'une façon très simple, ainsi que nous le montrons dans le chapitre suivant .

CHAPITRE III

SIMULATION LOGIQUE D'UNE BATTERIE DE FOURS PITS

Généralités

Examinons maintenant l'évolution normale des divers paramètres, en s'efforçant dans cette étude de rendre compte le plus fidèlement possible de la réalité. Il semble normal d'adopter l'hypothèse de linéarité, traduite par la relation (2.2) du chapitre précédent.

Remarquons dès à présent qu'en introduisant une quantification des variables, on rend le nombre d'états possibles finis. Comme d'autre part chaque état dépend d'un nombre fini d'états précédents, l'on peut s'attendre à rencontrer un certain nombre de régimes transitoires, suivis de régimes cycliques (4); ce qui permet d'entreprendre une simulation logique du système.

3.1. NOTATIONS

Afin de simplifier les écritures posons :

nT instant de sortie de l'acierie de la $n^{i\grave{e}me}$ coulée, les instants de coulée sont réguliers, de période T .

x_n track-time

$f(x_n, q_n)$ temps de séjour théorique au four, déterminé à partir de x_n et de la qualité d'acier q_n .

e_n temps de travail au laminoir

α_{n+l} durée de non occupation du four entre la fin de défournement, de la $n^{i\grave{e}me}$ coulée, et l'enfournement de la coulée $n+l$ (l entier).

Nous avons représenté figure 3.1 l'ensemble de ces notations.



Figure 3.1

3.2. SIMULATION D'UN FOUR

Pour la n^{ième} coulée, le temps de travail au laminoir et la qualité d'acier sont connus, aussi la valeur choisie de x_n détermine $f(x_n, q_n)$ et impose ainsi la condition suivante d'enfournement de la coulée (n+l) :

$$(3.1) \quad nT + x_n + f(x_n, q_n) + e_n + \alpha_{n+l} = (n+l)T + x_{n+l}$$

posons $e_n + \alpha_{n+l} = p_n$

il vient :

$$(3.2) \quad x_n + f(x_n, q_n) + p_n - \ell T = x_{n+l}$$

L'équation (2) permet la détermination graphique de x_{n+l} à partir de x_n , de ℓ et de q_n .

Examinons la figure 3.3 où, pour un x_n fixé, par exemple à 200 minutes, l'on voit apparaître trois valeurs de x_{n+l} selon les valeurs données à ℓ :

$$\ell = 4 \quad x_{n+4} = 180 \text{ mn}$$

$$\ell = 3 \quad x_{n+3} = 240 \text{ mn}$$

$$\ell = 2 \quad x_{n+2} = 300 \text{ mn}$$

Celles-ci peuvent être regroupées en un graphe tel que :

- les valeurs de x_n et x_{n+l} sont notées aux sommets
- l'orientation de l'arc (x_n, x_{n+l}) indique le sens d'évolution du problème.
- les valeurs de ℓ et de q_n (a ou b) choisies sont inscrites sur chaque arc

Ainsi il vient :

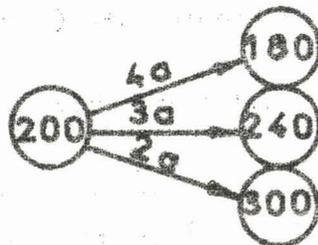


Figure 3.2

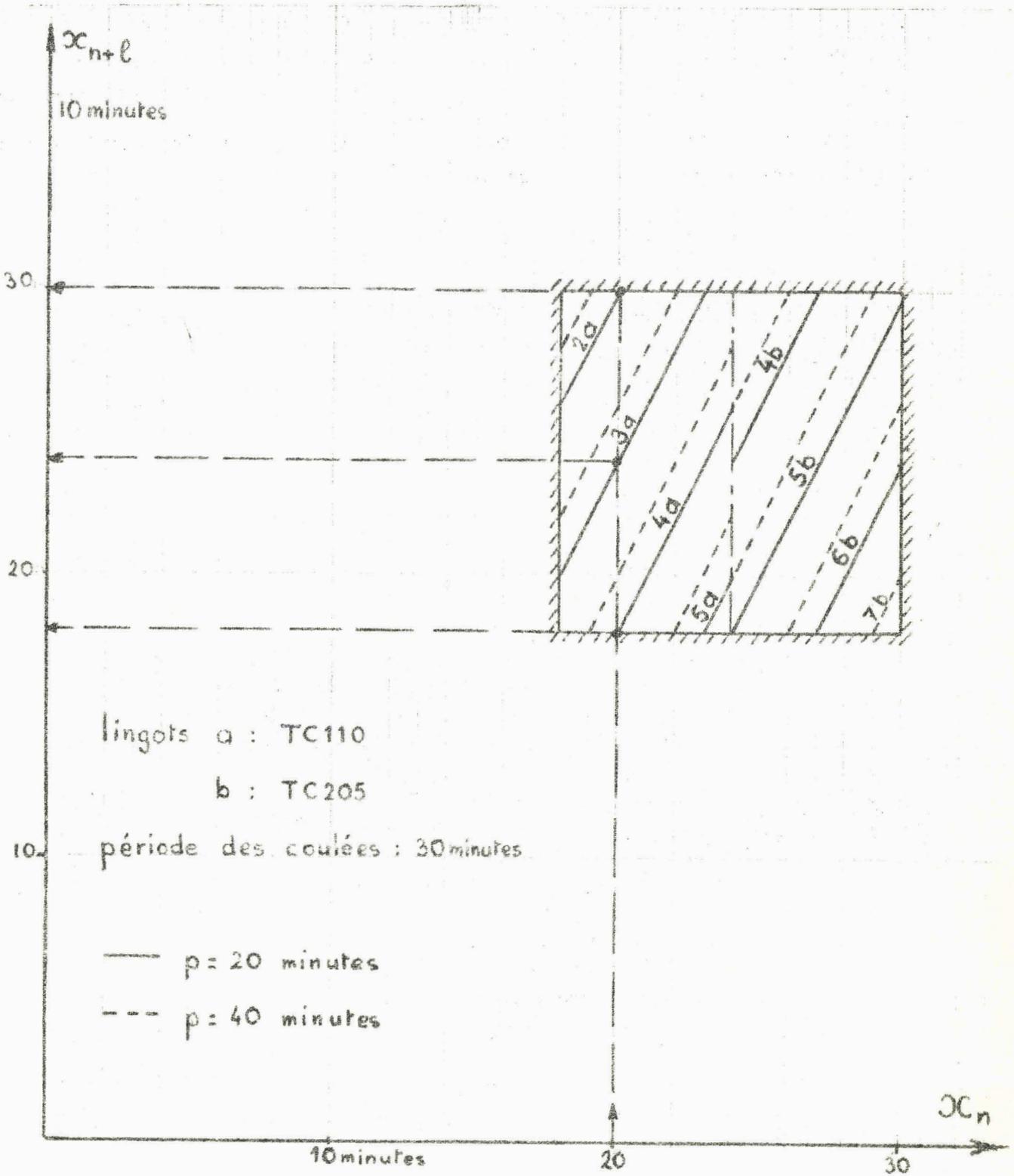


Figure 3.3

La répétition d'opérations identiques conduit à la construction pas à pas des graphes des figures (3.4) et (3.5) rendant compte des évolutions possibles du four à partir d'un état initial fixé, pour diverses politiques d'enfournement.

Dans la pratique les temps moyens de travail du laminoir ont des valeurs variant suivant les nuances d'aciers utilisées :

- pour les aciers du type a : $p = 20$ mn
- pour les aciers du type b : $p = 40$ mn

ce qui suggère les simplifications suivantes :

- éliminons de la figure (3.4) ($p = 20$ mn) les arcs portant la nuance b d'acier
- de même, les arcs portant la nuance a sont éliminés de la figure (3.5) ($p=40$ mn).

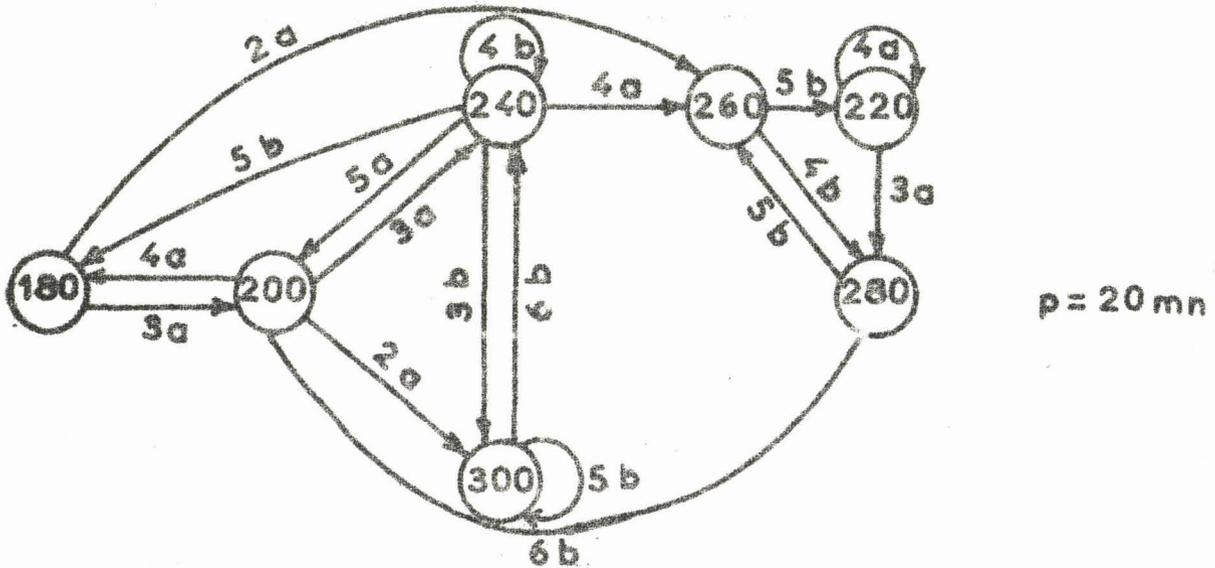
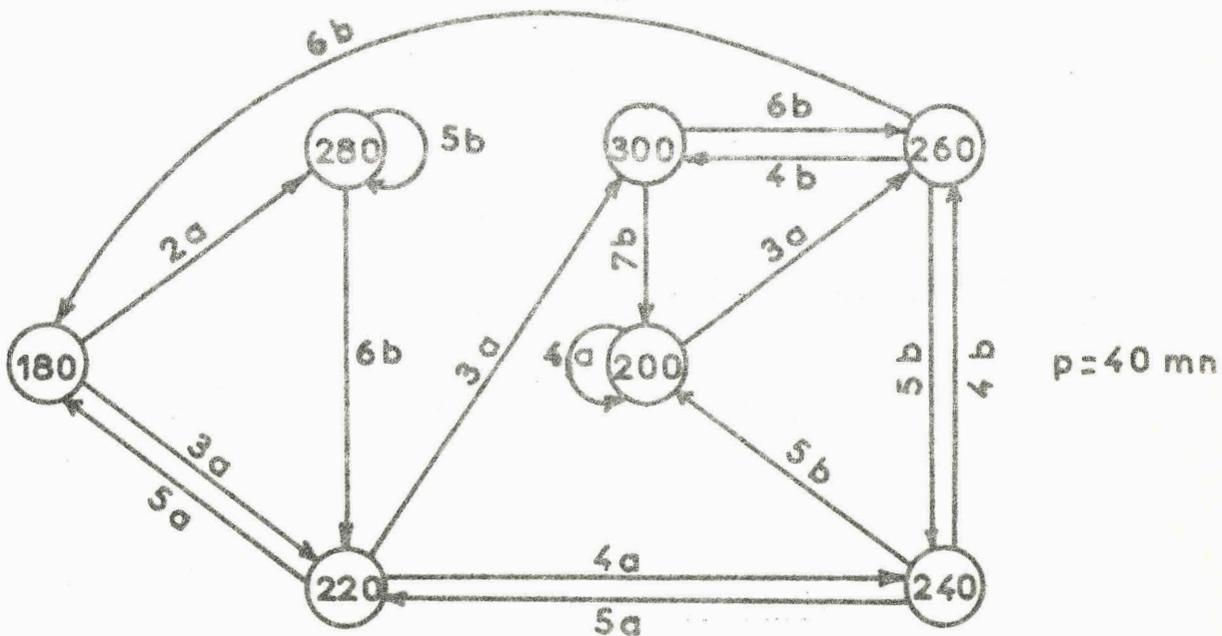


Figure 3.4



- Figure 3.5

Les graphes précédents deviennent alors figures 3.6 et 3.7

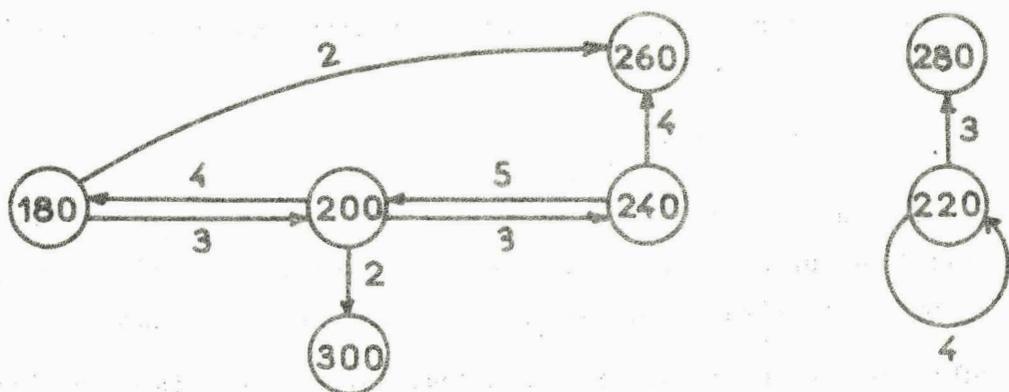


Figure 3.6

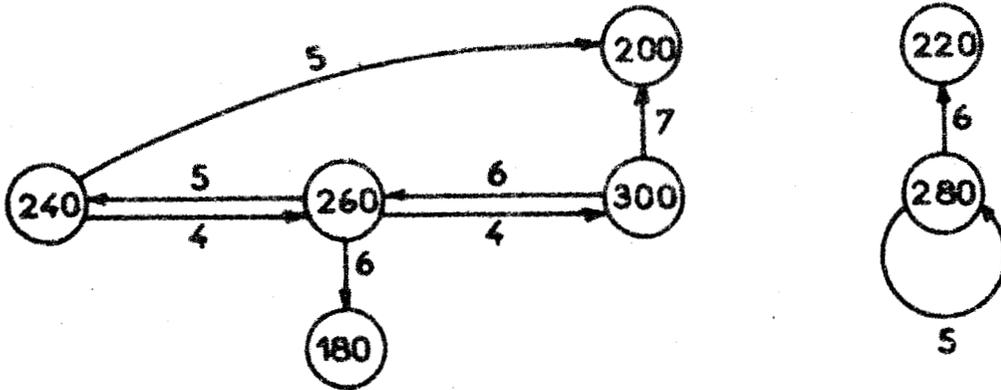


Figure 3.7 : Aciers du type b

3.3. GRAPHE DE PLUSIEURS FOURS

Le plan (x_n, x_{n+l}) utilisé précédemment est représentatif du fonctionnement d'un four. Toutefois en pratique un certain nombre de fours sont en service et la batterie doit permettre l'enfournement de toutes les coulées ; cette notion conduit à la définition d'une contrainte : la fonction d'occupation F du four :

- F = 0 pour un four libre
- F = 1 dans le cas inverse

Pour m fours, la contrainte est alors le produit logique des m fonctions d'occupation :

$$C = F_1 F_2 \dots F_n$$

La mise en chauffe de toutes les coulées exige la nullité de la fonction C à chaque instant d'enfournement et cette condition associée aux résultats du paragraphe 32, permet la simulation logique de la batterie de fours.

La simulation est effectuée par une calculatrice spécialisée utilisant une logique synchrone impulsionnelle.

Chaque coulée est représentée par une impulsion donnée par une horloge. Un four peut-être considéré comme un interrupteur, fermé lorsque l'enfournement de la coulée qui se présente est possible dans le four considéré. L'organe simulant un four délivre donc une suite d'impulsions synchronisées sur celles de l'horloge.

Appliquons ces principes sur un exemple :

Exemple

De la figure (3.6), on extrait le graphe partiel suivant :

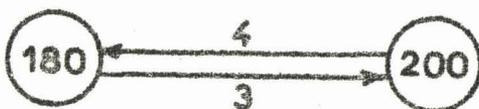


Figure 3.8

L'on voit que les espacements entre les instants d'enfournement sont périodiques : $3 T$, $4 T$, $3 T \dots$

La période T est fixée par l'acierie, (simulée par l'horloge H).

L'organe E, chargé de simuler le four, délivre donc des impulsions aux instants 0 , $3 T$, $7 T \dots$, comme le montre la figure 3.9.

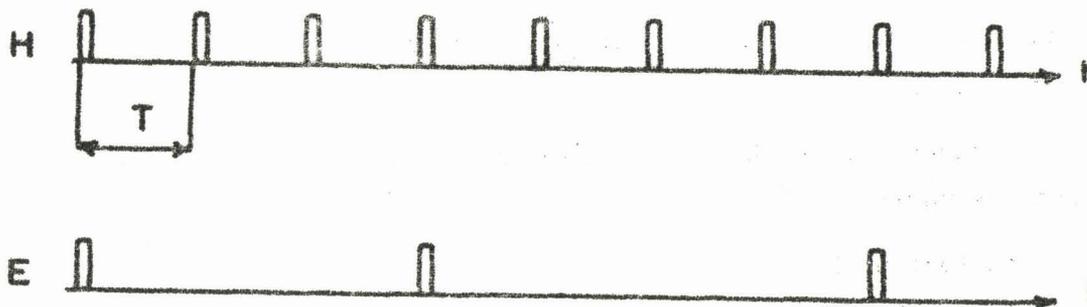


Figure 3.9

La simulation, d'une batterie complète de fours Pits, s'effectue aisément par la mise en parallèle de plusieurs organe du type E.

Ainsi, pour 5 fours, il vient :

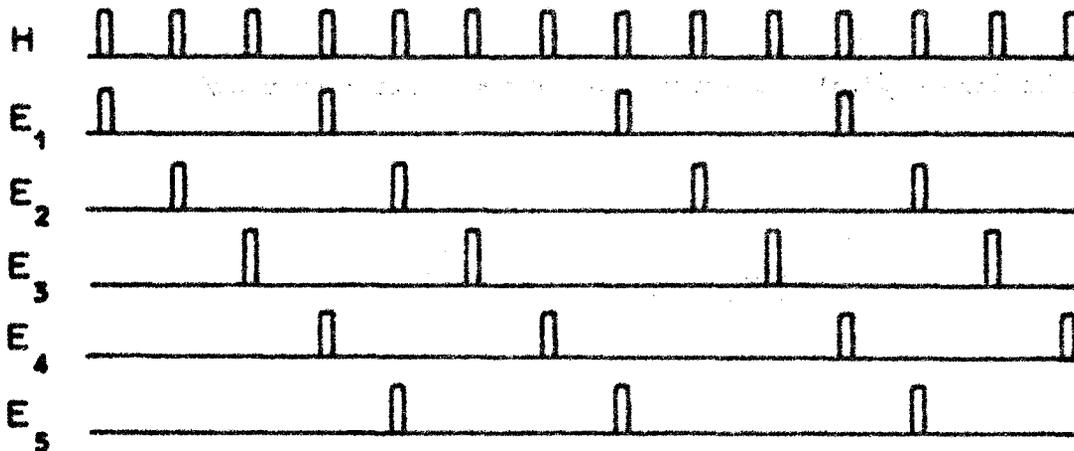


Figure 3.10

Une combinaison de séquences permettant l'enfournement de toutes les coulées est admissible, ce qui entraîne alors la nullité de la fonction C définie par la relation :

$$\bar{C} = H(E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5)$$

Le schéma de principe de la simulation est proposé figure 3.11, l'on reconnaît sur celle-ci :

- les compteurs et les blocs " sélecteurs de séquences " , nécessaires à l'élaboration des variables E.

- Le test logique $C = 0$

L'arrêt est obtenu par :

- $C = 1$ indiquant un choix inadmissible de séquences

- La variable "fin de comptage" qui, compte tenu des moyens mis en oeuvre est obtenue après 32 impulsions d'horloge.

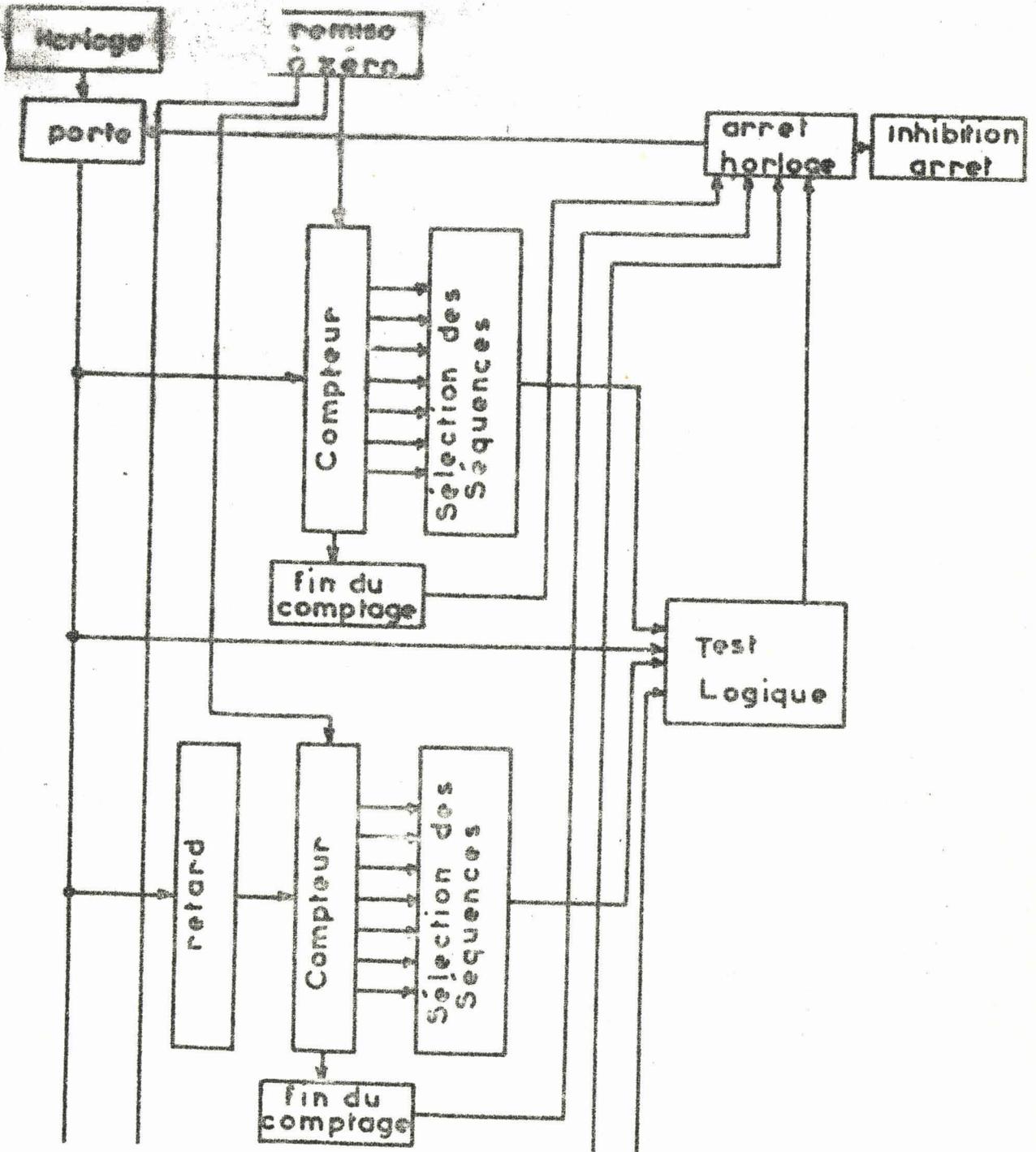


Figure 3.11

Le tableau 1 rend compte partiellement des résultats obtenus. Les combinaisons de séquences admissibles utilisant 4 ou 5 fours y sont indiquées. Ainsi par exemple la première ligne du tableau montre que l'utilisation d'une séquence du type n° 1 (S1) par les trois premiers fours, permet l'utilisation par le quatrième four des séquences n° 1,2,3 et 4.

Les séquences testées sont celles définies par la figure 3.12 et on peut les classer suivant le schéma :

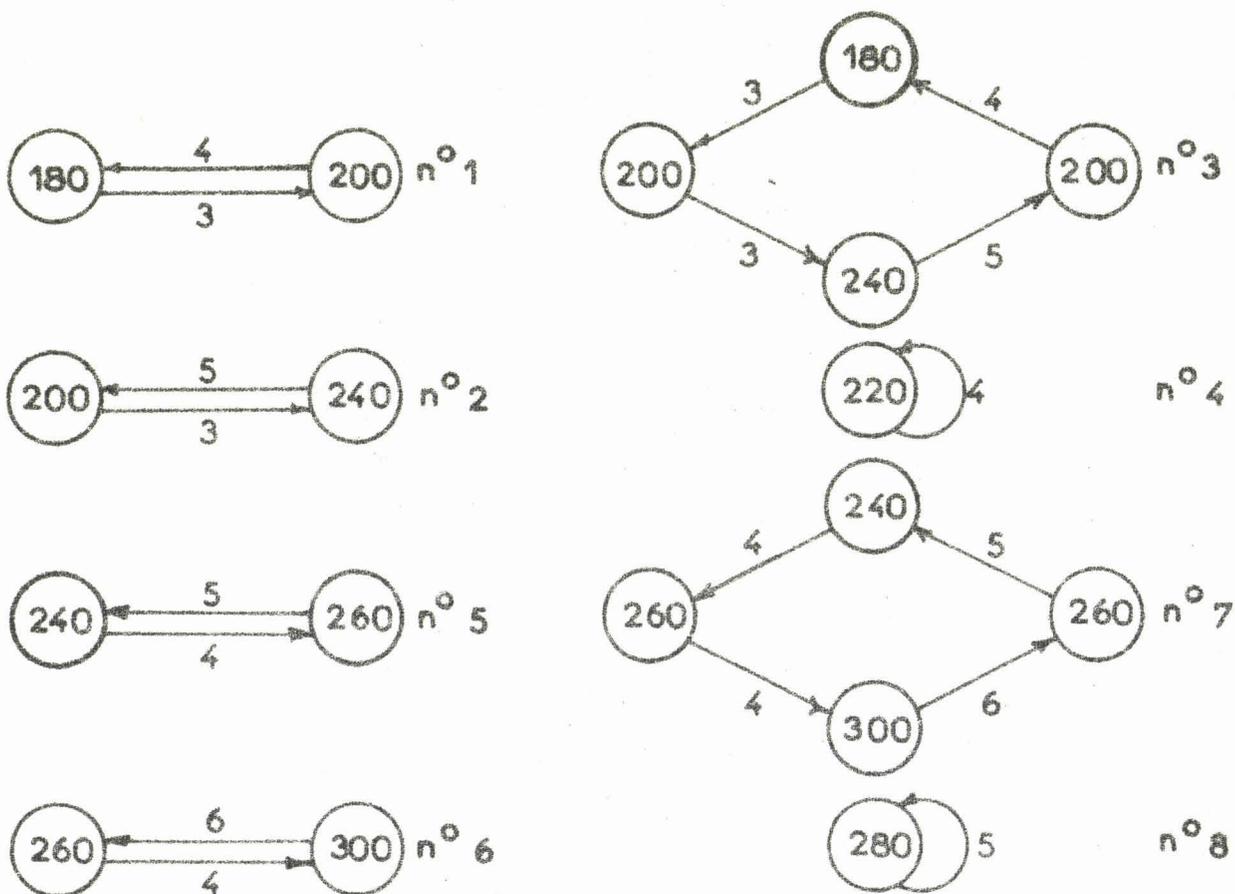


Figure 3.12

3.4. CONCLUSION

Il ressort de ces considérations que le fonctionnement global de la batterie de fours Pits résulte de la combinaison de cycles élémentaires. Toutefois le nombre très important de combinaisons possibles fait apparaître la complexité d'une étude logique, et de ce fait il n'est pas possible d'envisager une optimisation quelconque du système, sans le soutien de puissants moyens de calcul.

Notons cependant que l'étude entreprise permet d'affirmer l'existence de cycles utilisant un nombre restreint de fours, ce qui conduit à la détermination d'une transmittance du système, valable au voisinage du point de réglage considéré. L'étude de ces cycles d'utilisation sera envisagée dans le chapitre suivant.

TABLEAU 1

n° de la séquence utilisée par le four 1	Four 2	Four 3	Four 4	Four 5	Observations
1 -	1 -	1 -	1,2,3,4,5 6,7,8		Utilisation de 4 fours.
1 - - - -	1 - - - -	2 - - - -	1 4 5 7 8	1 3 1,3 1,3 1 à 8	
1 - - - - - -	1 - - - - - -	3 - - - - - -	1 2 3 4 5 6 7	1 à 8 1,2,3 1 à 8 1 à 7 1 à 7 1 à 7 1 à 7	
1 - - - -	1 - - - -	4 - - - -	1 2 3 4 7	1 à 8 1,3 1 à 8 1,2,3,4,7 1,2,3	
1 - - - - -	1 - - - - -	5 - - - - -	1 2 3 4 7 8	1 à 8 1,2,3 1 à 8 1 à 7 1 à 7 1,2,3	
1	1	6	1 à 8	1 à 8	
1 - - - - - -	1 - - - - - -	7 - - - - - -	1 2 3 4 5 6 7 8	1 à 8 1 à 8 1 à 8 1 à 8 1 à 8 1 à 8 1 à 8	Utilisation de 4 fours Utilisation de 4 fours
1	1	8	1 à 8	1 à 8	



... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

CHAPITRE IV

COMMANDE DES FOURS PITS

La simulation précédente facilite la description mathématique d'une séquence d'enfournement et, dans ce sens, le symbolisme des équations de récurrence (5) s'avère un outil facile à mettre en oeuvre pour l'étude du modèle correspondant.

4.1. MISE EN EQUATION

Parmi toutes les séquences d'enfournement il est possible, par un choix judicieux des séquences, de libérer un four à des intervalles de temps égaux : c'est le cas par exemple pour une association de séquences des types S4 et S8.

Diverses équations découlent de cette supposition :

a) La condition d'enfournement de la coulée $n + j$, définie par la relation :

$$(4.1.) \quad nT + g(x_n) + e_n + u_{n+j} = (n+j)T + x_{n+j}$$

$g(x_n)$ différence entre les instants de défournement et de coulée des lingots
 u_{n+j} temps libre du four entre les coulées n et U_{n+j}

Par la suite, u est considéré comme grandeur de commande du système.

b) Les conditions de défournement ;

$$(4.2.) \quad \left\{ \begin{array}{l} nT + g(x_n) + e_n \leq (n+1)T + g(x_{n+1}) \\ \vdots \\ (n+j-1)T + g(x_{n+j-1}) + e_{n+j-1} \leq (n+j)T + g(x_{n+j}) \end{array} \right.$$

A l'intérieur de chaque séquence, la périodicité des enfournements permet l'hypothèse suivante :

$$e - jT = a = \text{constante}$$

et en particulier

$$e - T = b = \text{constante}$$

Posons successivement :

$$x_n = x_1(k) \quad \dots \quad x_{n+i-1} = x_i(k) \quad \dots \quad x_{n+j-1} = x_j(k)$$

$$x_{n+j} = x_1(k+1) \quad \dots \quad x_{n+i+j-1} = x_i(k+1) \quad \dots \quad x_{n+2j-1} = x_j(k+1)$$

k nombre de séquences d'enfournement, les indices 1, 2... i... j correspondant aux fours utilisés. De façon identique posons :

$$u_n = u_1(k) \quad \dots \quad u_{n+i-1} = u_i(k) \quad \dots \quad u_{n+j-1} = u_j(k)$$

Il vient :

$$(4.3.) \quad \begin{cases} x_1(k+1) = g \left[x_1(k) \right] + a + u_1(k) \\ \vdots \\ x_j(k+1) = g \left[x_j(k) \right] + a + u_j(k) \end{cases}$$

$$(4.4.) \quad \begin{cases} g \left[x_2(k) \right] - g \left[x_1(k) \right] - b \geq 0 \\ \vdots \\ g \left[x_j(k) \right] - g \left[x_{j-1}(k) \right] - b \geq 0 \end{cases}$$

$$(4.5.) \quad g \left[x_1(k+1) \right] - g \left[x_j(k) \right] - b \geq 0$$

Il apparaît ainsi que l'étude du système se ramène à celle d'un système échantillonné à période constante, soumis aux contraintes (4) et (5), et dont l'évolution est décrite par les équations de récurrence (4.3.) ou encore le vecteur d'état par la forme matricielle suivante :

$$(4.6.) \quad X(k+1) = B(k) X(k) + U(k)$$

$B(k)$ matrice de dimensions $(j \times 1)$ à coefficients non constants $b_{i1}(k)$

L'un des buts recherché pour la régulation du processus étant l'alimentation régulière du laminoir en lingots, il semble avantageux d'imposer celle-ci comme une contrainte pour l'évolution du processus. Dans ce cas les inégalités (4.4.) et (4.5.) deviennent des égalités. Une condition initiale quelconque $x_1(0)$ fixant toute l'évolution ultérieure du système, résultat confirmé par la simulation du chapitre 3 la suite des variables de commandes $u_1(0) u_2(0) \dots u_j(0)$ est déterminée dès l'instant de départ, ce qui rend le processus incommandable.

Remarquons cependant que, dans la pratique, il est nécessaire de tenir compte des perturbations (états des fours, température des lingots). Les valeurs des variables de commande sont alors déterminées par l'état instantané du système, résultat des conditions initiales et des bruits, de façon à le ramener vers un état optimum d'équilibre. Il importe donc d'étudier la commandabilité dynamique du processus.

4.2. COMMANDABILITE DYNAMIQUE DE LA BATTERIE DE FOURS

Précisons sommairement la notion de commandabilité des systèmes discrets introduite dans l'étude des servomécanismes continus par RE. Kalman 6 .

D'une façon générale, un système est dit commandable s'il est possible de définir un certain nombre de variables de commande U qui, à partir d'un état initial caractérisé par la variable d'état X_0 , font évoluer le processus vers l'état final X_{Tf} en un temps fini T_f .

X_k étant le vecteur représentatif de l'état d'un système échantillonné à l'instant kt , l'action d'une commande, caractérisée par le paramètre u_k , correspond à la relation matricielle.

$$(4.7.) \quad X_{k+1} = A_k X_k + B_k u_k$$

A_k matrice carrée de dimension $(n \times n)$

B_k matrice de dimension $(n \times 1)$

Partant d'un état initial X_0 , il vient :

$$X_k = \prod_{\ell=0}^{k-1} A_{\ell} X_0 + \sum_{j=0}^{k-2} \left(\prod_{m=k-1}^{j+1} A_m \right) B_j u_j + B_{k-1} u_{k-1}$$

Posons :

$$C \times U = \sum_{j=0}^{k-2} \left(\prod_{m=k-1}^{j+1} A_m \right) B_j u_j + B_{k-1} u_{k-1}$$

U vecteur colonne de composantes $(u_0, u_1, \dots, u_{k-1})$

Il vient :

$$(4.8) \quad X_k - \prod_{\ell=0}^{k-1} A_{\ell} X_0 = C \times U$$

Toutes les solutions de l'équation (4.8) sont déterminées lorsque le déterminant de C n'est pas nul et lorsque U est de rang n.

Ce résultat est applicable à tout système à commande discrète unique dont l'évolution est décrite par une relation semblable à l'équation (4.7). Notons en particulier que les instants d'échantillonnage sont quelconques, et que les valeurs des commandes successives sont déterminées :

- par les états initiaux et finaux pour un système linéaire
- par la trajectoire entière entre ces deux états, pour un système non linéaire.

Remarquons également que l'introduction d'un but de régulation, en imposant certaines trajectoires préférentielles, conduit généralement à élever l'ordre du système.

Dans le cas d'un four Pits, le but de la régulation est défini par la fonction :

$$\text{Min} \quad \sum_{k=0}^{\infty} u^2(k)$$

L'application du principe du maximum discret(8.9) conduit alors aux relations

$$\begin{aligned} 2u(k) &= \Psi(k+1) \\ \Psi(k) &= \Psi(k+1) \frac{\partial g \left[\underline{x(k)} \right]}{\partial x(k)} \end{aligned}$$

Ψ vecteur adjoint au système

L'expression de la fonction de commande est :

$$(4.9.) \quad u(k) = u(k+1) \frac{\partial g \left[\underline{x(k+1)} \right]}{\partial x(k+1)} = \alpha_{k+1} u(k+1)$$

A l'aide des relations (4.3.) et (4.7.) il vient :

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \\ \\ x(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{g \left[\underline{x(k)} \right]}{x(k)} & 0 \\ 0 & \frac{g \left[\underline{x(k+1)} \right]}{x(k+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \\ \\ x(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \\ \\ \frac{1}{\alpha_{k+1}} \end{bmatrix} u(k)$$

La relation matricielle (4.8.) s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \\ \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{g_0 g_1}{x_0 x_1} & 0 \\ 0 & \frac{g_1 g_2}{x_1 x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ \\ \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{g_1}{x_1} & 0 \\ 0 & \frac{g_2}{x_2 \alpha_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \\ \\ \frac{1}{\alpha_2} \end{bmatrix} u_0 + \begin{bmatrix} 1 \\ \\ \\ \frac{1}{\alpha_2} \end{bmatrix} u_1$$

avec $x(k+1) = x_1 \dots g \cdot x(k+1) = g_1$

La matrice C s'exprime par conséquent :

$$C = \begin{bmatrix} \frac{g_1}{x_1} & 1 \\ \frac{g_2}{\alpha_1 x_2} & \frac{1}{\alpha_2} \end{bmatrix}$$

Le modèle est par conséquent commandable, compte tenu de l'expression (4.9.), si :

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \neq \frac{g_2 x_1}{g_1 x_2}$$

ou encore, avec les notations du paragraphe (4.1.) si :

$$(4.10) \quad \frac{\partial g \left[\overline{x(1)} \right]}{\partial x(1)} \times \frac{\partial x(2)}{\partial g \left[\overline{x(2)} \right]} \neq \frac{x(1)}{x(2)} \frac{g \left[\overline{x(2)} \right] + a}{g \left[\overline{x(1)} \right] + a}$$

Remarquons qu'en tout point d'équilibre, le système est incommandable ; les variables de commande sont alors toutes nulles, et l'état du système est optimum. Lorsque la condition (4.10) est remplie, il existe par contre, une commande qui ramène l'état du système à un état optimal d'équilibre.

4.3. CONCLUSION

Après avoir mis en équation le processus d'enfournement, nous nous sommes penchés sur la validité du modèle proposé et examiné celui-ci sous l'angle de la commande. La notion de commandabilité des systèmes, appliquée à la conduite automatique d'une batterie de fours Pits, nous a permis de trouver une condition d'existence d'une commande ramenant l'état du système vers un état optimum d'équilibre.

Dans ce sens, la mise en oeuvre d'un tel modèle est particulièrement bien adaptée à l'optimisation dynamique des trajectoires de phases de chaque four, et donc à l'élaboration d'une condition nécessaire d'optimisation du processus.

CHAPITRE V

OPTIMALISATION DU PROCESSUS

5.1. GENERALITES

Il ressort des études précédentes que l'alimentation régulière du laminoir en lingots constitue une limitation très sévère pour les variations des paramètres.

Dans une première étape, nous allons négliger l'effet de ces contraintes en adoptant une représentation macroscopique des phénomènes. Le problème se limite alors à l'amélioration du rendement de l'ensemble des installations, ce qui conduit en premier lieu à augmenter le débit de chacun des organes. En ce sens, les techniques optimales mises au point par L.S. Pontryagin (7) s'avèrent des outils puissants de calcul.

Dans une deuxième étape, une représentation microscopique assimilant le système à un processus échantillonné, nécessite l'emploi des méthodes optimales étendues aux systèmes discrets par I.T. Fau (8) et J. Charles (9).

5.2. REPRESENTATION MACROSCOPIQUE

L'augmentation du débit des fours demande la diminution du temps de transit de l'acier entre l'aciérie et le laminoir. Affectons à chaque coulée un coût élémentaire tel que :

$$c_n = x_n + f(x_n)$$

le coût global, pour N coulées de même nuance d'acier, est :

$$C = \sum_{n=1}^N c_n$$

Chaque nuance d'acier possède son propre coût, il convient de pondérer la relation précédente et dans ce cas, l'optimisation à long terme du processus

demande la minimalisation de la fonction :

$$(5.1.) \quad C = \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 + \dots + \lambda_i C_i + \dots + \lambda_m C_m$$

λ_i est le nombre de coulées de nuance d'acier i dont le coût est C_i .

La stratégie optimale est telle que :

$$(5.2.) \quad C = \text{Min}_{\lambda_i} \left[\lambda_i (\text{min } C_i) \right]$$

compte tenu de la contrainte :

$$(5.3.) \quad \sum_{i=1}^m \lambda_i = N \quad N, \text{ nombre total de coulées}$$

Les relations (5.2) et (5.3) conduisent à la mise en oeuvre, dans la boucle de réaction, d'un calculateur donnant les track-time optimaux. Toutefois, une telle étude ne tient pas compte du caractère discret de l'enfournement et il convient d'élaborer un modèle plus détaillé.

5.3. REPRESENTATION MICROSCOPIQUE

A cet effet, mettons en évidence les principaux éléments du système.

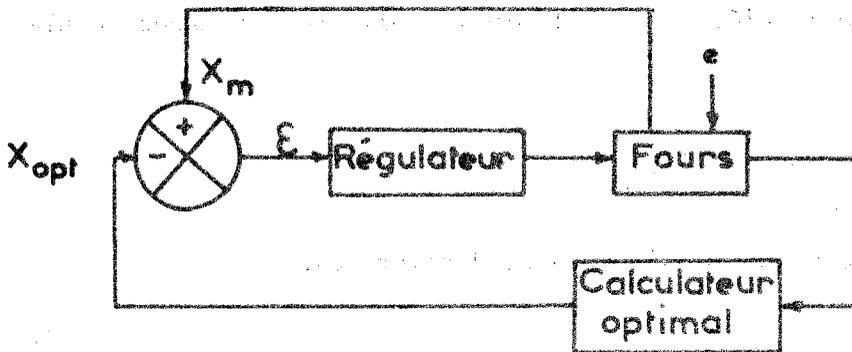


Figure 5.1.

Sur le schéma de régulation de la figure (5.1), on voit apparaître le temps de travail du laminoir ainsi que les grandeurs :

X_{opt} track-time optimal

X_m track-time minima ne saturant pas les fours

L'organe régulateur, commandé par la différence entre X_{opt} et X_m , élabore la commande des fours en agissant :

- sur le nombre de fours en service (la mise en oeuvre des fours est commandée par un organe de décision)
- sur le track-time des coulées ultérieures, en lui donnant des valeurs supérieures à x_m , afin d'éviter la saturation.

Le calculateur optimal, chargé de maintenir la relation 5.2 détermine la nuance d'acier à utiliser et le track-time optimum x_{opt}

Ces considérations permettent la décomposition de la figure 5.1 selon le schéma :

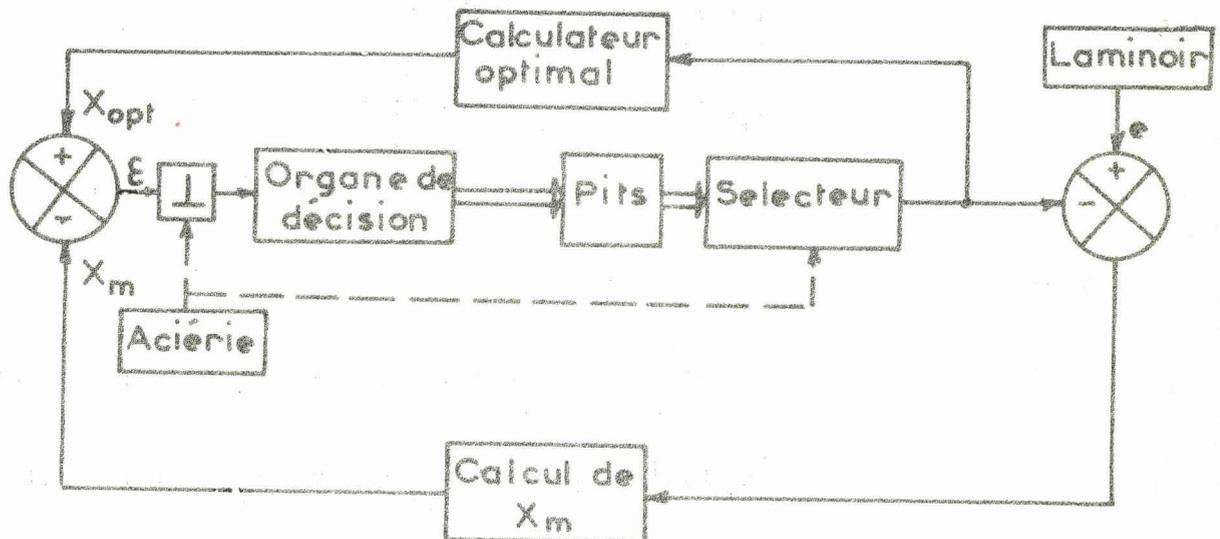


Figure 5.2

Le critère d'optimalité (5.1) n'est valable que si le coût élémentaire C_i est constant pour les λ_i coulées correspondantes. Cette hypothèse ne se confirme plus lorsque les contraintes d'enfournement imposent $x_m > x_{opt}$ et la relation 5.1 doit être modifiée.

Dans ce sens, l'optimisation du processus demande la réduction de l'erreur, c'est-à-dire du temps libre du four, le laminoir étant lui-même proche de la saturation. Compte tenu des notations adoptées au chapitre IV, l'évolution du système est décrite par les équations de récurrence :

$$(5.4.) \quad \begin{aligned} x_1(k+1) &= g \left[\bar{x}_1(k) \right] + u_1(k) + a \\ x_2(k+1) &= g \left[\bar{x}_2(k) \right] + u_2(k) + a \\ &\vdots \\ x_j(k+1) &= g \left[\bar{x}_j(k) \right] + u_j(k) + a \end{aligned}$$

Les contraintes s'expriment par les inégalités :

$$(5.5.) \quad \begin{aligned} g \left[\bar{x}_1(k) \right] - g \left[\bar{x}_2(k) \right] + b &< 0 \\ g \left[\bar{x}_2(k) \right] - g \left[\bar{x}_3(k) \right] + b &< 0 \\ &\vdots \\ g \left[\bar{x}_j(k) \right] - g \left[\bar{x}_1(k+1) \right] + b &< 0 \\ u_i(k) &> 0 \quad i = 1, 2, \dots, j \end{aligned}$$

Il vient :

$$(5.6.) \quad \begin{aligned} g \left[\bar{x}_1(k) \right] - g \left[\bar{x}_2(k) \right] + b &= -R_1 \left[\bar{x}_1(k) ; \bar{x}_2(k) \right] < 0 \\ g \left[\bar{x}_2(k) \right] - g \left[\bar{x}_3(k) \right] + b &= -R_2 \left[\bar{x}_2(k) ; \bar{x}_3(k) \right] < 0 \\ &\vdots \\ g \left[\bar{x}_j(k) \right] - g \left\{ g \left[\bar{x}_1(k) \right] + u_1(k) + a \right\} &= -R_j \left[\bar{x}_1(k) ; \dots \right. \\ &\quad \left. \dots \bar{x}_j(k) ; u_1(k) \right] < 0 \end{aligned}$$

Le critère d'optimalité revient à rechercher le minimum de l'erreur quadratique moyenne.

$$(5.7) \quad J = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^j u_i^2(k)$$

5.4. APPLICATION DU PRINCIPE DU MAXIMUM DISCRET

5.4.1. Rappel du principe

L'évolution d'un système est décrite par un système d'équations de récurrence écrit sous la forme vectorielle :

$$X(k+1) = G \left[X(k), U(k) \right]$$

où X vecteur colonne à n composantes, vecteur d'état

U vecteur colonne à m composantes, commande du système

G fonction vectorielle à n composantes, continue et admettant des dérivées continues en X et U.

Les contraintes sont exprimées par les inégalités :

$$R \left[X(k) ; U(k) \right] > 0$$

et par les égalités :

$$Q \left[X(k) ; u(k) \right] = 0$$

R et Q sont des fonctions vectorielles à r et q composantes, continues et admettant des dérivées continues en X et U.

La fonction de coût est :

$$J = \sum_{k=0}^{K-1} f \left[X(k), U(k) \right] + g(\sigma, K')$$

où f est une fonction scalaire soumise aux conditions de continuité et de dérivabilité par rapport à X et U.

g est une fonction scalaire, définie sur la variété finale avec :

$$K = K' \quad (\text{entier positif})$$

$$X(K) = x_1(\sigma, K')$$

σ vecteur paramétrique à $p < n-1$ dimensions ; x_1 fonction vectorielle à n composantes, continue dérivable en σ

En posant la fonction Hamiltonienne :

$$H(k) \equiv -f \left[\underline{X}(k), U(k) \right] + \Psi^T(k+1) G \left[\underline{X}(k), U(k) \right]$$

où Ψ est un vecteur colonne à n composantes, Ψ^T est le vecteur transposé de Ψ

On montre que $U(k)$ est un vecteur de réglage optimal lorsqu'il existe un vecteur $\Psi(k)$, des vecteurs $\mu(k)$, positifs et un vecteur $v(k)$ à r et q composantes tels que :

$$\Psi(k) = \frac{\partial H(k)}{\partial X(k)} + \left\{ \frac{\partial R \left[\underline{X}(k); U(k) \right]}{\partial X(k)} \right\} p(k) + \left\{ \frac{\partial Q \left[\underline{X}(k); U(k) \right]}{\partial X(k)} \right\} v(k)$$

$$R \left[\underline{X}(k); U(k) \right] > 0$$

$$Q \left[\underline{X}(k); U(k) \right] = 0$$

(5.8.)

$$\frac{\partial H(k)}{\partial U(k)} + \left\{ \frac{\partial R \left[\underline{X}(k); U(k) \right]}{\partial U(k)} \right\} \mu(k) + \left\{ \frac{\partial Q \left[\underline{X}(k); U(k) \right]}{\partial U(k)} \right\} v(k) = 0$$

$$\mu_j(k) R_j \left[\underline{X}(k); U(k) \right] = 0 \quad j = 1, 2, \dots, r$$

$$\frac{\partial g(\sigma, K)}{\partial \sigma} + \left[\frac{\partial x_1(\sigma, K)}{\partial \sigma} \right] \Psi(K) = 0 \quad k = 0, 1, \dots, K-1$$

5.4.2. Commande optimale d'une batterie de deux fours

Le principe du maximum discret, dont la généralité en fait un outil de calcul très puissant, est d'un emploi difficile lorsque le nombre de contraintes est élevé. Nous vous proposons ici d'appliquer cette méthode à l'étude d'une batterie de deux fours Pitts.

L'évolution de ce système particulier est décrit par les équations de récurrence :

$$(5.9) \quad \begin{aligned} x_1(k+1) &= g \left[x_1(k) \right] + u_1(k) + a \\ x_2(k+1) &= g \left[x_2(k) \right] + u_2(k) + a \end{aligned}$$

elle est limitée par les contraintes :

$$(5.10.) \quad \begin{aligned} R_1 &= g \left[\bar{x}_2(k) \right] - g \left[\bar{x}_1(k) \right] - b > 0 \\ R_2 &= g \left[\bar{x}_1(k+1) \right] - g \left[\bar{x}_2(k) \right] - b > 0 \end{aligned}$$

La fonction de coût choisie est :

$$(5.11.) \quad J = \sum_{k=0}^{\infty} u_1^2(k) + u_2^2(k)$$

La fonction hamiltonienne est :

$$\begin{aligned} H(k) &= -u_1^2(k) - u_2^2(k) + \psi_1(k+1) \{ g \left[\bar{x}_1(k) \right] + u_1(k) + a \} \\ &\quad + \psi_2(k+1) \{ g \left[\bar{x}_2(k) \right] + u_2(k) + a \} \end{aligned}$$

Dans ce cas, les équations 5.8. viennent :

$$(5.12) \quad \begin{aligned} \psi_1(k) &= \psi_1(k+1) \frac{\partial g}{\partial x_1} + \mu_1(k) \frac{\partial R_1}{\partial x_1} + \mu_2(k) \frac{\partial R_2}{\partial x_1} \\ \psi_2(k) &= \psi_2(k+1) \frac{\partial g}{\partial x_2} + \mu_1(k) \frac{\partial R_1}{\partial x_2} + \mu_2(k) \frac{\partial R_2}{\partial x_2} \\ 2 u_1^*(k) &= \psi_1(k+1) + \mu_2 \frac{\partial R_2}{\partial u_1} \\ 2 u_2^*(k) &= \psi_2(k+1) \end{aligned}$$

Les paramètres $u_1^*(k)$ et $u_2^*(k)$ qui apparaissent ci-dessus constituent la commande optimale du système, et les relations (5.12) décrivent l'évolution de celui-ci lorsqu'il est compensé d'une façon optimale.

5.4.3. Trajectoires de phase du système optimisé

Il est intéressant d'étudier la stabilité de l'asservissement obtenu, et pour cela il convient d'appliquer le théorème de la stabilité locale de Ljapunov permettant de démontrer que l'étude des trajectoires de phase d'un système non

linéaire, au voisinage d'un point singulier, se ramène à l'examen des trajectoires de phase du système linéarisé.

Les relations (5.4.) deviennent alors :

$$(5.13) \quad g \begin{bmatrix} x(k) \end{bmatrix} = \alpha x(k) + \beta$$

Le système d'équations 5.12. s'écrit alors :

$$(5.14) \quad \begin{aligned} \psi_1(k) &= \alpha \psi_1(k+1) + \mu_1(k) \frac{\partial R_1}{\partial x_1} + \mu_2(k) \frac{\partial R_2}{\partial x_1} \\ \psi_2(k) &= \alpha \psi_2(k+1) + \mu_1(k) \frac{\partial R_1}{\partial x_2} + \mu_2(k) \frac{\partial R_2}{\partial x_2} \\ 2u_1^*(k) &= \psi_1(k+1) + \mu_2(k) \frac{\partial R_2}{\partial x_2} \\ 2u_2^*(k) &= \psi_2(k+1) \end{aligned}$$

Au chapitre IV, on a montré que l'application stricte des contraintes élimine la commandabilité en fixant la suite $u_1(0) u_2(0) \dots$ et la notion de commande optimale n'a plus de raison d'être. Dans ce sens, il est plus intéressant d'étudier l'évolution du système, muni de son compensateur optimal, en supposant les contraintes suivantes satisfaites :

$$R_1 \begin{bmatrix} X(k) \end{bmatrix} > 0 \quad \text{et} \quad R_2 \begin{bmatrix} X(k) ; U(k) \end{bmatrix} > 0$$

ce qui entraîne :

$$\mu_1 = \mu_2 = 0$$

L'évolution du système optimal linéarisé est entièrement décrit par le système d'équations :

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= \alpha x_1(k) + b + \frac{1}{2} \psi_1(k+1) \\
 x_2(k+1) &= \alpha x_2(k) + b + \frac{1}{2} \psi_2(k+1) \\
 \psi_1(k+1) &= \frac{1}{\alpha} \psi_1(k) \\
 \psi_2(k+1) &= \frac{1}{\alpha} \psi_2(k)
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

L'étude peut être limitée aux variables x_1 et ψ_1 , et le changement de variable amenant le point singulier à l'origine du plan de phase

$$\varepsilon(k) = x(k) - \frac{b}{1-\alpha}$$

permet d'écrire :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon(k+1) &= \alpha \varepsilon(k) + \frac{1}{2\alpha} \Psi(k) \\
 \Psi(k+1) &= \frac{1}{\alpha} \Psi(k)
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

L'équation de récurrence liant les valeurs de la variable ε aux différents instants d'échantillonnage est :

$$\varepsilon(k+2) - \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right) \varepsilon(k+1) + \varepsilon(k) = 0 \tag{5.17}$$

Par conséquent l'origine du plan de phase est un point d'équilibre instable, la configuration des trajectoires de phase est celle d'un col instable du type 1 | 5 |

5.5. CONCLUSION

L'étude entreprise met en évidence le caractère instable du système optimal non soumis aux contraintes, ce qui confirme les résultats obtenus par la simulation directe. Dans ce sens, la batterie de fours se comporte comme un système optimal qui tend généralement à respecter le plus rapidement possible ses contraintes d'ordre le plus élevé : la trajectoire optimale totale est alors formée par l'association de portions de trajectoires "libres", ou sans contraintes, et de portions de trajectoires satisfaisant un certain nombre de contraintes.

L'application des contraintes aux fours Pits, conduit alors à la prédétermination de toutes les variables et il convient, dans une étude réaliste, de l'élargir en tenant compte des aléas de fonctionnement |10 |

CONCLUSION

La mise en oeuvre d'un régulateur élaboré par une méthode déterministe à un processus soumis à des perturbations, ou décrit de façon incomplète, donne en général des résultats assez peu satisfaisants. C'est la raison pour laquelle de nombreux auteurs proposent l'introduction de méthodes d'études statistiques, qui s'appliquent aisément aux systèmes quasi-linéaires, invariants dans le temps et recevant des signaux aléatoires dont les caractéristiques statistiques sont connues et stationnaires.

Toutefois, l'hypothèse de stationnarité des signaux aléatoires n'est pas toujours vérifiée, ce qui diminue les performances du régulateur et rend nécessaire la mise en oeuvre d'une correction adaptative du système.

A notre sens, l'extension des méthodes statistiques à un système discret, conduit naturellement à une régulation réaliste d'une batterie de fours Pits. En effet, il est alors possible d'introduire un signal aléatoire qui tienne compte des retards inhérents au système et de l'imprécision sur les variables. C'est dans ce sens que nous nous proposons de poursuivre notre travail.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Fonctionnement et organisation des fours Pits à l'usine de Dunkerque ,
Compagnie Internationale pour l'Informatique
Rapport du contrat de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique
et Technique - Décembre 1967 -
- (2) Représentations analogiques et homologiques dans les techniques de la
chaleur
Société Française des Thermiciens - Dunod 1965 -
- (3) Conduite automatique et gestion dynamique d'une batterie de fours Pits
Laboratoire d'Automatique Théorique de la Faculté des Sciences de Lille
Rapport final du contrat n° 67 00 674 de la Délégation Générale à la
Recherche Scientifique et Technique - 1er Juin 1968 -
- (4) Calcul opérationnel dans un anneau fini et systématique discrète
Thèse de docteur Sciences Physiques - J.E.N. Richalet
Faculté des Sciences de Paris - Décembre 1967 -
- (5) Systèmes échantillonnés non linéaires
P.VIDAL Gordon and Breach 1968
- (6) On the General Theory of Control Systems
R.E. Kalman 1st International Congress of Automatic Control - Moscou 1960
- (7) The Mathematical Theory of Optimal Process
Pontryagin - Boltyanskii - Gamkrelidze - Mishchenko (J.Wiley 1965)
- (8) The Discrete Maximum Principle
L.T. Fan CS Wang
(Wiley 1964)
- (9) Principe du maximum discret
J. Charles - Revue A, VIII, 2 - Belgique 1966
- (10) Commande non déterministe des systèmes identifiés par des informations
incomplètes
S.Wegrzyn - Conférence à la Faculté des Sciences de Lille - Mai 1968.

Ouvrages de métallurgies

- (11) La transmission de la chaleur au cours de la solidification, du réchauffage et de la trempe de l'acier.
Dardel - éditions de la revue de Métallurgie

Ouvrages traitant des techniques optimales

- (12) Commande optimale par commutation
Lerner (Dunod 1965)
- (13) Introduction à la commande optimale
Naslin - Dunod 1965
- (14) Advances in Control Systems
édité par C.T. Leondes
Academic Press 1964 - 1965
- (15) Optimal and Self-Optimizing Control
édité par Oldenburger
M.I.T. 1966
- (16) Sur le calcul et la détermination des trajectoires optimales
M. Sidar C.R. Acad Paris 1966 Série A 12226
- (17) Optimisation dynamique avec contraintes sur les commandes et les coordonnées
F.Garnier A Ghouila Hourri Automatisme (1967)
- (18) Optimisation statistique des systèmes dynamiques
Lefèvre Dunod 1965

Ouvrages traitant plus spécialement des techniques de calcul

- (19) Dynamic Programming an Lagrange Multipliers
R. Bellman - Proc. Nat. Acad. Sciences U.S.A. 1956
- (20) La programmation dynamique et ses applications
R. Bellman S. Sreyfus (Dunod 1965)
- (21) Un algorithme pour la détermination des plus petites distances entre les sommets d'un réseau
I. Tomescu AFIRO n° 5 1967.

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u>	
<u>CHAPITRE 1</u> : <i>Analyse du processus</i>	1
1.1. Description	
1.2. Les lingots	
1.3. Acheminement des lingots	
1.4. Chauffage	
1.5. Temps de séjour au four	
1.6. Acierie	
1.7. Laminoir	
<u>CHAPITRE 2</u> : <i>Présentation du problème</i>	7
2.1. Intérêt de l'étude	
2.2. Hypothèses simplificatrices	
<u>CHAPITRE 3</u> : <i>Simulation logique d'une batterie de fours Pits</i>	13
3.1. Notations	
3.2. Simulation d'un four	
3.3. Graphes de plusieurs fours	
3.4. Conclusion	
<u>CHAPITRE 4</u> : <i>Commande des fours Pits</i>	25
4.1. Mise en équation	
4.2. Commandabilité dynamique de la batterie de fours	
4.3. Conclusion	
<u>CHAPITRE 5</u> : <i>Optimalisation du processus</i>	31
5.1. Généralités	
5.2. Représentation macroscopique	
5.3. Représentation microscopique	
5.4. Application du principe du maximum discret	
5.5. Conclusion	
<u>CONCLUSION</u>	41

