

وزارة التعليم و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE -- المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *electronique*

# PROJET DE FIN D'ETUDES

### S U J E T

Modélisation expérimentale d'un  
four rotatif à ciment

Proposé par :

M<sup>r</sup> CHIGARA

Etudié par :

M<sup>r</sup> A. HAMANI

Dirigé par :

M<sup>r</sup> CHIGARA

PROMOTION : *Sept 90*

— S U J E T —

MODELISATION EXPERIMENTALE  
D'UN  
FOUR ROTATIF A CIMENT

A mes parents, pour leur soutien et  
leurs sacrifices, pour l'exemple qu'ils  
m'ont donné et la confiance qu'ils m'ont  
témoignée.

A tous mes éducateurs, pour leur exprimer  
ma profonde gratitude.

A mes frères et soeurs.

A tous mes amis.

REMERCIEMENTS

*Je tiens à exprimer mes remerciements:*

- à tous les professeurs de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation en particulier, Messieurs F.CHIGARA et A.HADJTOUTAH qui ont bien voulu diriger cette étude.
- à Monsieur ZOUBA, Directeur des études à l'E.N.S.I., qui n'a pas hésité à m'autoriser à terminer mon travail au sein de son centre de calcul.
- au personnel qu'il dirige pour son aide précieuse et sa serviabilité.
- aux personnels du centre de calcul et de la salle de tirage de l'E.N.P., qui ont mis à ma disposition les moyens nécessaires pour l'élaboration de ce travail.
- à mes amis pour leur soutien moral qui m'a permis de mener à fin ce travail.

# SOMMAIRE

N° PAGE

- INTRODUCTION	6
- CHAPITRE I	
X THERMIQUE DE LA CUISSON A VOIE SECHE	9
I-1 DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROCÉDE DE FABRICATION DU CIMENT PAR VOIE SECHE DANS LA CIMENTERIE DE "MEFTAH"	10
I-1-1 Introduction	10
I-1-2 Etapes de fabrication du ciment	10
I-1-3 Aspect physico-chimique du four rotatif	15
X I-2 INFLUENCE DU COMPORTEMENT THERMIQUE SUR LA CONSOMMATION CALORIFIQUE, LA QUALITE ET LA PRODUCTION	16
XI-3 ASPECT THERMIQUE DU FOUR	17
I-3-1 La combustion	17
I-3-2 Analyse des phénomènes d'échange thermique dans le four	18
I-3-3 Possibilité d'action sur la consommation calorifique, la qualité et la production par un contrôle des échanges thermiques dans le four	20
I-4 CONCLUSION	21
- CHAPITRE II	
MODELISATION DU FOUR	22
X II-1 OBJECTIF	23
X II-2 NOTIONS THEORIQUES GENERALES RELATIVES A LA MODELISATION	23
II-2-1 Introduction	23
II-2-2 Analyse d'un processus	24
II-2-3 Les différents types de modèles mathématiques de processus	25
II-2-4 Utilités des modèles	26
II-2-5 Etapes de la modélisation	26
II-3 APPLICATION AU FOUR DE "MEFTAH"	33
II-3-1 Définition du procédé	33
II-3-2 Hypothèses	33
II-3-3 Exposé du modèle	34
II-3-4 Identification	38
II-3-5 Validation (ou simulation)	40
II-4 CONCLUSION	46
- CHAPITRE III	
LA COMMANDE	47
III-1 UTILISATION DU MODELE POUR LE LA COMMANDE OPTOIMALE DU FOUR ROTATIF	48
III-2 CHOIX D'UNE METHODE D'OPTIMISATION DU CRITERE	50
III-2-1 Méthode des fonctions de pénalisation	52
III-2-2 Minimisation du critère modifié	53
III-2-3 Methode de recherche	53
III-2-4 Algorithme de la méthode	57

- CONCLUSION GENERALE	60
- ANNEXE A	62
- ANNEXE B	72
- ANNEXE C	78
- BIBLIGRAPHIE	84

INTRODUCTION

L'objectif d'un ensemble industriel est la production. La chaîne de production comporte plusieurs étapes qui se décomposent en "processus" le plus souvent continus et dépendants de nombreux variables et paramètres.

La conduite de ces processus doit permettre d'obtenir une production donnée de manière économique précise et sûre.

Malheureusement, en pratique l'accomplissement simultané de tels objectifs est souvent très difficile, voire impossible, vu leur caractère conflictuel et contradictoire.

Par conséquent, dans notre étude qui concerne le processus du four rotatif de la cimenterie de MEFTAH, nous nous sommes contenté uniquement de viser l'objectif consistant à assurer le transfert maximal de chaleur entre les gaz chauds et la farine ( matière première au cours de la cuisson ), dans le but d'obtenir du clinker ( produit essentiel du ciment ) à la sortie du four. Ceci se traduit par la réalisation d'une température de la farine dans la zone de cuisson entre 1400 °C et 1450 °C, intervalle indiquant forcément la formation du clinker.

Pour ce faire, nous avons établi un modèle mathématique exprimant la température de la farine et des gaz chauds dans le four. Ce modèle est appelé modèle de reconnaissance car il est construit à partir des lois conventionnelles de la physique, il décrit les phénomènes de transfert se déroulant dans le four.

Pour aboutir à un tel modèle nous avons suivi les étapes suivantes:

- l'analyse du procédé qui a pour but de définir le système, ses interactions avec le milieu extérieur ( ou entrées ) ainsi que les réponses ( ou sorties ) du système à ces entrées.

- les hypothèses permettant de parvenir à une description selon l'objectif à atteindre.

- l'écriture des lois physiques de transfert de chaleur par un bilan thermique entre les gaz chauds et la farine.

Dans notre étude nous avons seulement mis les résultats auxquels aboutissent les développements mathématiques, et qui nous seront utiles par la suite.

- l'identification des paramètres inconnus du modèle obtenu à la fin de l'étape précédente, par une comparaison des prévisions du modèle aux températures mesurées pour un régime réel.

- la validation du modèle obtenue consistant à vérifier si le modèle simule d'une manière satisfaisante le processus.

- enfin, l'utilisation du modèle pour avoir la température de la farine, dans la zone de cuisson, maximale entre 1400 °C et 1450 °C.

CHAPITRE I

I-1 DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROCEDE DE  
FABRICATION DU CIMENT PAR VOIE SECHE DANS LA  
CIMENTERIE DE "MEFTAH" [1], [2], [3]:

I-1-1 Introduction:

L'élément de base du ciment est le clinker. Il est obtenu par la combinaison de matières premières soigneusement dosées. Celles-ci sont : l'Argile dont la formule est  $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$  ou  $(Al_3;Fe)_2O_3.SiO_2$ , et la roche de Calcaire:  $CaCO_3$ .

Le mélange chauffé se décarbonate et la chaux libérée ( $CaO$ ) se combine à la Silice, à l'Alumine et au Fer. Le produit obtenu, le clinker, comprend essentiellement les 2 Silicates de Calcium:  $3CaO.SiO_2$  et  $2CaO.SiO_2$ , respectivement Silicates tricalciques et bicalciques. L'Alumine et le Fer passent, en majeure partie, à l'état de  $3CaO, Al_2O_3$  et d'une solution solide de composition approximative  $4CaO.Al_2O_3, Fe_2O_3$ .

I-1-2 Etapes de fabrication du ciment:

Le principe de fabrication du ciment décrit par la figure I-1, se réduit aux trois opérations de:

- préparation
- cuisson
- broyage

I-1-2-1 La préparation:

I-1-2-1-1 L'extraction:

La matière première abattue par explosifs et enlevée par pelles mécaniques ou extraite directement par excavateur, est chargée sur convoyeurs depuis la carrière jusqu'à l'usine où elle sera stockée dans une trémie. Dans la cimenterie de MEFTAH, en plus de la Silice et du Fer contenus dans l'Argile, on rajoute encore ces deux éléments par un apport de sable et de minerai de Fer extraits d'autres carrières et stockées à leur tour dans des trémies.

I-1-2-1-2 Concassage:

C'est la fragmentation des gros blocs de la matière première en grains de petite taille (

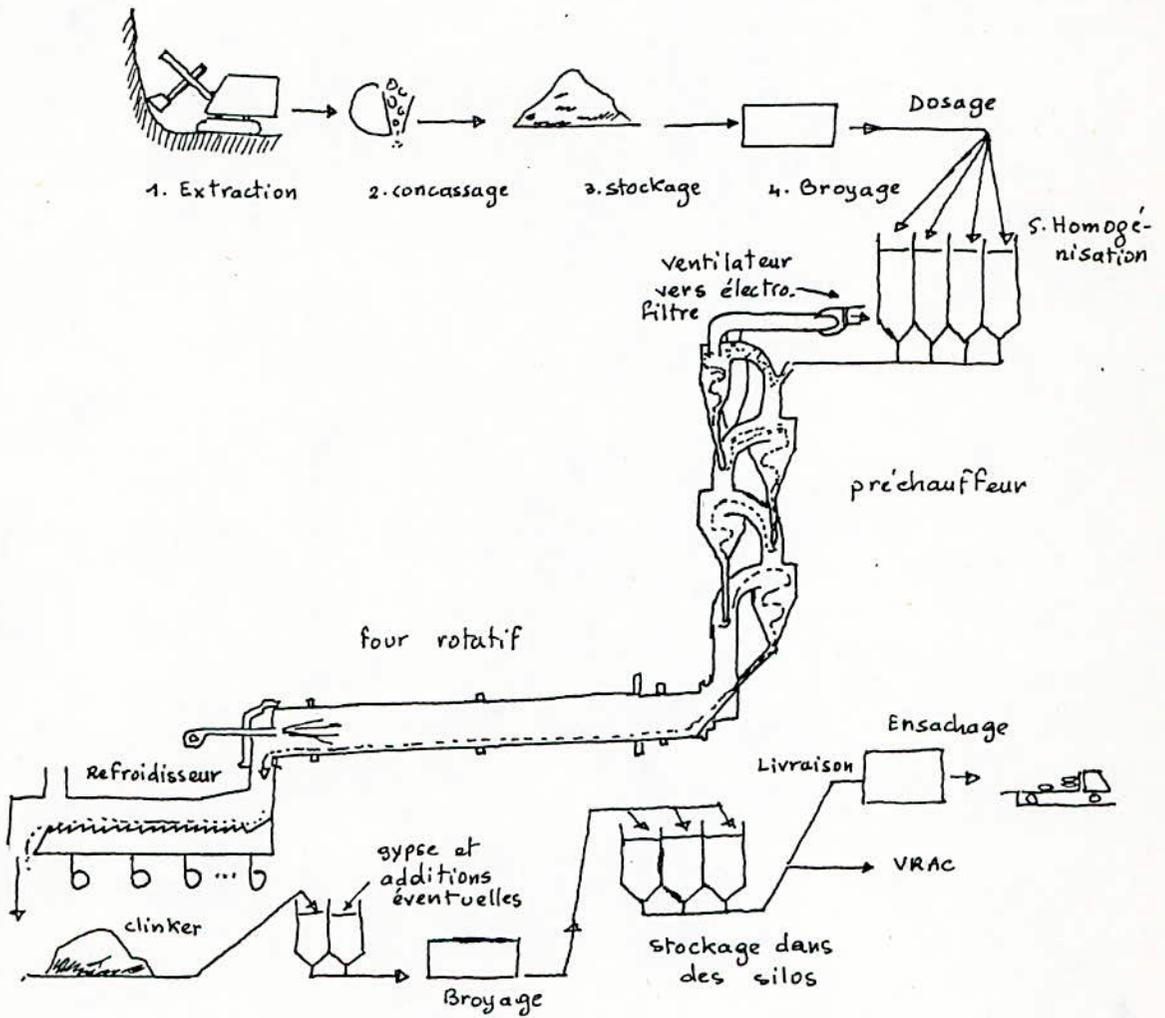


Fig Principe de fabrication du ciment à voie sèche.

entre 10 et 100 mm ). Les produits obtenus sont stockés chacun dans des silos.

#### I-1-2-1-3 Broyage:

Le calcaire, l'Argile, le sable et le minerai de Fer sont extraits de leurs silos au moyen de doseurs ayant chacun un débit donné, et sont déversés dans un concasseur-sécheur qui réduit les dimensions du mélange au-dessous de 25 mm, ainsi que son humidité. Le matériau obtenu est déchargé dans un broyeur à la sortie duquel on a une poudre dont les dimensions sont comprises entre 38 et 200 microns.

#### I-1-2-1-4 Homogénéisation:

Les divers constituants de la poudre obtenue sont intimement mélangés par un brassage réalisé par des moyens mécaniques ou pneumatiques.

#### I-1-2-2 La cuisson:

L'atelier de cuisson comprend:

- une partie fixe : le préchauffeur.
- une partie mobile : le four rotatif.
- le refroidisseur.

##### i-1-2-2-1 Le préchauffeur:

Le préchauffeur est composé de 2 tours symétriques ayant chacune 4 gros cyclones ( ou étages d'échanges ) en acier, garnis à l'intérieur de briquettage réfractaire, montés en série et suivis des ventilateurs puissants. Les fumées ou gaz chauds formés dans la partie rotatif sont tirés par les ventilateurs et circulent à grande vitesse dans les cyclones. La matière en poudre , transportée vers le préchauffeur à l'aide de pompes pneumatiques, est injectée à la partie supérieure et descend par gravité dans les cyclones successifs pour pénétrer enfin dans le four dans un état de décarbonatation partielle ( 10 à 20 % ). La matière se réchauffe au fur et à mesure qu'elle descend tandis que les gaz chauds se refroidissent en montant; c'est l'échange de chaleur à contre-courant. Ces gaz sortent du préchauffeur à une température de 350 °C qui est encore abaissée à 150 °C dans la tour de conditionnement, avant qu'ils subissent un dépoussiérage dans l'électrofiltre.

#### I-1-2-2-2 Le four rotatif:

Il est essentiellement constitué par un cylindre de 5,8 m de diamètre extérieur et de 84 m de long, voir la figure I-2. Ce cylindre est revêtu intérieurement de briquetage réfractaire afin d'assurer sa protection vis-à-vis des hautes températures ( supérieures à 900 °C ) régnant dans le four. L'épaisseur du revêtement est de 32 cm.

Le raccordement du préchauffeur au four se fait par la chambre à fumées.

Le cylindre repose sur 3 appuis par l'intermédiaire de 3 bandages et de trains avec galet de roulement lui permettant de tourner autour de son axe légèrement incliné (  $\theta = 1,8^\circ$  ), avec une vitesse allant de 0,63 à 1,8 tours/min.

La matière à traiter rentre par l'extrémité haute du cylindre et progresse, par suite de la rotation du four jusqu'à l'extrémité basse où une flamme dirigée longitudinalement produit la chaleur nécessaire au traitement à réaliser. Cette flamme résulte de la combustion du gaz naturel par l'air secondaire qui refroidit le clinker dans le refroidisseur.

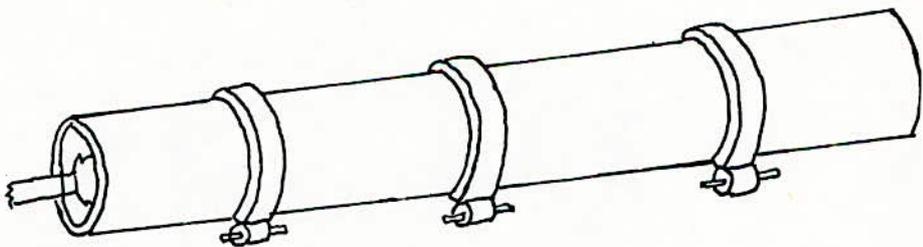


Fig I-2 Four rotatif

#### I-1-2-2-3 Refroidisseur à clinker:

Le clinker sort du four rotatif sous forme de granules poreuses à une température d'environ 1250 °C et la chaleur sensible ainsi importée est récupérée dans le refroidisseur.

Le refroidissement du clinker est obtenu à l'aide d'un courant d'air frais qui constitue après réchauffage au contact du clinker, l'air secondaire de la combustion. Le refroidisseur est d'autant plus efficace que l'échange thermique entre air et clinker est mieux assuré.

Un refroidisseur ( Füller-Constantin ) à grille prolonge le four au niveau du capot de chauffe et est constitué par une série d'éléments mobiles ( grilles ) favorisant l'avancement du clinker et au travers desquels circule l'air de refroidissement insufflé par des ventilateurs réparties au niveau de chaque compartiment du refroidisseur. Voir la figure I-3.

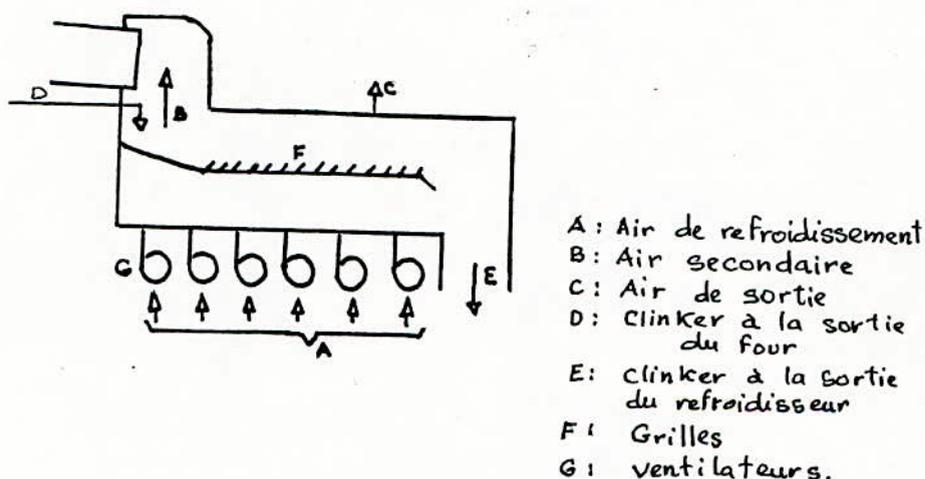


Fig I-3 Refroidisseur Füller.

#### I-1-2-3 Le broyage:

Le clinker sortant du refroidisseur à une température de 250 °C est traité, avec un additionnement éventuel de gypse et de cendres volantes, dans un broyeur à boulets qui l'amène à l'état d'une poudre dont les grains sont inférieurs à 200 microns. Le ciment ainsi obtenu est stocké dans des silos pour être livré, ensuite, soit en vrac soit dans des sacs.

I-1-3 Aspect physico-chimique du four rotatif  
[2], [3]:

A l'amont du four se présente la farine avec un taux de décarbonatation de 10 à 20 % et une température de 900 °C. Le processus de décarbonatation, décrit par l'équation:

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , se poursuit sur une longueur de 36 m, appelée zone de décarbonatation. La chaux CaO libérée se combine au fur et à mesure à l'Argile pour former les Silicates bicalciques et tricalciques qui ont la même chaleur de formation.

Dans les derniers mètres de la zone de décarbonatation et au début de la zone de transition ( dont la longueur est 12 m et où la température est de 1000 °C ), les réactions de calcination progressent rapidement et s'achèvent: une forte quantité de chaux se trouve à l'état libre. Dans la zone de décarbonatation, la matière se présente sous forme de nodules irréguliers mêlés de poussières, plus ou moins fluidisés.

Dans la zone de cuisson qui s'étale sur 28 m, la température de la matière atteint les 1400 °C, celle-ci fond partiellement et colle à la paroi du four formant ainsi un anneau appelé anneau-amont. A l'apparition du premier liquide, la matière commence à s'agglomérer pour former des grains arrondis ( du fait de la rotation du four ) qui constituerait le clinker, dont la granulométrie et la porosité dépendent des conditions de marches.

A l'aval lorsque le clinker commence à se refroidir, la partie fondue se solidifie en formant un anneau, appelé anneau-aval. Entre les deux anneaux, se forme aussi un épais dépôt de scories, le croûtage qui protège le réfractaire, voir la figure I-4.

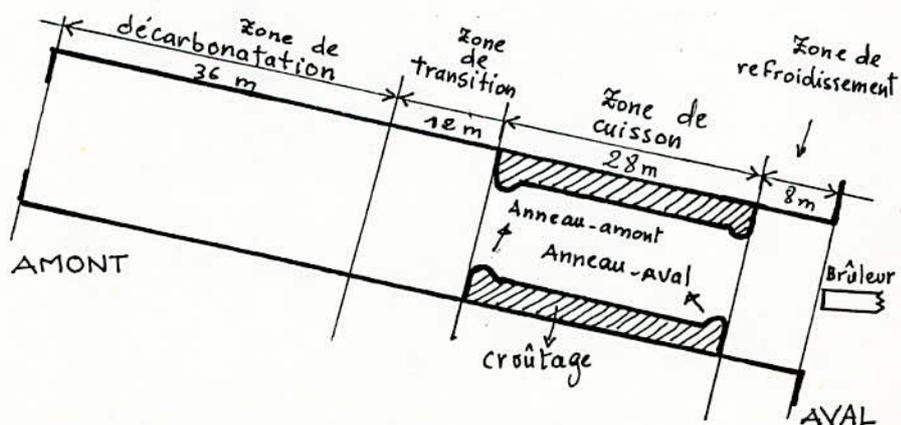


Fig I-4 Différentes zones du four dans le procédé sec.

Dans cette zone toute la chaux est combinée à la Silice, à l'Alumine et au Fer.

#### I-2 INFLUENCE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU FOUR SUR LA CONSOMMATION CALORIFIQUE, LA QUALITE ET LA PRODUCTION:

Quand le four est trop chaud, c'est-à-dire que pour un débit de farine donné correspond une quantité de chaleur supérieure à ce qu'il en faut, le préchauffage, les réactions de décarbonatation et de clinkérisation se font à des vitesses plus grandes que celles à l'état normal du fonctionnement de l'atelier de cuisson. Il s'en suit un accroissement du champ de température dans le refroidisseur, le four et le préchauffeur. Et au lieu d'avoir 10 % de matière première décarbonatée à l'amont du four, on aura un taux élevé. De même, les réactions de formation du clinker s'achèvent avant d'atteindre la zone prévue pour leur déroulement. En conséquence, le clinker séjourne plus dans le four et il est surcuit: il se rassemble en grosses mottes dont les noyaux sont fondus ( ou bien il fond complètement ) et dont la densité est très grande. Ceci le rend difficilement broyable, mais sa qualité est meilleure.

Pour ce qui est des pertes, plus le four est chaud plus les pertes sont importantes, car la quantité de chaleur nécessaire à la transformation d'une quantité donnée de la matière première en clinker est constante, donc le surplus de chaleur va se répartir entre:

- la fusion du clinker
- les pertes par les parois
- les pertes dans les fumées à l'amont du four
- les pertes dans le refroidisseur

On voit, donc, que lorsque le four est trop chaud, la consommation calorifique augmente, la qualité du clinker est meilleure pour une production qui aurait pu être plus grande.

Un autre inconvénient qui peut survenir lors du surchauffage du four est celui de l'usure du briquetage dans le four et dans les cyclones du préchauffeur. Cette usure est provoquée par l'attaque des alkalis(  $K_2O$  et  $Na_2O$  ) présents dans la matière première en faibles proportions.

Dans le four, ils s'infiltreront à travers le croûtage de la zone de cuisson et réagissent avec la surface des briques juste en-dessous.

Dans les cyclones, les alkalis évaporés dans la zone de cuisson sont emportés par les fumées et sont déposés sur les briques des cyclones.

Ce phénomène diminue l'efficacité thermique de l'atelier de cuisson.

Si le four est froid, la chaleur nécessaire à la transformation complète d'une quantité donnée de farine est insuffisante. La décarbonatation et la clinkérisation sont inachevées, par conséquent, on a un taux faible de Silicates tricalciques et bicalciques et une teneur de chaux libre très grande dans le clinker à l'aval du four. Le clinker formé est très poreux et présente une densité faible: le clinker est de mauvaise qualité.

Le four est froid quand le débit de tirage des fumées est trop grand. Dans ce cas, les fumées ne vont pas céder toute la chaleur nécessaire à la charge ( la farine ).

Une vitesse de rotation ou un débit de farine trop grands peuvent aussi conduire à une incuisson du clinker.

Si le four est froid après avoir été chaud, la couche de croûtage se contracte et casse tout en usant de la couche superficielle des briques. Cette usure expose la virole ( cylindre ), en acier, du four aux hautes températures de la zone de cuisson et risque de l'endommager.

On conclut que pour un four froid, la consommation calorifique est faible et la qualité du clinker n'est pas bonne.

Pour pouvoir contrôler les échanges thermiques dans le four, afin d'avoir une production économique et de bonne qualité, il importe d'étudier en détail ces transferts. Ce qui est l'objet du paragraphe suivant.

I-3 ASPECT THERMIQUE DU FOUR [2], [3], [4], [5] et [6]:

I-3-1 La combustion:

Toutes les réactions qui apparaissent à l'intérieur du four sont endothermiques, excepté celle de la formation du clinker. Le fonctionnement du four nécessite alors un apport

de chaleur important. Cet apport est fourni par une flamme résultant de la combustion du gaz naturel. L'air secondaire sert à cette combustion. Il est porté à une température élevée (  $\approx 900$  °C pour favoriser une meilleure combustion ) car on l'utilise pour refroidir le clinker et récupérer ainsi la plus grande part de calories qu'il emporte en sortant du four.

L'air pratiquement nécessaire par la combustion complète est égal à l'air théorique multiplié par  $n$ ,  $n$  étant le coefficient d'excès d'air compris entre 1,05 et 1,2. Ceci se justifie par le fait que le brassage des gaz à l'intérieur du four est toujours imparfait. Il s'en suit que l'emploi de la quantité d'air juste suffisante pour oxyder théoriquement le combustible, conduirait en fait à une combustion incomplète.

Le contrôle d'excès d'air se fait par la teneur en  $O_2$  des fumées issues du four, elles doivent contenir 1 à 2% d' $O_2$ .

#### I-3-2 Analyse des phénomènes d'échange thermique:

D'une manière générale, il y a 3 modes de transmissions de chaleur: le rayonnement, la convection et la conduction. Nous allons voir comment ces modes de transmissions interviennent dans une section du four, voir la figure I-5:

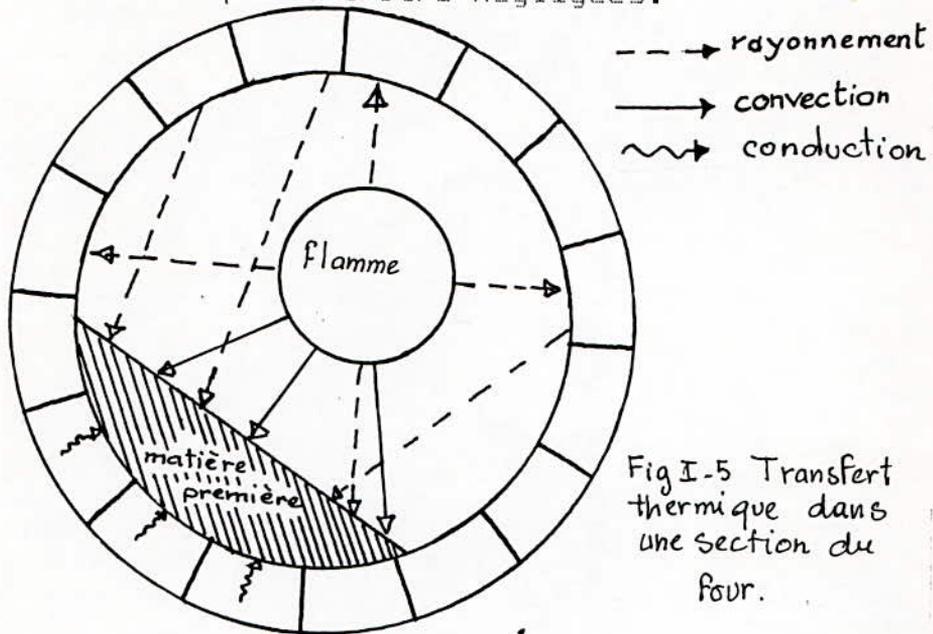
La matière reçoit l'énergie de la flamme, sur la surface du talus AB et de l'arc BMA de paroi sur la surface en contact avec cet arc.

1) La flamme cède de l'énergie par rayonnement et convection le long de la surface AB. Elle en cède également à l'arc de paroi ANB qui en renvoie une partie à la matière et absorbe le reste. La paroi joue le rôle d'un relai thermique entre la flamme et la charge.

2) De cette énergie absorbée par la paroi, une fraction est perdue à l'extérieur du four par conduction, l'autre s'emmagasine à l'intrados de la brique dans une mince couche dont l'épaisseur est de l'ordre du centimètre. Lorsque l'élément de paroi arrive en B et parcourt l'arc BMA, une partie de l'énergie emmagasinée est perdue à l'extérieur par conduction à travers la paroi, l'autre est cédée à la matière, et le cycle se reproduit à chaque tour du four.

Ce dernier mécanisme de transmission s'appelle effet de paroi.

Puisque la température dans le four est supérieure à 900 °C, le mode de transfert thermique prépondérant est le rayonnement ( plus de 90 % des échanges se font par ce mode ). La convection ( 2 à 5 % des échanges ) et la conduction peuvent être négligées.



#### I-3-2-1 Etude du rayonnement [7]:

Le rayonnement thermique est constitué de radiations monochromatiques caractérisées par leur longueur d'onde. Ces radiations s'échelonnent dans l'ensemble du spectre et principalement pour les températures usuelles, de 0.1 micron à 10 micron. La répartition spectrale de l'énergie qu'elle transmettent dépend de la nature et du corps émetteur.

Une partie de cette énergie peut se situer dans le spectre visible. Les radiations non visibles et lumineuses transportent toutes de l'énergie qu'on peut toujours transformer en chaleur en recevant le rayonnement sur un récepteur approprié.

Un corps noir [6] à la température T, rayonne la puissance maximale:

$$R = \sigma T^4 \quad \text{où} \quad \sigma \text{ est la constante de STEFAN.}$$

Un corps quelconque porté à la température  $T$  rayonnera une puissance  $R' < R$  et telle que:

$$R' = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

avec  $\epsilon \leq 1$ , l'émissivité du corps.

Une flamme capable de transférer le plus d'énergie à la charge devrait présenter un facteur d'émission égal à l'unité tout en ayant une température uniforme égale à la température de combustion. Or l'étude détaillée des flammes de gaz naturel montre que celles-ci sont constituées :

- de gaz clairs dont les radiations se situent en dehors du spectre visible et dont le facteur d'émission total varie avec la concentration, l'épaisseur de la couche et sa température ( air réchauffé ou non ). Plus précisément, à concentration et épaisseur de couche fixes, le facteur d'émission décroît quand la température augmente.

- de particules de carbone-suie, formées seulement quand le combustible est suffisamment réchauffé, qui rayonnent dans toute l'étendue du spectre. L'augmentation du facteur d'émission par la concentration de particules carbone-suie, ne peut se faire qu'au dépend de la température de la flamme, si bien que, comme pour les gaz clairs, le facteur d'émission et la température varient en sens inverses.

Donc pratiquement on ne pourra pas réaliser une flamme ayant à la fois un facteur d'émission total voisin de 1 et une température uniforme égale à la température théorique de combustion. Par conséquent on est amené à réaliser un compromis entre  $\epsilon$  et  $T$  pour obtenir ce que l'on désire.

Malgré ça, on a pu montrer par des expériences [7] qu'il peut exister une température de paroi à partir de laquelle le transfert le plus élevé est obtenu grâce aux flammes à faibles facteur d'émission total et à température élevée.

I-3-3 Possibilité d'action sur la consommation calorifique, la qualité et la production par un contrôle des échanges thermiques:

Afin que le transfert de chaleur décrit précédemment se fasse comme il se doit, il faut qu'à chaque débit donné de combustible on fasse correspondre la quantité d'air secondaire nécessaire et ayant la température requise.

On peut contrôler le débit d'air secondaire et sa température par l'action sur les ventilateurs de tirage.

En sachant les débits de combustibles et d'air de combustion, on peut déterminer le flux de chaleur qui pourra être cédé par cette combustion et ceci moyennant le pouvoir calorifique qui est la quantité de chaleur générée par la combustion d'un Nm<sup>3</sup> ou d'un Kg de combustible [3], [7]. De là, on déduit le débit de matière première transformable en clinker par ce flux.

Le contrôle du débit de matière se fait par la vitesse du four et le degré de son remplissage v.

#### I-4 CONCLUSION:

Dans l'étude précédente nous avons pu, d'une part mettre en évidence l'influence primordiale de l'aspect thermique du four sur la production considérée du point de vue qualité et consommation calorifique, ainsi que sur la durée de vie de l'atelier de cuisson. D'autre part, nous avons montré la possibilité du contrôle des échanges thermiques afin d'aboutir soit à une bonne qualité soit à une consommation calorifique moindre. Contrôle qui se fait, soit par action sur la combustion et la flamme ( par le biais de: la température de la flamme ou du combustible, de l'émissivité de la flamme, de la quantité du combustible ou d'air etc...), soit sur la surface de captation ( de la matière ) de la chaleur cédée par les gaz résultant de la combustion ( par modification adéquate des paramètres déterminant cette surface, tels que, le débit de matière première ou la vitesse du four ).

CHAPITRE II

## II-1 OBJECTIF:

Nous supposons que les processus de combustion et de préchauffage se font dans des conditions optimales, et nous nous proposons d'assurer le transfert maximal de la chaleur dégagée par la combustion, pour que la température de la farine dans la zone de cuisson soit maximale entre 1400 °C et 1450 °C. Et ainsi nous serons sûrs de la cuisson complète et donc de la formation du clinker.

Cet objectif pourra être atteint en modifiant la surface de captation de la chaleur de la charge. Et puisque cette surface dépend du débit de la matière première, de la vitesse de rotation du four et de son degré de remplissage, on doit alors trouver les valeurs correspondants aux paramètres précédents, de telle manière que l'objectif prédéfini soit accompli. Pour cela, on doit disposer des relations quantitatives reliant les sus-dits paramètres à la température de la farine. Ces relations constituent un modèle mathématique du procédé à étudier.

Et avant de l'écrire, il est nécessaire de donner des définition utiles concernant la procédure de modélisation.

## II-2 NOTIONS GENERALES THEORIQUES RELATIVES A LA MODELISATION:

### II-2-1 Introduction:

Les procédés actuels de technologie chimique se font dans des conditions inaccessibles à l'observation ou à la mesure, telles que les vitesses d'évolution, les températures et les pressions très élevées. Ils sont caractérisés par le grand nombre de paramètres réglants ou de commande et des grandes interactions mutuelles. Interactions qui sont en général non linéaires.

La connaissance d'un processus se fait au moyen de modèles, c'est-à-dire, de systèmes simplifiés qui reflètent certains aspects, limités au but de recherche, des phénomènes produits par le processus considéré [9]. En d'autres termes, un modèle de procédé (appelé aussi processus physique ou objet) est un ensemble de relations mathématiques permettant de prédire certains aspects quantitatifs et qualitatifs de son fonctionnement. Par exemple:

$$\underline{s} = f(\underline{e}, p_1) \quad (\text{II-1})$$

avec  $\underline{e}$ : le vecteur entrée ( ou sollicitations ),  
 $\underline{s}$ : le vecteur sortie ( ou réponse du procédé aux sollicitations ),  
et  $p_1$ : des paramètres dont on ignore à priori les valeurs [10].

L'efficacité des modèles repose sur une analogie plus ou moins étroite entre le comportement de l'objet et celui de êtres mathématiques. La modélisation permet de présenter sous forme synthétique et cohérente un ensemble de connaissances; à ce titre, elle concerne la quasi-totalité des sciences.

Dans le cadre de l'automatique, on ne demande pas au modèle de décrire la "nature intime" d'un procédé, on lui demande par contre, de décrire avec précision suffisante, les interactions du procédé avec son milieu extérieur. Cette description ne peut se faire sans un minimum de connaissances sur le procédé lui-même; toutefois, la connaissance du procédé n'est pas ici notre but, mais seulement un moyen de parvenir à un modèle efficace. Dans ces conditions, l'écriture d'un modèle nécessite que l'on définisse, au préalable, à la fois l'objet de la modélisation, c'est-à-dire le procédé, et l'utilisation que l'on envisage de faire du modèle [11].

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons aux échanges thermiques dans le four rotatif considéré dans le régime permanent. Le modèle établi en conséquence est dit statique et il sera utilisé pour maximiser la température de la farine dans la zone de cuisson.

#### II-2-2 Analyse d'un processus:

La manière la plus simple de commencer l'analyse d'un procédé consiste à définir ses frontières, puis à décrire les interactions entre le système ainsi délimité et le milieu extérieur.

Ce cadre étant posé, on s'intéresse ensuite aux phénomènes se déroulant à l'intérieur du système. On désigne sous le nom de variables d'entrées ( ou entrées ), l'ensemble des informations définissant les contraintes imposées au système par le milieu extérieur.

Certaines entrées du procédé peuvent être manipulées, directement ou indirectement, par l'opérateur ( ou par un système de commande automatique ). Les entrées sont imposées par l'environnement du procédé, leurs fluctuations au cours du temps interviennent dans le procédé comme des perturbations. Les sorties sont élaborées par le système sous l'action des entrées. Elles sont choisies selon leur importance sur la qualité de fabrication et de production [11], [12] et [13].

On peut représenter schématiquement un processus par le diagramme de la figure II-1.

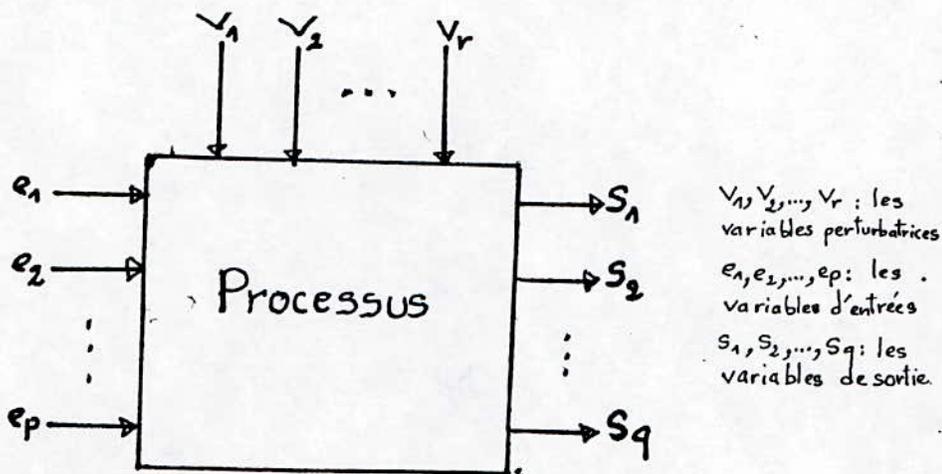


Fig II-1 Représentation d'un processus.

### II-2-3 Les différents types de modèles mathématiques de processus:

L'établissement d'un modèle mathématique d'un processus consiste à trouver les relations entre les différentes variables précédentes, qui traduisent leur comportement réel.

Les modèles mathématiques s'établissent soit d'après les connaissances des sciences classiques ( telles que les lois de la physique et de la chimie ) : ce sont des modèles de reconnaissance, soit d'après des résultats expérimentaux; on les appelle modèles de représentation.

Les premiers sont beaucoup plus riches de significations ( les paramètres  $\pi_i$  ont un sens physique ) et contiennent toutes les informations

utiles sur le processus objet. Ils sont par contre onéreux et difficiles à obtenir.

Les derniers n'ont aucun pouvoir explicatif de la structure physique de l'objet. Leur structure n'est qu'une relation mathématique qui va relier localement les mesures des différentes variables du processus objet. Les paramètres  $\pi_i$  n'ont aucun sens physique.

Quand il peut être suffisant de trouver une relation entre les variables, valable seulement en état stationnaire, c'est-à-dire lorsque le processus fonctionne autour d'un état d'équilibre même si cette état évolue lentement dans le temps, un tel modèle est appelé modèle statique et sera de la forme générale:

$$\underline{s} = f(\underline{e}, \underline{v}, \underline{p}_i; t) \quad (\text{II-2})$$

$$\text{où } \underline{f} = (f_1, f_2, \dots, f_n)$$

Si  $f_1$  est simplement une somme pondérée des variables, le modèle est dit linéaire, toute autre forme reçoit la désignation de modèle statique non linéaire.

Si au contraire, l'inertie des phénomènes considérés sous toutes ses formes doit être prise en compte pour atteindre l'objectif de conduite d'optimisation, le modèle est dit dynamique et fait intervenir des équations différentielles [10], [11] et [13].

Les modèles mathématiques se présentent généralement sous l'une des formes suivantes:

1. Systèmes d'équations algébriques ou d'inégalités algébriques ( processus statiques ).
2. Systèmes d'équations intégral-différentielles ou d'inégalités intégral-différentielles ( processus dynamiques ), ce sont des modèles à paramètres localisés faisant intervenir des fonctions du temps.
3. Systèmes d'équations ou d'inégalités différentielles ou algébriques aux dérivées partielles ( processus statiques ou dynamiques ), ces modèles font intervenir des fonctions du temps et de l'espace.

Dans chacun de ces types de modèles, on distingue les modèles linéaires d'une part, et d'autre part, les modèles non-linéaires [14].

#### II-2-4 Utilités des modèles:

##### a) La commande:

Si pour un processus donné on cherche un certain comportement optimal, alors il est plus économique et plus sûr d'établir un modèle du processus à commander puis à concevoir, à l'aide de ce modèle des boucles d'automatisation du procédé comprenant d'une part des boucles classiques de régulation réalisée par des régulateurs analogiques ou numériques, et d'autre part des boucles numériques d'optimisation réalisées par ordinateur.

#### II-2-5 Etapes de la modélisation:

##### a) Modèle de reconnaissance:

###### a-1 Définition du procédé:

Il s'agit ici de préciser les frontières du système, les contraintes du milieu extérieur (entrées) et les paramètres du système présentant un intérêt (sorties).

###### a-2 Hypothèses:

Ce sont des hypothèses sur le fonctionnement du système conduisant à une description de son état.

###### a-3 Les lois physiques:

La construction d'un modèle repose généralement sur des bilans de masse, d'énergie ou de force. L'écriture de ces bilans fait intervenir les lois de la physique. On utilise en particulier les lois de cinétique physique pour décrire toutes les opérations de transfert et les lois de cinétique chimique quand il y a transformation de la matière.

Le choix des hypothèses et l'écriture des équations de bilan requièrent une bonne compréhension du fonctionnement du procédé. Au terme de cette troisième étape, on dispose d'un modèle de reconnaissance.

Habituellement, ce modèle contient des coefficients dont la valeur est soit incertaine, soit inconnue.

#### a-4 Identification:

Cette étape consiste à ajuster les paramètres inconnus du modèle de manière à ce que celui-ci décrive au mieux le fonctionnement du procédé. La pratique usuelle consiste, pour une entrée donnée, à définir un critère d'écart  $D(O,M)$ , généralement de forme quadratique:

$$D(O,M) = \sum [ S_M(i) - S_O(i) ]^2$$

$$\text{où } \epsilon = S_M(i) - S_O(i)$$

$S_M$ : sortie modèle

$S_O$ : sortie objet

$N$ : déterminant le nombre de points de l'horizon d'observation,

entre les sorties du procédé et les prévisions du modèle.

On ajuste ensuite les paramètres du modèle de façon à annuler le critère.

Si les hypothèses et si les mesures ne sont pas entachées de bruit, alors il existe  $p_{im} = p_{im}$  tel que  $D(O,M) = 0$ . En fait comme les hypothèses ne sont jamais parfaites et que les mesures sont bruitées,  $D$  ne peut être que minimisée, ne pouvant être annulée. Le problème se réduit donc à la minimisation d'une fonction positive  $D(p_{i,m})$  des variables  $p_{i,m}$ .

Le principe général est celui qu'exprime la figure II-2.

Nous sommes en présence d'un schéma bouclé du type de ceux que l'on rencontre dans les systèmes asservis. Il convient cependant de noter que la rétro-action n'agit pas sur l'état du processus mais sur sa structure. Etant une méthode asservie, elle est sûre et puissante.

Cependant une difficulté peut surgir dans le processus d'identification:

La sortie, dont le critère est fonction, dépend bien de la structure du processus objet supposée invariante mais dépend aussi de son entrée. Cette invariance recherchée de la relation entrée-sortie sera-t-elle en pratique indépendante de l'entrée particulière effectivement appliquée lors du test d'identification? Comme ce critère fait intervenir la sortie à une entrée donnée, on peut en effet craindre que le modèle obtenu par une expérience unique ne soit pas nécessairement

valable pour une entrée qui aurait d'autres caractéristiques.

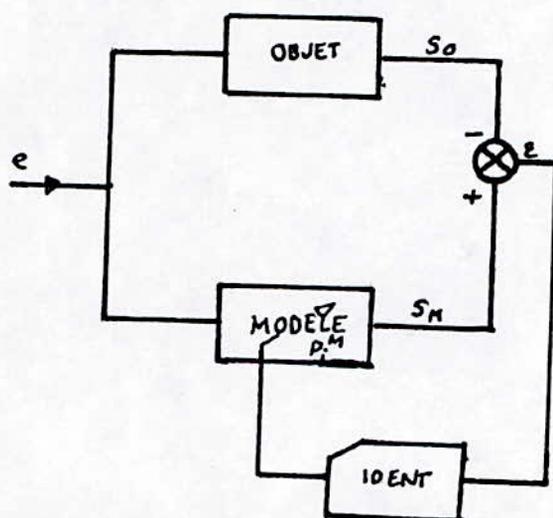
Donc, la valeur minimale de  $D$  relative à une autre entrée est associée à un autre choix des paramètres structuraux du modèle.

S'il y a peu de différence entre les valeurs des paramètres du modèle calculées dans leur domaine de variation possible pour divers entrées, le modèle peut être utilisé pour interpoler dans ce domaine les propriétés du système à étudier.

En raison des hypothèses utilisées lors de l'établissement du modèle. Celui-ci reste une représentation schématique de la réalité physique, et sa structure ne permet généralement pas une description très fine du procédé.

L'ajustement des paramètres contribue à limiter les effets des approximations. Toutefois, cela se fait au détriment de la signification physique des paramètres identifiés:

L'identification tente de rendre compte de la totalité des phénomènes en n'utilisant que les mécanismes explicitement pris en compte dans le modèle.



IDENT est un programme

Fig II-2 - Identification

a-5 Validation ( ou simulation ) :

Au terme de l'étape précédente, on dispose d'un modèle dont les paramètres sont fixés. Il faut maintenant déterminer si le modèle obtenu est satisfaisant, c'est-à-dire, s'il

permet de décrire le fonctionnement du procédé avec précision suffisante pour les variations des entrées auxquelles le procédé peut-être soumis. Deux raisons principales peuvent conduire à des conclusions négatives lors de la validation:

- l'identification est imparfaite; il y a alors lieu de retourner cette étape.

- la structure du modèle de reconnaissance est trop sommaire pour représenter le fonctionnement du procédé dans tout le domaine d'utilisation. Il est alors possible de revenir sur les hypothèses ( étape 2 ) qui régissent la modélisation, de façon à obtenir une description plus précise du procédé.

a-6 Utilisation:

Le modèle validé sera utilisé pour l'élaboration des algorithmes de conduite optimale du procédé [12], [11].

Les différentes étapes de la modélisation sont schématisées sur la figure II-3.

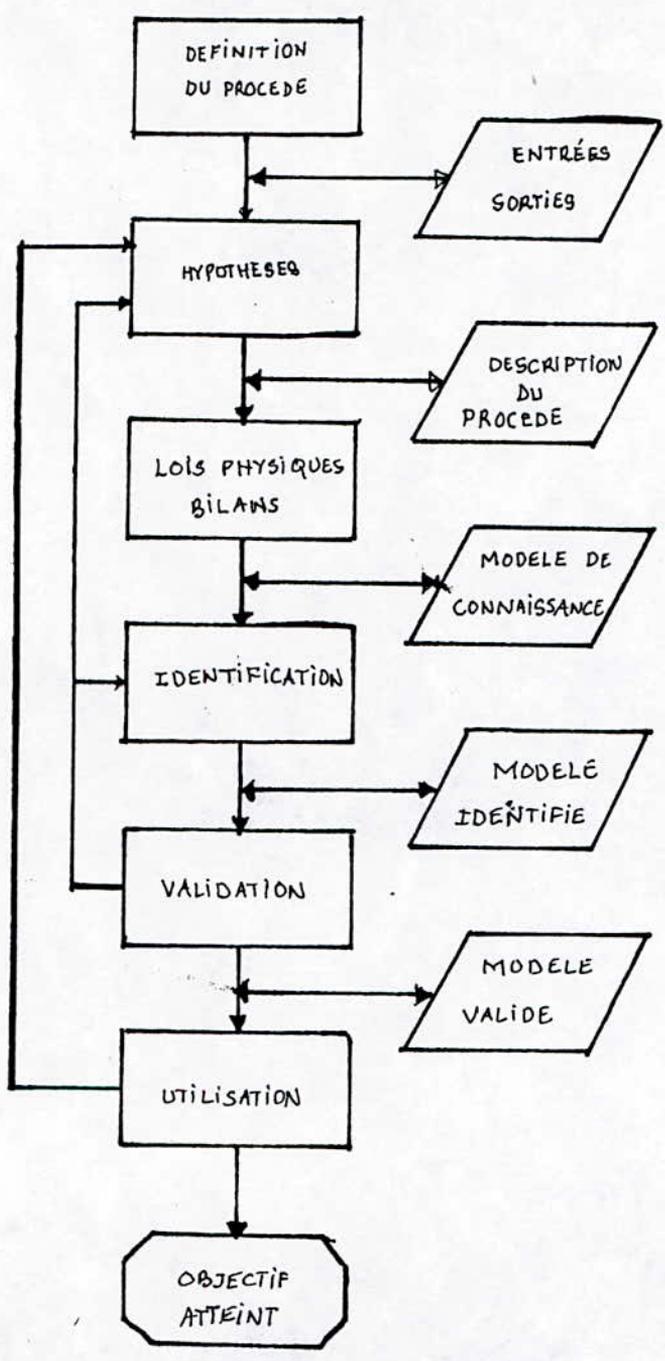


FIG II-3 - Différentes étapes d'une modélisation

### II-3 APPLICATION AU CAS DU FOUR DE "MEFTAH":

Le modèle mathématique qu'on va exposer est un modèle de reconnaissance qui permet la prévision de la distribution de température des fumées et de la farine le long du four, dans le cas où la combustion et le préchauffage seraient optimaux. Il a été établi en ayant considéré le four comme échangeur de chaleur à contre-courant [15], [16].

Un échangeur à contre-courant est un dispositif dans lequel un fluide chaud et un autre froid évoluent en sens opposés et où le premier cède de la chaleur au dernier.

Le flux échangé est fonction des températures d'entrées des 2 fluides, de leurs débits horaires, de la surface de captation de chaleur du fluide froid et d'un coefficient appelé coefficient d'échange global.

#### II-3-1 Définition du procédé:

Le système à étudier est représenté par le four.

Ses entrées sont le débit de farine WC ( ou le débit des fumées WH ) et la vitesse  $n$  du four. Ses sorties sont TC ( ou TH ), respectivement températures de la farine et des fumées.

#### II-3-2 Hypothèses:

a) Le coefficient d'efficacité thermique nu est supposé constant. En réalité il varie quand on modifie le débit de combustible ou le débit de farine, néanmoins cette variation peut être négligée.

b) Le diamètre intérieur  $D_i$  du four est constant.

c) Le degré de remplissage  $v$  du four est supposé constant le long de toute sa longueur. En fait, il diminue après la décarbonatation puisqu'il y a dégagement du  $CO_2$ . Cette diminution reste négligeable si le diamètre du four dans les zones de décarbonatation et de cuisson est le même.

d) Le débit de farine WC est égale à la production horaire. En effet la constance de  $v$  implique celle de WC.

e) le coefficient de transfert global de chaleur est le même dans les zones de décarbonatation et de cuisson.

f) On suppose que la température TC de la surface de la charge est égale à celle régnant à l'intérieur de son volume.

II-3-3 Exposé du modèle [17]:

D'après la théorie des échangeurs de chaleur à contre-courant, la température du fluide chaud ( les fumées ) TH et celle du fluide froid ( la farine ) en n'importe quel position dans le four, mesurée à partir du point de la flamme dont la température est maximale, sont données par les équations :

$$TH = TH_1 - \frac{a(1-Z)}{(a-1)} (TH_1 - TC_2) \quad (II-4)$$

$$TC = TC_2 - \frac{(1-Z)}{(a-1)} (TH_1 - TC_2) \quad (II-5)$$

Par extension de la théorie, on peut montrer que les températures intermédiaires TH et TC peuvent aussi être calculées par les équations:

$$TH = TH_1 - \frac{a(1-Z)}{(a-Z_0)} (TH_1 - TC_1) \quad (II-6)$$

$$TC = TH_1 - \frac{(a-Z)}{(a-Z_0)} (TH_1 - TC_1) \quad (II-7)$$

$$TH = TC_2 - \frac{(1-a.Z)}{(1-Z_0)} (TC_2 - TC_1) \quad (II-8)$$

$$TC = TC_2 - \frac{(1-Z)}{(1-Z_0)} (TC_2 - TC_1) \quad (II-9)$$

$$TH = TH_1 - \frac{(1-Z)}{(1-Z_0)} (TH_1 - TH_2) \quad (II-10)$$

$$TC = TH1 - \frac{(a-Z)}{a(1-Z_0)} (TH1-TH2) \quad (II-11)$$

avec  $Z = \exp \{-h.A.nu.(a-1)/Cpc.WC\}$

et  $a = (WC.Cpc)/(WH.nu.Cph)$

$A$  (  $m^2$  ) : la surface de chauffe ( ou de captation) de la charge, à une distance  $L$  mesurée depuis le point de température maximale (  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$  ) de la flamme

$A_0$  (  $m^2$  ) : la surface de chauffe de la charge depuis le point de température maximale de la flamme jusqu'à l'amont du four.

$h$  (  $w/m^2 \cdot ^\circ\text{K}$  ) : le coefficient global d'échange thermique. Des essais pratiques [17] ont montré qu'il est situé entre  $100$  et  $700 w/m^2 \cdot ^\circ\text{K}$ .

$WC$  (  $\text{Kg}/\text{H}$  ) : la production horaire ou le débit de farine.

$WH$  (  $\text{Kg}/\text{H}$  ) : le débit des fumées ou du tirage.

$Cpc$  (  $wH/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}$  ) : la chaleur spécifique moyenne de la farine, elle est de  $0,314 wH/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}$ .

$Cph$  (  $wH/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}$  ) : la chaleur spécifique moyenne des fumées, elle est égale à  $0,139 wH/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}$ .

$nu$  : le coefficient global d'efficacité thermique, il est compris entre  $0,5$  et  $1$ .

$TH1$  (  $^\circ\text{C}$  ) : la température maximale de la flamme à  $L = 0 \text{ m}$ , sa valeur est  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$TC2$  (  $^\circ\text{C}$  ) : la température de la farine à  $L = 0 \text{ m}$ ,  $1400 \text{ }^\circ\text{C} \leq TC2 \leq 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$TH2$  (  $^\circ\text{C}$  ) : la température de sortie des fumées.

$TC1$  (  $^\circ\text{C}$  ) : la température d'entrée de la farine dans le four.

1) Evaluation de  $a$  :

Le coefficient a dépend du rapport WC/WH qui à son tour dépend de la composition de la matière première et de celle du combustible ( le gaz naturel ).

$$WC/WH = Lg / ( Zgw + Sg ) \quad (II-12)$$

et 
$$a = (Cpc/Cph) \cdot Lg / ( Zgw + Sg )$$

où 
$$Lg = \frac{Mg (1 - CO_{2m} - H_{2O} - C_m)}{1+d} \quad (II-13)$$

$$CO_{2m} = \frac{(CaCcl \cdot SiO_{2c} - CaO_c \cdot SiO_{2cl}) (CO_{2l} - CO_{2c})}{SiO_{2cl} \cdot (CaO_l - CaO_c) + CaO_{cl} (SiO_{2c} - SiO_{2l})} + CO_{2c} \quad (II-14)$$

$$Mg = \frac{\{0,26 N_2 + 0,5 H_2 + CH_4 + C_2H_4 + 1,5 C_2H_6 + 2 C_3H_8 + 2,5 C_4H_{10} - CO_2 - O_2 - 0,5 CO\} \cdot \{(CO_2) + (CO)\} - \{CO_2 + CO + CH_4 + 2 C_2H_4 + 2 C_2H_6 + 3 C_3H_8 + 4 C_4H_{10}\} \cdot \{0,264 N_2 - (O_2) - (CO_2) - 0,5(CO)\}}{1,87 \cdot \{(CO_{2m} / (3,66) + C_m) \cdot (0,264 (N_2) - (O_2) - (CO_2) - 0,5(CO)) + CO_{2m} / (3,66) \cdot \{(CO_2) + (CO)\}\}} \quad (II-15)$$

$$Sg = 0,805 \cdot (H_2 + 2 C_2H_4 + 2 CH_4 + 3 C_2H_6 + 4 C_3H_8 + 5 C_4H_{10}) + Mg \cdot H_{2O} \quad (II-16)$$

$$Zgw = Zgv [ (7 + (O_2) + 4 (CO_2)) / 5,6 ] \quad (II-17)$$

$$Zgv = \frac{(CO_{2m} / (3,66) + C_m) \cdot \{0,26 N_2 + 0,5 H_2 + CH_4 + C_2H_4 + 1,5 C_2H_6 + 2 C_3H_8 + 2,5 C_4H_{10} - CO_2 - O_2 - 0,5 CO\} + CO_{2m} / (3,66) \cdot \{CO_2 + CO + CH_4 + 2 C_2H_4 + 2 C_2H_6 + 3 C_3H_8 + 4 C_4H_{10}\}}{(CO_{2m} / (3,66) + C_m) \cdot (0,264 (N_2) - (O_2) - (CO_2) - 0,5(CO)) + CO_{2m} / (3,66) \cdot \{(CO_2) + (CO)\}} \quad (II-18)$$

avec Lg: Kg clinker/Nm<sup>3</sup> de gaz de tirage  
Mg: Kg de matière première/Nm<sup>3</sup> de gaz naturel  
Zgw: Kg de gaz de tirage sec/Nm<sup>3</sup> de gaz naturel  
Zgv: Nm<sup>3</sup> de gaz de tirage sec/Nm<sup>3</sup> de gaz

naturel  
 Sg: Kg d'eau dans les fumées/Nm<sup>3</sup> de gaz naturel  
 d : Kg de poussière/Kg de clinker.

Cm, CO<sub>2m</sub> et H<sub>2</sub>O<sub>m</sub>: fractions en masse respectives du carbone, du dioxyde de carbone et de l'humidité dans la matière première.

CO<sub>2c</sub>, CaO<sub>c</sub>, SiO<sub>2c</sub>: fractions en masse du CO<sub>2</sub>, du CaO et du SiO<sub>2</sub> dans l'Argile.

CaO<sub>cl</sub>, SiO<sub>2cl</sub>: fractions en masse du CaO et du SiO<sub>2</sub> dans le clinker.

CO<sub>2l</sub>, CaO<sub>l</sub> et SiO<sub>2l</sub>: fractions en masse du CO<sub>2</sub>, du CaO et du SiO<sub>2</sub> dans la pierre de chaux.

CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> et C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>: fractions respectives en volume du CO<sub>2</sub>, de l'O<sub>2</sub>, du CO, du H<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub>, du C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, du C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, du C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> et du C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> dans le gaz naturel.

2) Evaluation de A et A<sub>o</sub>: \*

Dans le four rotatif, la plus part de la chaleur transmise à la charge se fait par rayonnement des fumées et des parois, et par convection des fumées. Enfin une quantité infime de chaleur est cédée par conduction par la paroi non exposée aux fumées.

Donc la surface prépondérante du transfert est donnée par le produit de la longueur X<sub>o</sub> du talus de matière par l'abscisse du point considéré dans le four. Voir la figure II-4.

$$A = L.X_o \quad (II-19)$$

$$A_o = L_o.X_o \quad (II-20)$$

X<sub>o</sub> est donnée par l'équation suivante qui relie le diamètre intérieur Di du four, X<sub>o</sub> et son degré de remplissage v,

$$v = \frac{\text{section occupée par la charge}}{\text{section du four}} :$$

$$X_o^4 - 4.v.Di^3.X_o^3 + 4.v^2.Di^4 = 0 \quad (II-21)$$

v est calculé [8] à partir de l'équation donnant la production WC en fonction :

- de la vitesse de rotation n ( trs/min ),
- du diamètre  $D_i = 5.5$  m ,
- de la masse volumique de la charge  $\rho_0 = 2470$  Kg/m<sup>3</sup>,
- de l'inclinaison du four  $p = 1,8^\circ$ ,
- de l'angle de pose de la matière  $\theta = 49^\circ$ ,
- du degré de remplissage v du four,

$$WC = 148.n.D_i^3.\rho_0.v.SIN(p)/SIN(\theta) \quad (Kg/H) \quad (II-22)$$

Etant donné le manque de mesures ou de données expérimentales permettant de calculer WC/WH, l'efficacité nu et le coefficient d'échange h, on passe à l'étape de l'identification pour les déterminer.

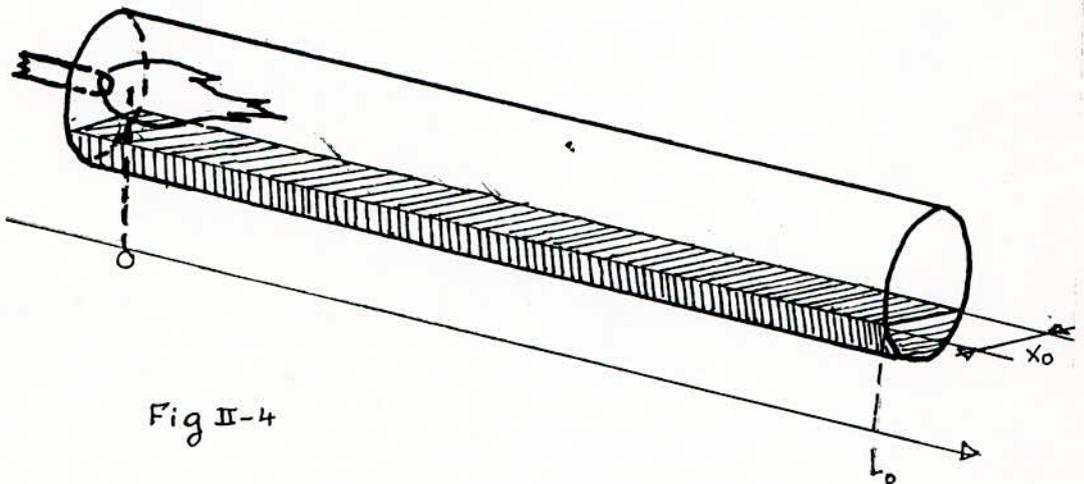


Fig II-4

#### II-3-4 Identification:

Dans cette étape, on a à minimiser le critère écart objet-modèle  $D(O,M)$  par ajustement des paramètres inconnus:  $WC/WH=a_1$ , nu et h, afin que la température de la farine TC donnée par le modèle se rapproche le mieux de la température mesurée. Cette ajustement des paramètres constitue l'étape essentielle de l'optimisation. Pour ce qui est de la méthode utilisée, voir le chapitre III où elle est suffisamment détaillée.

Pour identifier les paramètres inconnus, nous avons choisi six températures expérimentales de la farine dans les différentes zones du four:

- 2 dans la zone de décarbonatation
- 3 dans la zone de cuisson
- 1 dans la zone de refroidissement.

Ces températures correspondent à un régime réel, pour lequel le débit de farine WC = 180 t/H et X<sub>0</sub> = 2m.

On forme le critère distance objet-modèle:

$$D(O,M) = \sum_{i=1}^6 (TC_m(i) - TC_o(i))^2 \quad (II-23)$$

avec TC<sub>m</sub>(i) = TC(Li): la température de la farine donnée par le modèle au point d'abscisse Li.  
TC<sub>o</sub>(i): la température mesurée au point d'abscisse Li.

On minimisera ce critère en prenant comme variables les 3 paramètres inconnus et soumis aux contraintes linéaire suivantes:

$h \in [100,700]$ ,  $nu \in [0.5,0.6]$  et  $a1 \in [0.4,0.54]$   
ou ce qui revient à écrire:

$$h1(a1,h,nu) = h - 700 \leq 0 \quad (II-24)$$

$$h2(a1,h,nu) = -h + 100 \leq 0 \quad (II-25)$$

$$h3(a1,h,nu) = nu - 0,6 \leq 0 \quad (II-26)$$

$$h4(a1,h,nu) = -nu + 0,5 \leq 0 \quad (II-27)$$

$$h5(a1,h,nu) = a1 - 0,6 \leq 0 \quad (II-28)$$

$$h6(a1,h,nu) = -a1 + 0,5 \leq 0 \quad (II-29)$$

La minimisation d'un tel critère ( quadratique ) avec des contraintes sur ses variables est un problème très difficile. Toutefois, on peut contourner cette difficulté en se ramenant à un problème sans contraintes par l'artifice suivant: Au lieu de minimiser D(O,M), on minimise:

$$D'(O,M) = D(O,M) + \sum_{i=1}^6 K_i \cdot \delta_i \cdot [ h_i(a1,h,nu) ]^2 \quad (II-30)$$

où l'on a associé à chaque contrainte inégalité  $h_i(a_1, h, nu) \leq 0$ , la pénalisation  $p_i(a_1, h, nu) = K_i \cdot \delta_i \cdot [h_i(a_1, h, nu)]^2$

avec  $\delta_i = 1$  si  $h_i(a_1, h, nu) > 0$   
 $\delta_i = 0$  si  $h_i(a_1, h, nu) \leq 0$

Les coefficients  $K_i$  sont des coefficients de pondération positifs qu'on choisit très grands (de l'ordre de  $10^n$   $n \geq 20$ ) pour que le minimum de  $D'(O, M)$  tende vers celui de  $D(O, M)$ .

A partir d'un vecteur initial  $(a_{10}, h_0, nu_0)$  satisfaisant les contraintes, l'algorithme de minimisation converge vers le vecteur  $(a_1, h, nu)$  satisfaisant aussi les contraintes et qui est à la fois le minimum de  $D'(O, M)$  et de  $D(O, M)$ .

L'organigramme du programme d'identification est décrit par la figure II-5, tandis que le programme correspondant et ses résultats sont représentés dans l'annexe A.

Remarque:

On aurait pu structurer le programme autrement; on aurait choisi au départ une grande valeur pour les éléments du vecteur  $\underline{K}$  et l'on rechercherait le minimum correspondant. Si la valeur de  $\| \underline{P}(\underline{X}) \|$  est trop importante on reprend l'itération avec un vecteur  $\underline{K}$  dont la norme est supérieure à celle du  $\underline{K}$  précédent, et ceci jusqu'à ce que la précision désirée sur  $\| \underline{P}(\underline{X}) \|$  soit obtenue.

II-3-4-1 Commentaire sur l'exécution du programme d'identification:

L'exécution du programme, pour différentes estimations initiales du vecteur variable  $\underline{X}$  et pour différentes températures mesurées, donne le vecteur  $\underline{X} = (\hat{a}_1, \hat{h}, \hat{nu})$  minimisant le critère, la valeur minimale de celui-ci ainsi que les erreurs relatives sur les températures données par le modèle.

On constate que toutes les estimations initiales de  $a_1$ ,  $h$  et  $nu$  conduisent à des solutions voisines. On peut, alors, choisir comme solution:  $a_1 = 0,4$ ,  $h = 700 \text{ w/m}^2 \cdot \text{°K}$  et  $nu = 0,6$ .

II-3-5 Validation:

Cette étape exige la conduite d'expériences perturbant la marche normale du four et donc sont inacceptables. Alors on s'est

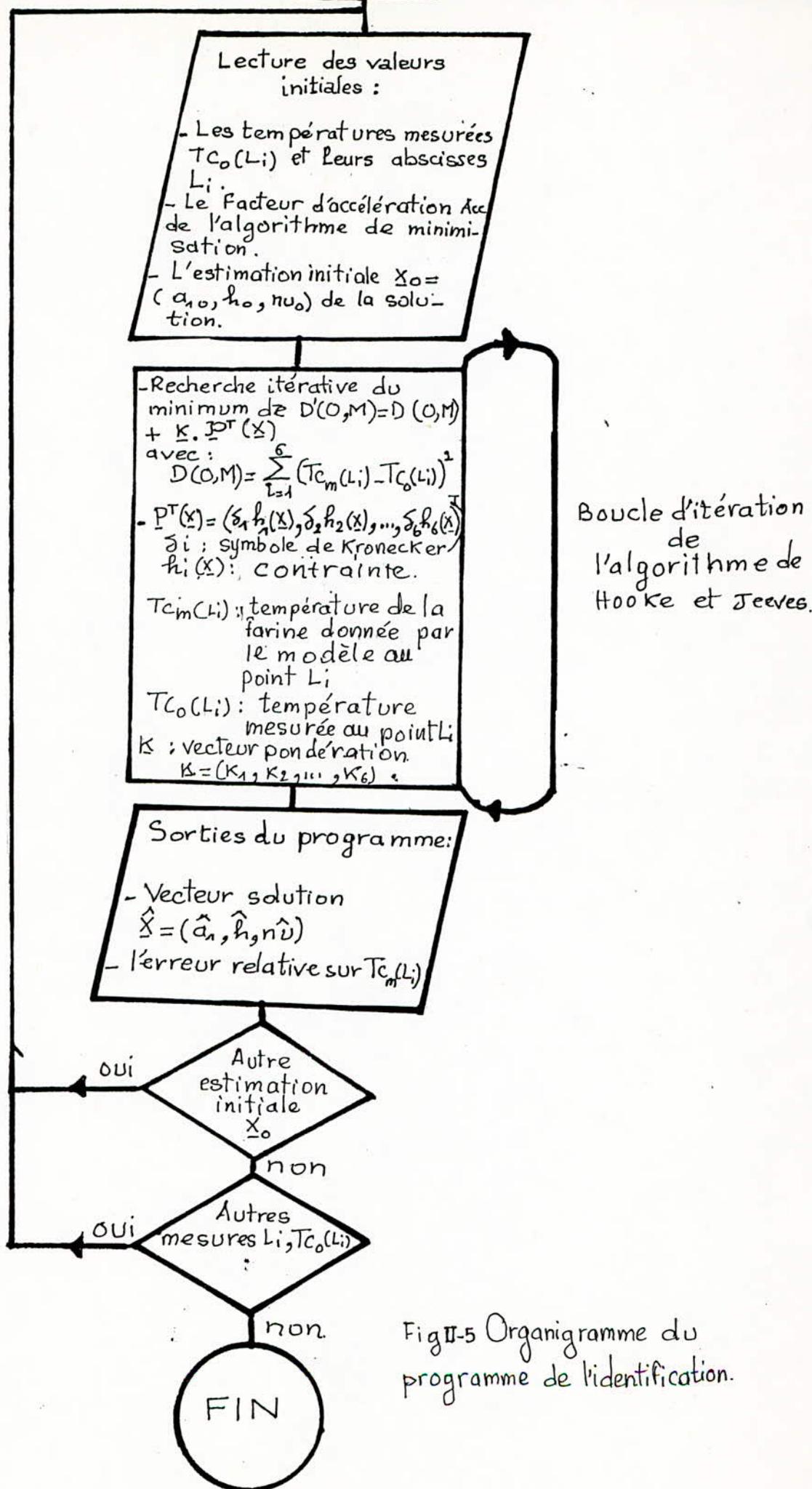


Fig II-5 Organigramme du programme de l'identification.

contenu dans cette phase d'étudier l'influence du débit de farine WC et de la vitesse de rotation  $n$  du four sur la distribution de température dans le four. Pour ce faire, nous avons pris les équations (II-4) et (II-5) comme modèle de distribution de température dans le four.

#### II-3-5-1 Influence de la vitesse de rotation du four:

Quand on augmente la vitesse de rotation du four tout en gardant les débit de tirage et de farine constants et vérifiant le rapport  $WC/WH = 0,4$ , on remarque une augmentation des températures des fumées et de la farine à l'amont du four, voir la figure II-6. Ceci est dû au fait que pour la plus petite vitesse du four; le degré de remplissage  $v$ , la longueur  $X_0$  de la corde du talus et la surface de chauffe  $A = L.X_0$  sont les plus grands. Par conséquent le rapport  $A/WC$ , qui exprime la surface de chauffe par unité de débit de farine, l'est aussi. Et c'est pour cela qu'on observe une importante chute de température pour TH et un accroissement rapide pour TC. On peut expliquer ce phénomène autrement:

D'après l'équation (II-22), à WC constant l'augmentation de  $n$  entraîne la diminution de  $v$  et donc de celles de  $X_0$  et de la surface de chauffe  $A$ , par suite il faut une grande température d'entrée TC1 à la charge pour qu'elle atteigne les  $1450^{\circ}C$  dans la zone de cuisson. Dans ce cas les fumées ne vont pas perdre beaucoup de leur chaleur, aussi leur température de sortie TH2 augmente-t-elle.

#### II-3-5-2 Influence du débit de farine WC:

Voir la figure II-7. Partons du rapport  $WC/WH$  maintenu constant avec la variation de WC, on observe les mêmes effets que précédemment et qui s'expliquent de la même manière.

#### II-3-5-4 Organigramme et programme de simulation:

Pour une vitesse  $n$  donnée et un débit de farine WC variant ( ou l'inverse ), le programme de simulation calcule le degré de remplissage  $v$  puis résout l'équation (II-21) par rapport à  $X_0$  par la méthode de NEWTON. La longueur  $X_0$  étant déterminée, alors la surface de chauffe  $A=L.X_0$ , TC et TH seront calculées en chaque point

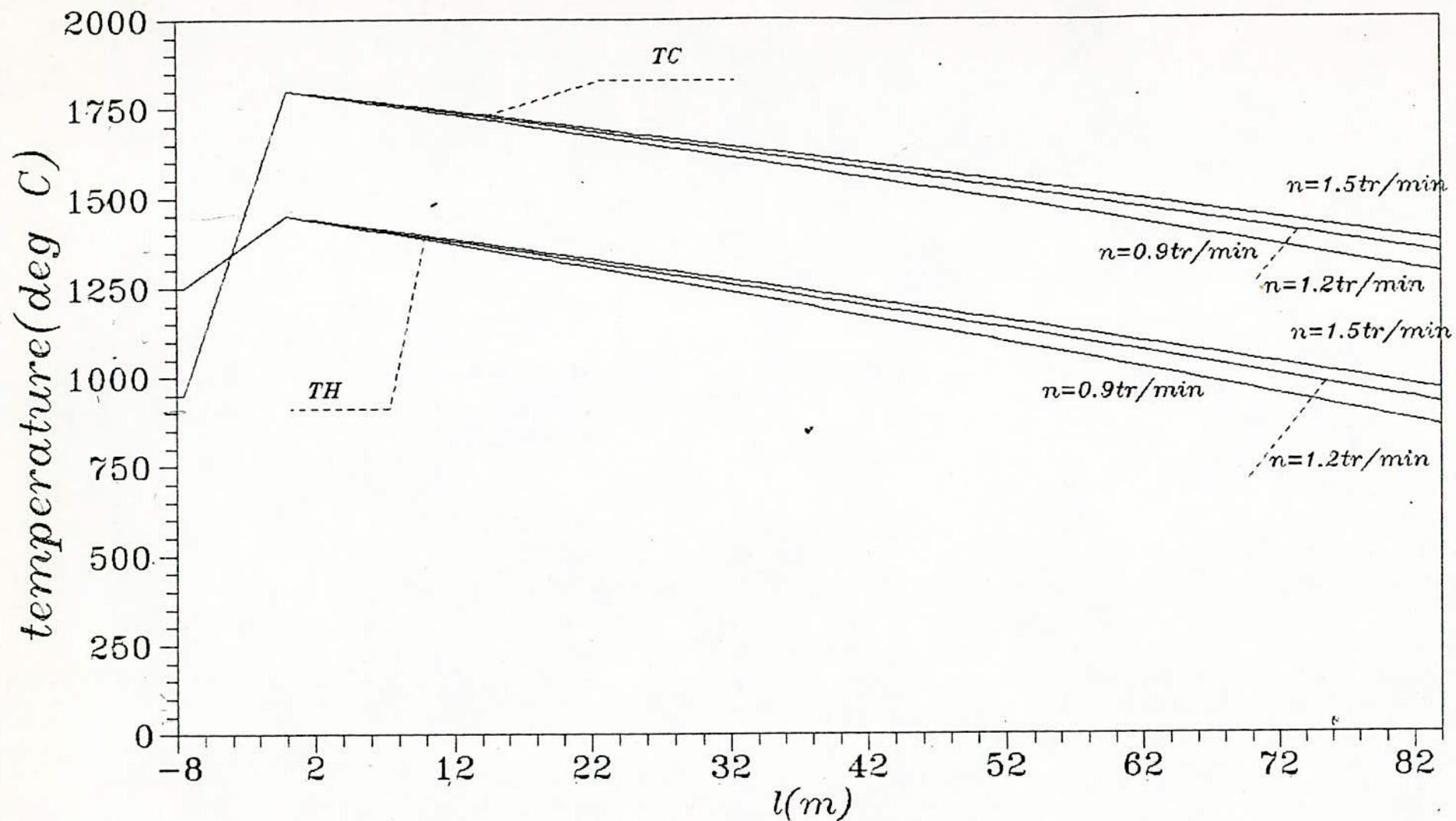


Fig-II<sup>6</sup> - Influence de la vitesse  $n$  du four sur la distribution de température de la charge, TC, et des gaz, TH, pour  $WC=180$  t/h et  $WC/WH=0.4$ .

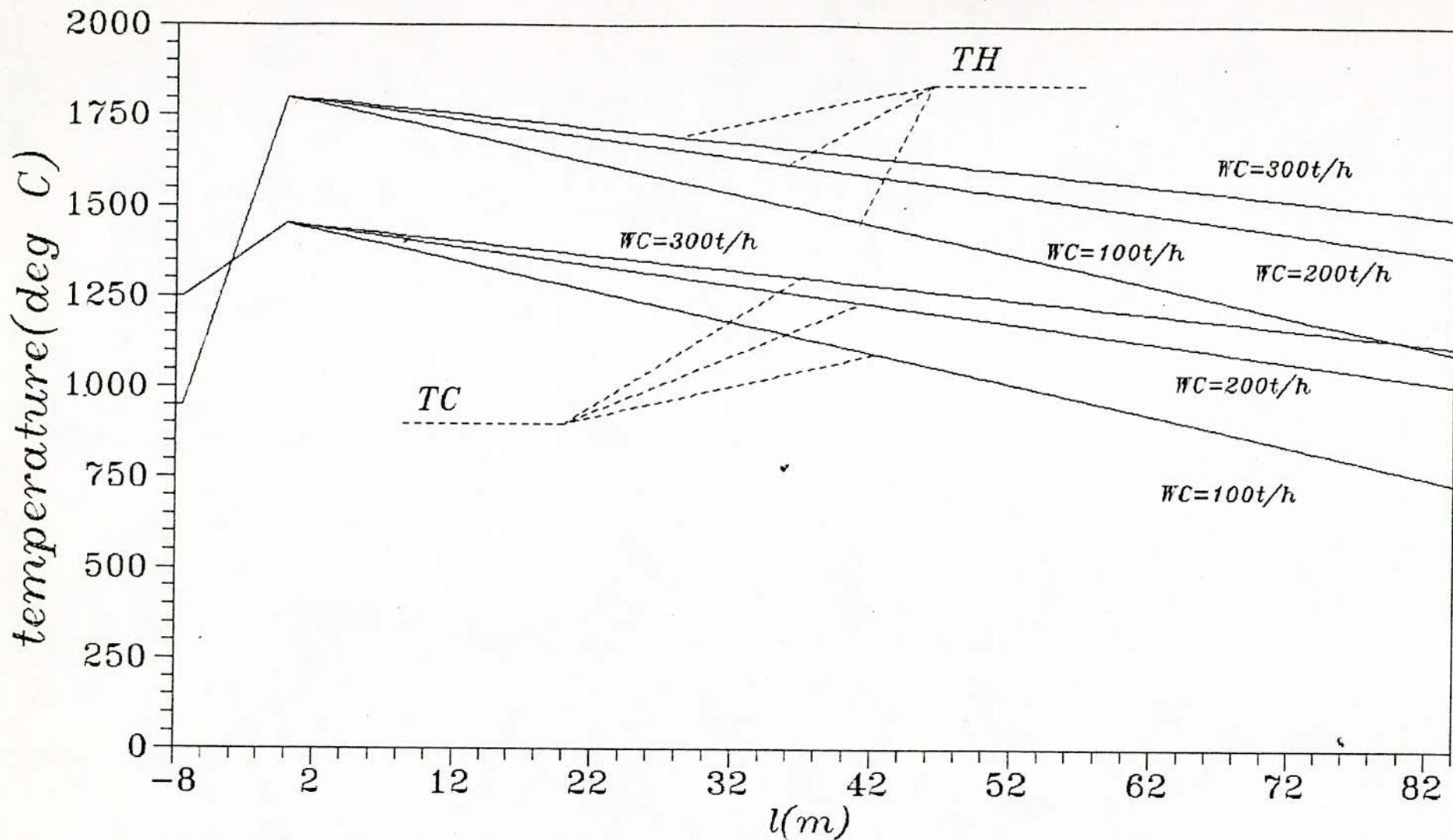


fig- II-7 - Influence du debit de farine WC sur la distribution de temperature de la charge, TC, et des gaz, TH, pour une vitesse de  $n=1.3$ tr/min et  $WC/WH=0.4$ .

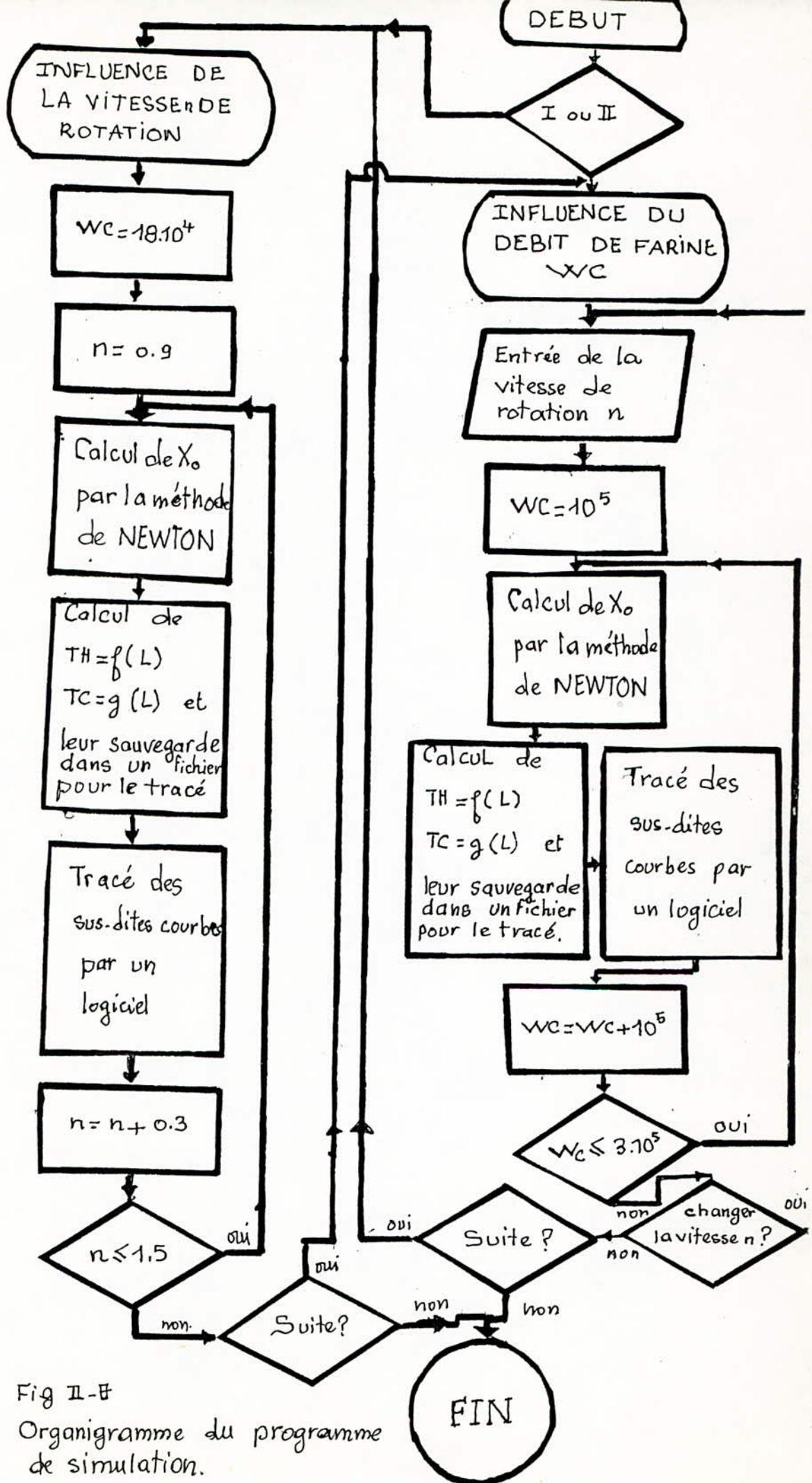


Fig II-B  
Organigramme du programme de simulation.

d'abscisse L du four. Et par la suite les courbes TC(L) et TH(L) seront tracées.

L'organigramme est sur la figure II-~~X~~ tandis que le programme est représenté dans l'annexe B.

#### II-4 CONCLUSION:

On retient de ce qui précède que l'augmentation du rapport A/WC entraîne celle de TC2 ( quand on utilise l'équation (II-7) ) et la diminution de TC1 ( quand on utilise l'équation (II-5) ).

Ce rapport est variable, soit par la vitesse du four, soit par le débit de farine WC. Et le modèle de distribution de température pourra être exploité pour commander:

- soit la température d'entrée TC1 de la farine au moyen de l'équation (II-5).
- soit la température de cuisson TC2 de la farine à l'aide de l'équation (II-7).

CHAPITRE III

CHAPITRE III

### III-1 UTILISATION DU MODELE POUR LA COMMANDE OPTIMALE DU FOUR ROTATIF [10], [14], [18], [19] et [20]:

Fondamentalement, la commande automatique d'un processus est un problème d'optimisation statique et dynamique.

L'optimisation peut être généralement définie comme une opération permettant d'obtenir le meilleur de quelque chose dans des conditions bien définies.

Un problème d'optimisation comporte les éléments suivants:

- Un objectif à atteindre (lié à un gain, un coût, un rendement etc...).
- Une formulation mathématique de l'objectif par une fonction économique. Ceci se fait par l'établissement des relations quantitatives utiles entre les différentes grandeurs entrant dans la fonction économique et les variables réglant (entrées) dont elles dépendent.
- Un modèle mathématique traduisant les relations quantitatives entre les différentes grandeurs importantes et dont la nature (statique ou dynamique) entraîne la désignation du problème d'optimisation.
- Un ensemble de contraintes sous forme d'égalités ou d'inégalités traduisant les limitations technologiques ou économiques imposées au réglage et à la conduite du processus dont on veut optimiser la marche.

L'optimisation statique consiste à déterminer, en supposant le processus dans un régime et pouvant être transféré instantanément dans un autre état, un régime qui soit le meilleur possible. En d'autres termes, elle consiste à chercher l'entrée de consigne optimisant en régime permanent une fonction économique (ou critère).

Le problème d'optimisation statique peut être caractérisé de façon générale par (voir la figure III-1):

- Les relations instantanées entre commandes et sorties

$$\underline{s} = E(e)$$

- Les contraintes sur les sorties et les commandes

$$h(\underline{u}, \underline{e}) \leq 0$$

- Le critère à optimiser

$$C = f(\underline{u}, \underline{e})$$

L'optimisation dynamique est une commande dans laquelle et le régime permanent et la conduite des entrées en fonction du temps s'effectuent d'une manière optimale. Le problème, dans ce cas, revient à chercher les trajectoires des variables de commande en fonction du temps qui optimisent un critère donné.

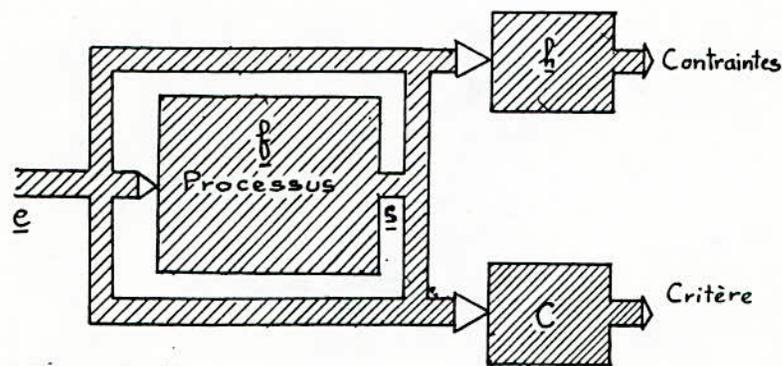


Fig III-1 Problème d'optimisation statique

Pour le processus statique que nous étudions, la commande consiste à chercher le débit de farine WC, la longueur de la corde  $X_0$ , le degré de remplissage  $v$  et la vitesse  $n$  du four, de manière à ce que TC2 ( la température de la farine dans la zone de cuisson ) soit maximale dans l'intervalle  $[1400^{\circ}\text{C}, 1450^{\circ}\text{C}]$ . Et sachant que les contraintes sont:

- sur la vitesse de rotation:

$$0,63 \text{ trs/min} \leq n \leq 1,8 \text{ trs/min}$$

- sur le degré de remplissage:

$$m \leq v \leq n ;$$

$m$  et  $n$  à choisir inférieurs à 1,

ou bien ce qui revient au même:

$$a \leq X_0 \leq b$$

$a$  et  $b$  sont tous deux inférieurs au diamètre  $D_i$

- sur TC2 :

$$1400 \text{ °C} \leq TC2 \leq 1450 \text{ °C.}$$

En utilisant les relations (II-21), (II-22) et (II-7) pour  $L = 0 \text{ m}$ , les contraintes peuvent s'écrire:

$$a \leq X_0 \leq b \quad (\text{III-1})$$

$$(a \leq D_i \text{ et } b \leq D_i)$$

$$- 148 \cdot D_i^3 \cdot \text{ro} \cdot 0,63 \cdot v(a) \cdot \text{SIN}(\rho) / \text{SIN}(\theta) < WC < 148 \cdot D_i^3 \cdot \text{ro} \cdot 1,8 \cdot v(b) \cdot \text{SIN}(\rho) \sqrt{\text{SIN}(\theta)} \quad (\text{III-2})$$

$$\text{avec } v(a) = a \cdot (1 - \sqrt{1 - (a/D_i)^2}) / 2 \cdot D_i$$

$$v(b) = b \cdot (1 - \sqrt{1 - (b/D_i)^2}) / 2 \cdot D_i$$

$$- \quad \text{alfa} \leq X_0 / WC \leq \text{beta} \quad (\text{III-3})$$

$$\text{alfa} = \frac{C_{pc} \cdot (-\ln(a-K))}{h \cdot \text{nu} \cdot (a-1) \cdot L_0} \quad K = \frac{(1-a) \cdot (TH_1 - TC_1)}{(1450 - TH_1)}$$

$$\text{beta} = \frac{C_{pc} \cdot (-\ln(a-B))}{h \cdot \text{nu} \cdot (a-1) \cdot L_0} \quad B = \frac{(1-a) \cdot (TH_1 - TC_1)}{(1450 - TH_1)}$$

La fonction économique ou critère est:

$$TC_2 = TH_1 - \frac{a}{a - Z_0} \cdot (TH_1 - TC_1) \quad (\text{III-4})$$

avec

TC1: la température de la farine à  $L_0 = 76$ , on la choisie suivant le degré de décarbonatation qu'on veut avoir à l'aval du préchauffeur.

TH1: la température maximale de la flamme (1800 °C).

$$a = WC \cdot C_{pc} / WH \cdot \text{nu} \cdot C_{ph}$$

$$\text{et } WC / WH = 0,4.$$

Les variables réglantes  $X_0$  ( ou  $v$  ) et  $n$  apparaissent dans le terme  $Z_0$ :

$$Z_0 = \exp[-h \cdot L_0 \cdot X_0 \cdot \text{nu} \cdot (a-1) / WC \cdot C_{pc}]$$

III-2 CHOIX D'UNE METHODE D'OPTIMISATION DU CRITERE:

C'est-à-dire le choix d'une procédure numérique permettant de calculer les conditions dans lesquelles le fonctionnement optimal est obtenu

La méthode à choisir va dépendre :

1. du caractère statique ou dynamique de la fonction économique et des contraintes.

2. du fait que la fonction économique est contrainte ou non.

3. de leur caractère linéaire ou non linéaire.

Nous résumons ci-après les relations entre formulation du problème et de la méthode à choisir.

Formulation du problème	Méthode
Processus statique	
1. Problèmes non contraints	Théorie ordinaire des maximums et minimums
- $C=f(\underline{x})$ : Critère - $\underline{x}$ : un n-vecteur	
2. Problèmes contraints	Méthodes des multiplicateurs de Lagrange ou méthode du gradient
- $C=f(\underline{x})$ : Critère - $h(\underline{x})=0$ : Contraintes	
3. Programmes linéaires	Méthode du simplexe
- $C=\sum c_i x_i; i=1,2,\dots,n$	
- $\sum a_{ij} x_i (\leq, =, \geq) b_j; j=1,2,\dots,m$	
- $x_i \geq 0 i=1,2,\dots,n$	
4. Programmes non linéaires	Méthodes de gradient projeté, des fonctions de pénalisation
- $C=f(\underline{x})$	
- $h(\underline{x}) (\leq, =, \geq) b_i$	
- $x_i \geq 0 i=1,2,\dots,n$	

Pour le cas dynamique les méthodes citées ne s'appliquent pas, ou sont très lourdes. Par contre la programmation dynamique, les méthodes variationnelles et les méthodes du gradient peuvent être des outils puissants.

Puisque nous avons un critère statique non linéaire et des contraintes statiques linéaires,

nous allons appliquer la méthode dite duale ou de pénalisation.

### III-2-1 Méthode des fonctions de pénalisation:

Il s'agit de déterminer  $X^*$  tel que:

$$f(\underline{X}^*) = \underset{\underline{X}}{\text{Opt}} f(\underline{X}) \quad (\text{III-5})$$

avec  $\underline{X} \in D \subset \mathbb{R}^n$

$f$ : la fonction économique, objectif ou critère  
 $\underline{X}$ : le vecteur des variables de commande  
 $D$ : le domaine défini par les contraintes.

La méthode de pénalisation consiste à modifier le critère en lui ajoutant la fonction de pénalisation  $P(\underline{X})$ :

$$f_m(\underline{X}) = f(\underline{X}) + P(\underline{X}), \quad (\text{III-6})$$

et le problème d'optimisation avec contraintes devient sans contraintes.

Il existe de nombreuses possibilités de choix de la fonction  $P(\underline{X})$ . Mais il est intéressant de choisir des fonctions de pénalisations introduisant aussi peu de discontinuité que possible dans la fonction  $f_m(\underline{X})$ , et dont le poids augmente quand  $\underline{X}$  s'éloigne de  $D$ . Aussi utilise-t-on souvent des pénalisations de forme quadratique que l'on définit de la manière suivante:

- à chaque contrainte "égalité"  $g_j(\underline{X})=0$ , on associe la pénalisation:

$$P_j(\underline{X}) = K_j \cdot [g_j(\underline{X})]^2.$$

- à chaque contrainte "inégalité"  $h_i(\underline{X}) \leq 0$ , on associe la pénalisation:

$$P_i(\underline{X}) = K_i \cdot \delta_i [h_i(\underline{X})]^2$$

avec  $\delta_i = 1$  si  $h_i(\underline{X}) > 0$   
 et  $\delta_i = 0$  si  $h_i(\underline{X}) \leq 0$

Les coefficients  $K_j$  et  $K_i$  sont des facteurs de pondération positifs, et la fonction de pénalisation  $P(\underline{X})$  est la somme des fonctions associées à chacune des contraintes:

$$P(\underline{X}) = \sum_j P_j(\underline{X}) + \sum_i P_i(\underline{X}) \quad (\text{III-7})$$

Les contraintes (II-2), (II-3) et (II-4) sur les variables s'écrivent:

$$\begin{aligned}
 h_1(X_0, WC) &= X_0 - b < 0 \\
 h_2(X_0, WC) &= -X_0 + a < 0 \\
 h_3(X_0, WC) &= WC - \\
 &148 \cdot \text{ro} \cdot \text{Di}^3 \cdot v(a) \cdot 0,63 \cdot \text{SIN}(p) / \text{SIN}(\theta) < 0 \\
 h_4(X_0, WC) &= - \\
 &WC + 148 \cdot \text{ro} \cdot \text{Di}^3 \cdot v(b) \cdot 1,8 \cdot \text{SIN}(p) / \text{SIN}(\theta) < 0 \\
 h_5(X_0, WC) &= X_0 / WC - \text{beta} \\
 h_6(X_0, WC) &= -X_0 / WC + \text{alfa}, \\
 \text{et} \\
 P(X_0, WC) &= K_1 \cdot \delta_1 \cdot h_1^2 + K_2 \cdot \delta_2 \cdot h_2^2 + K_3 \cdot \delta_3 \cdot h_3^2 + \\
 &K_4 \cdot \delta_4 \cdot h_4^2 + K_5 \cdot \delta_5 \cdot h_5^2 + K_6 \cdot \delta_6 \cdot h_6^2.
 \end{aligned}$$

On se place dans le cas d'une recherche de minimum de la fonction  $f_m(X)$ . Quand on cherche un maximum, on peut toujours utiliser une méthode de minimisation en résolvant le problème  $\text{Min}\{-f_m(X)\}$ . Donc le critère à minimiser s'écrit:

$$TC_{2m}(X_0, WC) = -TC_2(X_0, WC) + P(X_0, WC) \quad (\text{III-8})$$

III-2-2 Minimisation du critère modifié:

Si l'on note  $\underline{X}_m$  le minimum de la fonction  $f_m(\underline{X})$  obtenue en lui ajoutant des pénalisations quadratiques, et  $\underline{X}$  le minimum de  $f(\underline{X})$  sans contraintes. On observe généralement que  $\underline{X}_m$  est différent de  $\underline{X}$ . par ailleurs, quand on augmente les coefficients de pondération  $K_k$  et  $K_i$ , la solution  $X_m$  tend vers  $\underline{X}$ .

III-2-3 Méthode de recherche:

Pratiquement toutes les méthodes de recherche d'optimum opèrent par itérations à partir d'une estimation initiale  $\underline{X}_0$  qui est progressivement améliorée. Les différences entre les méthodes se trouvent dans le choix de la procédure adoptée pour passer d'une estimation  $\underline{X}_n$  à une nouvelle estimation  $\underline{X}_{n+1}$ . Certaines méthodes s'appuient sur un développement limité de la fonction critère autour de  $\underline{X}_n$ . Elles font donc intervenir le calcul des dérivées d'ordre 1 et parfois d'ordre 2, c'est le cas des méthodes de NEWTON et du gradient. D'autres méthodes n'utilisent pas les dérivées de la fonction critère. Elles opèrent directement à partir des valeurs de la fonction critère en différents points de l'espace. Ce sont les méthodes directes. Parmi ces méthodes, nous avons choisi celle de HOOKE et JEEVES.

### III-2-3-1 Méthode de HOOKE et JEEVES:

Pour progresser de  $\underline{X}_k$  à  $\underline{X}_{k+1}$ , l'algorithme procède en 2 étapes que l'on répète alternativement. Une étape de recherche locale permettant de passer de  $\underline{X}_k$  à  $\underline{X}_k^*$ , puis un étape d'accélération conduisant à une valeur  $\underline{X}_{k+1}$  aussi proche que possible du minimum recherché.

#### a) Recherche locale:

On recherche, au voisinage de  $\underline{X}_k$ , une valeur  $\underline{X}_k^*$  telle que  $f(\underline{X}_k^*)$  soit plus petite que  $f(\underline{X}_k)$ . Pour cela on dispose d'un ensemble de variations ( $\delta X_i$ ,  $i$  allant de 1 à  $n$ ) applicables à chacune des composantes de  $\underline{X}_k$ , qui ont été choisies au début de la recherche. On commence par appliquer la variation  $\delta X_1$  sur la première composante, ce qui produit le vecteur  $\underline{X}_k + \underline{U}_1 \cdot \delta X_1$ ,  $\underline{U}_1$  étant le vecteur unitaire associé à la première composante, puis on calcule la valeur correspondante de  $f$ ,  $f(\underline{X}_k + \underline{U}_1 \cdot \delta X_1)$ . Si la valeur de  $f$  décroît, on passe à la composante suivante en partant de  $\underline{X}_k + \underline{U}_1 \cdot \delta X_1$ . Dans le cas contraire, on répète l'opération, avec la variation  $-\delta X_1$ . On passe ensuite à la deuxième composante en partant de  $\underline{X}_k - \underline{U}_1 \cdot \delta X_1$  ou de  $\underline{X}_k^*$ , suivant que l'on a rencontré un succès ou un échec avec la variation  $-\delta X_1$ . Ce même processus est appliqué à toutes les composantes de  $\underline{X}$ .

Lorsqu'elles ont toutes été passées en revue, on se trouve en  $\underline{X}_k^*$ . Cette valeur est différente de  $\underline{X}_k$  si l'une au moins des recherches ci-dessus a produit une diminution de  $f$ ; elle est identique à  $\underline{X}_k$  dans le cas contraire.

#### b) Accélération:

Dans cette étape, on calcule la valeur de  $f$  en  $\underline{X}_{k+1}^{\circ}$ , qui est déterminé par la relation suivante:

$$\underline{X}_{k+1}^{\circ} = \underline{X}_{k+1}^* + \Omega \cdot (\underline{X}_k^* - \underline{X}_{k-1}^*) \quad (\text{III-9})$$

Le coefficient  $\Omega$  est le facteur d'accélération de la recherche on le choisit généralement plus grand ou égal à 2. Si on constate une diminution de  $f$  en  $\underline{X}_{k+1}^{\circ}$ , le premier cycle de la recherche a terminé. On entame alors le cycle suivant, en commençant par une étape de recherche locale autour de  $\underline{X}_{k+1} = \underline{X}_{k+1}^{\circ}$ . Si l'on n'obtient pas de diminution de la valeur de  $f$ , l'étape de l'accélération a échoué. On entame alors le cycle

suivant de la recherche, en commençant par une étape de recherche locale autour de la meilleure valeur obtenue jusque-là; on repart donc de  $\underline{X}_{k+1} = \underline{X}_k^*$ .

Si l'on note  $\underline{X}_0$ , l'estimation initiale, la relation (III-9) fait apparaître  $\underline{X}_{-1}$ . On tourne cette difficulté en posant  $\underline{X}_{-1} = \underline{X}_0$ .

c) Progression de la recherche:

La progression de la recherche est illustrée sur la figure III-2.

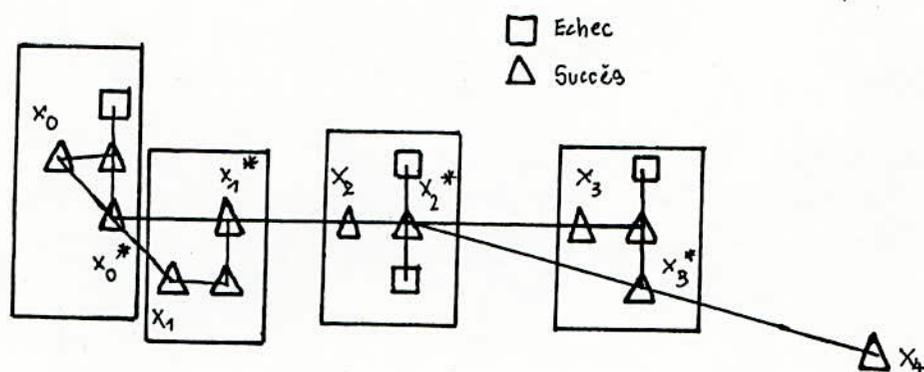


Fig-III-2 - Exemple de progression de la méthode de Hooke et Jeeves.

On observe que l'étape de recherche locale permet d'infléchir la direction générale de la recherche, ce qui facilite la progression le long d'une vallée, même quand celle-ci présente une courbure. On remarque également que le facteur d'accélération permet de progresser rapidement dans une direction favorable déterminée, puis corrigée, lors des étapes successives de recherche locale. Une grande valeur du coefficient  $\Omega$  conduit à une progression rapide mais risquée, une valeur plus faible, à une progression plus sûre mais plus lente. Il est difficile de décider à priori de la valeur de  $\Omega$ . en pratique, une valeur entre 2 et 5 est souvent raisonnable.

d) Arrêt de la recherche:

La recherche est bloquée quand 2 étapes successives de recherche locale et d'accélération

échouent. On obtient alors  $\underline{X}_k = \underline{X}_k^* = \underline{X}_{k+1}$  et la recherche ne progresse plus. Cet arrêt peut intervenir dans 2 cas distincts:

- le premier cas est celui où l'on est arrivé très près d'un minimum; celui-ci est déterminé avec approximation qui est liée à la longueur des variations  $\delta X_i$ .

- le deuxième cas est illustré sur la figure III-3.

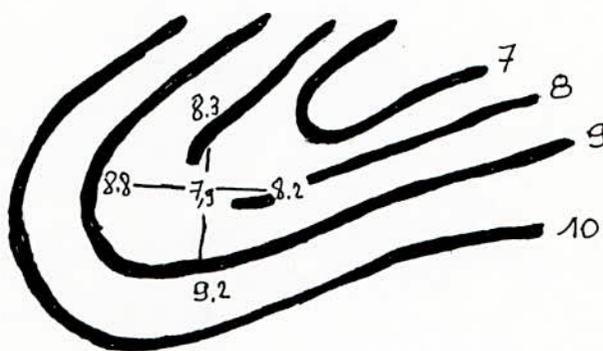


Fig Exemple d'arrêt d'une méthode dans le fond d'une vallée

Il correspond à un échec de la méthode en présence d'une vallée très étroite. On notera que l'étroitesse d'une vallée n'est pas une notion absolue: elle se juge par rapport à la longueur des variations  $\delta X_i$  utilisées. Dans la méthode de HOOKE et JEEVES, on n'abandonne pas généralement au premier arrêt. Au contraire, on tente de répartir avec des variations divisées par 2. En cas de blocage, on peut ainsi espérer obtenir un redémarrage de la progression. En cas d'arrêt près d'un minimum, on améliore son estimation. Le nombre de divisions que l'on peut opérer est au choix. Il existe, toutefois, pour chaque composante, une longueur limite en-dessous de laquelle il est inutile de descendre, celle-ci est atteinte quand il n'est pas possible de distinguer  $f(\underline{X}_k)$  et  $f(\underline{X}_k + \underline{U}_i \cdot \delta X_i)$  en raison des imprécisions associées au calcul de  $f$ .

La deuxième source de difficulté est liée à la forme de certaines fonctions qui peuvent

présenter un ou plusieurs minimums locaux à côté du minimum global que l'on recherche. Pour remédier à cette difficulté on effectue plusieurs recherches successives en partant d'estimations initiales très différentes. Quand toutes les recherches conduisent à des valeurs de  $X$  voisines, il y a une forte présomption que l'on soit près du minimum global recherché. Par contre, quand les résultats diffèrent il est difficile de conclure.

#### III-2-3-2 Modification de l'algorithme: ,

L'algorithme a été modifié de manière à limiter les cas de blocage. Pour cela, il a été nécessaire d'améliorer l'efficacité de l'étape de recherche locale.

Dans la version modifiée, on ne passe pas directement à la composante suivante lorsque les 2 variations  $\delta X_i$  et  $-\delta X_i$  échouent. Au contraire, on reprend le processus de recherche locale sur la même composante, avec une variation  $\delta X_i$  divisée par 2. On poursuit ainsi jusqu'à ce qu'un nombre maximum de divisions par 2 ait été atteint. On a ainsi la possibilité d'agir séparément sur chacune des variations  $\delta X_i$ , et de corriger automatiquement une valeur initiale trop grande. Dans la même ligne d'idée, on tente de doubler la longueur d'une variation  $\delta X_i$  qui a provoqué une diminution de  $f$  au cours de 3 recherches locales consécutives, de manière à corriger automatiquement une valeur initiale trop faible. Ces modifications diminuent, d'une part le risque de blocage et d'autre part, elles permettent plus de souplesse dans le choix des valeurs initiales des variations  $\delta X_i$ . Ce dernier point prend tout son importance quand les différentes composantes de  $\underline{X}$  sont très hétéroclites; comme dans notre cas, où  $\underline{X} = (X_0, WC)$  avec  $X_0$  en mètre et  $WC$  en Kg/H. Il est alors bien difficile de choisir à priori des variations ayant des effets du même ordre sur la fonction critère.

#### II-2-4 Algorithme de la méthode:

Cette algorithme recherche le minimum d'une fonction de  $N$  variables. La fonction à minimiser est  $FCT(\underline{X})$ ,  $\underline{X}$  est un vecteur de dimension  $N$  contenant les valeurs des variables.

XI: vecteur de dimension  $N$ . A l'entrée estimation initiale, au retour, valeur au minimum.

PASX: vecteur de dimension  $N$ : incrément à

utiliser sur chaque variable. Au cours de la recherche, la valeur possible:

$\text{pasx}(k) = \text{XI}(k)/M$ ,  $M \in \text{IN}$  et  $M \geq 20$ .

NRED: nombre de divisions par 2 des incréments avant l'arrêt de la recherche.

ACC : facteur d'accélération de la recherche, supérieur ou égal à 2, valeur possible 5.

ZZ : valeur de la fonction, au minimum.

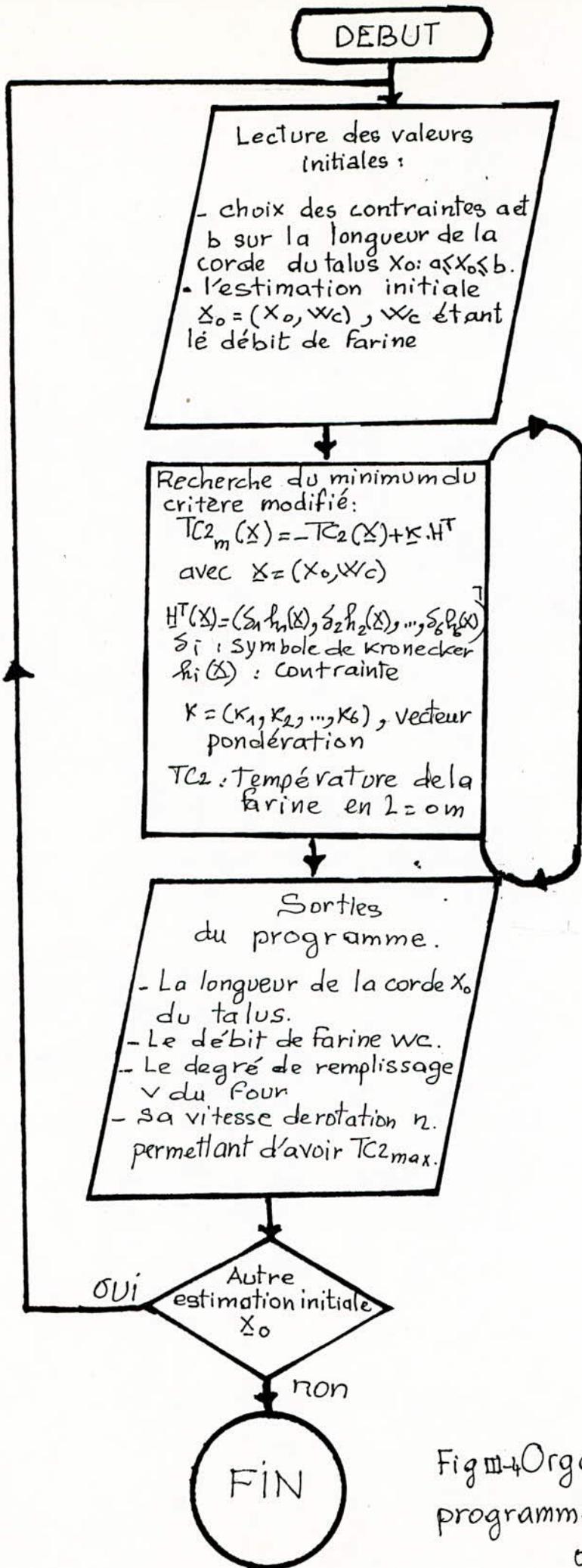
Dans notre cas:  $N = 2$ ,  $\text{NRED} = 4$  et  $\text{FCT}(X)$  est le critère donné par l'équation (III-8).

La figure III-4 montre l'organigramme du programme de la commande illustré, avec ses résultats après chaque itération réussie et ses résultats finaux, dans l'annexe C.

Dans le programme, les contraintes sont modifiables à volonté ( par la variation de a et b ). L'exécution donne pour chaque choix la longueur  $X_0$  du talus, le degré de remplissage  $v$  du four, le débit de farine  $WC$  ( et par conséquent le débit des fumées , car  $WC/WH=0,4$  ) et la vitesse du four qui permettent d'avoir  $TC2$  maximale entre  $1400^\circ\text{C}$  et  $1450^\circ\text{C}$ .

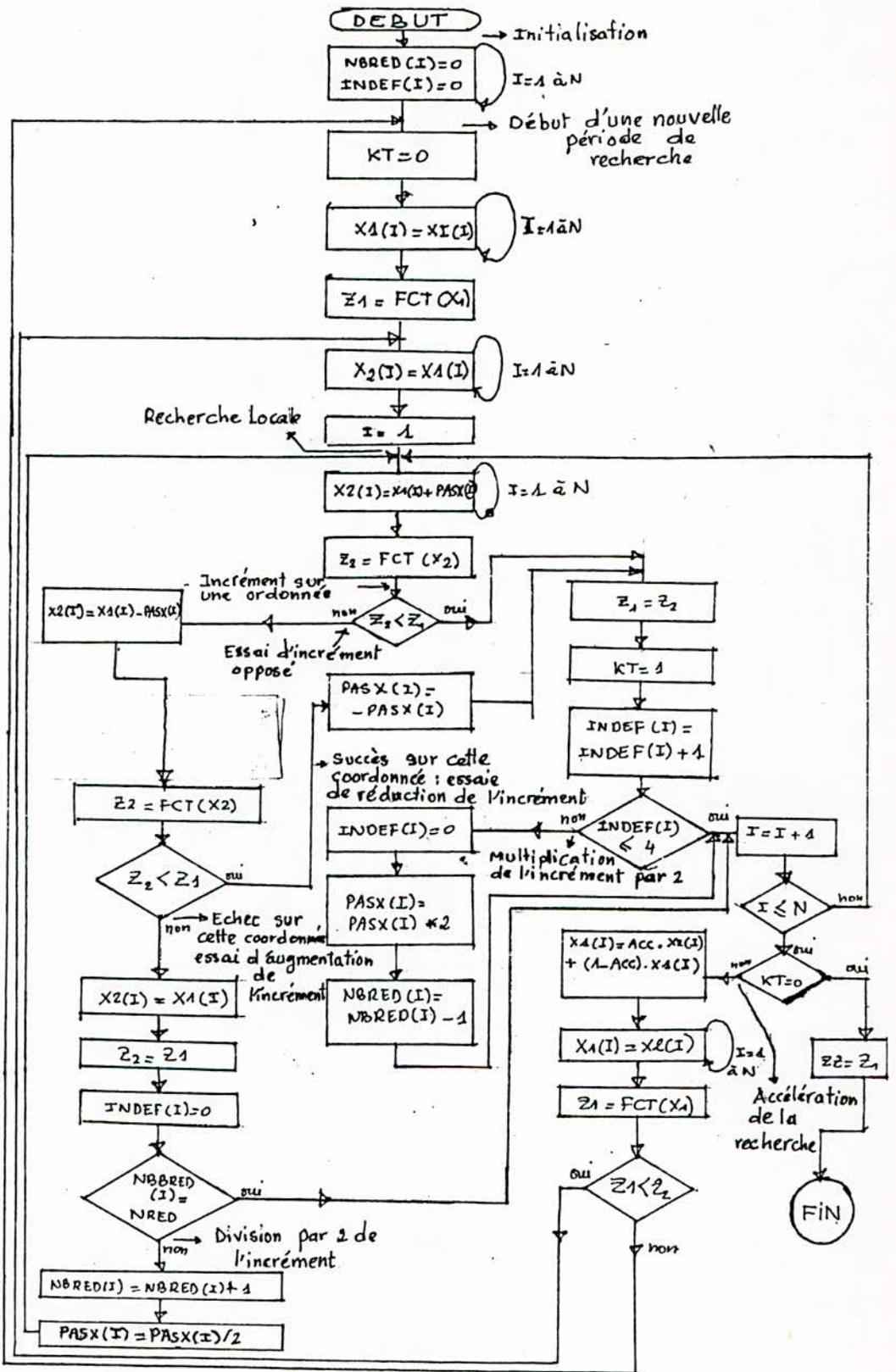
Pour  $a = 4$  m et  $b = 5$  m , la commande optimale est:

$WC = 431485$  Kg/H,  $X_0 = 4,8$  m,  $v = 0,19$ ,  $n = 0,78$  trs/min et  $TC2 = 1450^\circ\text{C}$ .



Algorithme  
de  
minimisation  
de  
Hooke et Jeeves.

Fig III-4 Organigramme du programme de la commande optimale.



Algorithme de Hooke et Jeeves

COCLUSION

L'étude que nous avons faite nous a permis :

1. de mettre en lumière l'influence du comportement thermique du four sur la production, la qualité et la consommation calorifique. D'en déduire la possibilité d'action sur ses paramètres par un contrôle des échanges thermiques entre les gaz chauds et la farine.

2. de présenter les principaux aspects et étapes de la modélisation du fonctionnement d'un procédé quelconque ( le four rotatif de la cimenterie de "MEFTAH" dans notre cas ).

3. d'attribuer, selon l'objectif qu'on s'est fixé et qui est la réalisation du transfert thermique maximal entre les gaz chauds et la charge, un modèle de reconnaissance établi à partir d'un bilan de transfert de chaleur dans le four considéré comme échangeur de chaleur à contre-courant.

Ce modèle prévoit la distribution de température des fluides dans le four en fonction du rapport WC/WH ( débit de farine sur débit de gaz chauds ), du débit de farine WC et des températures d'entrée ou de sortie des fluides.

4. de déduire, par identification à partir de mesures acquises sur le champ, les paramètres inconnus du modèle et qui sont: WC/WH, le coefficient d'efficacité thermique nu du four ainsi que son coefficient global d'échange thermique h.

5. de dégager l'influence du rapport A/WC sur la distribution des températures dans le four. Et de mettre en évidence les paramètres qui varient ce rapport. Ceux-ci représentent les paramètres de contrôle des échanges dans le four ( la vitesse de rotation et le débit de farine WC ) si la combustion se fait dans des conditions optimales.

6. de déterminer, à l'aide d'un algorithme d'optimisation statique appliqué à la fonction objectif exprimée par la température TC2 de la farine dans la zone de cuisson ( au point de température maximale de la flamme ), le débit de farine WC, la vitesse n du four et par conséquent son degré de remplissage v qui réalisent un transfert thermique maximal, et ceci pour différentes contraintes sur les variables de commande.

ANNEXE A

## CHOIX DU LANGAGE

Le choix du TURBO-BASIC a été effectué vu les performances offertes. En effet avec ce logiciel, on a dans la mémoire de travail de l'ordinateur, à la fois l'éditeur pour rentrer le programme, et aussi le compilateur pour la traduction en version exécutable.

Le compilateur TURBO-BASIC traduit, promptement le texte en instructions en langage machine, qui est beaucoup plus rapide que l'interpreteur GWBASIC.



```

110 input "l1=";l1:input "l2=";l2:input "l3=";l3:input "l4=";l4
111 input "l5=";l5:input "l6=";l6
112 input "Tco1=";Te1:input "Tco2=";Te2
113 input "Tco3=";Te3:input "Tco4=";Te4
114 input "Tco5=";Te5:input "Tco6=";Te6
117 print"Faites entrer les valeurs initiales"
118 print"de acc(facteur d'acceleration),a1&,H et NU:"
119 PRINT"";TAB(20);:INPUT "acc doit € [2,5],acc=";ACC
120 PRINT"";TAB(20);:INPUT "a1 doit € [.4,.54],a1=";A1
121 PRINT"";TAB(20);:INPUT "H doit € [100,700],H=";H
122 PRINT"";TAB(20);:INPUT "NU doit € [.5,.6],NU=";NU
123 d$=inkey$:if d$="" then 123
124 cls:lprint"";tab(5);
125 lprint"Dans le cas des couples (L(i),Tco(i)):"
126 lprint(";L1;:lprint",";:lprint Te1;:lprint"),";
127 lprint(";L2;:lprint",";:lprint Te2;:lprint"),";
128 lprint(";L3;:lprint",";:lprint Te3;:lprint"),";
129 lprint(";L4;:lprint",";:lprint Te4;:lprint"),";
130 lprint(";L5;:lprint",";:lprint Te5;:lprint"),";
131 lprint(";L6;:lprint",";:lprint Te6;:lprint"),";
132 lprint"";tab(10);:lprint"et pour un facteur d'acceleration ";
    lprint"acc=";acc
133 lprint"";tab(10);:lprint"ainsi que pour une estimation ";
    lprint"initiale ,:";
134 lprint"";tab(10);:lprint"A1=";A1;:lprint",";
135 lprint"H=";H;:lprint",";:lprint"NU=";NU;:lprint","
,
146 rem ----- la minimisation -----
,
147 FOR I=1 TO 6:K(I)=1e30:NEXT I
151 XI(1)=A1:XI(2)=H:XI(3)=NU
152 pasx(1)=xi(1)/20:pasx(2)=xi(2)/100:pasx(3)=xi(3)/20
160 FOR I=1 TO 3
170 NBRED(I)=0
180 INDEF(I)=0 :NEXT I
181 lprint "les valeurs de la fonction distance D(O,M) qui converge
182 lprint"vers un minimum, ainsi que celles de A1, H et NU sont :
    lprint
    lprint"D ( O,M )";tab(20);:lprint" A1";tab(30);
    lprint"H ( W/m².°k )";tab(45):lprint" NU"
    lprint
,.....
190 '++++++ debut d'une nouvelle période de recherche ++++++
,.....
200 KT=0
210 FOR I=1 TO 3
220 X1(I)=XI(I):NEXT I:X1=X1(1)
221 X2=X1(2):X3=X1(3):GOSUB 2000:GOSUB 1000
223 Z1=S+F
,
231 ' ----- recherche locale -----
,
240 FOR I=1 TO 3
250 X2(I)=X1(I):NEXT I
260 FOR I=1 TO 3
, -----
261 'increment sur une coordonnee
, -----
270 X2(I)=X1(I)+PASX(I)
280 X1=X2(1):X2=X2(2):X3=X2(3)
290 GOSUB 2000:GOSUB 1000

```

```

300 Z2=S+F
310 IF Z2<Z1 THEN gosub 901:goto 490
' -----
320 'essai d'increment oppose
' -----
330 X2(I)=X1(I)-PASX(I)
340 X1=X2(1):X2=X2(2):X3=X2(3)
350 GOSUB 2000:GOSUB 1000
360 Z2=S+F
370 IF Z2<Z1 THEN gosub 901:goto 470
' -----
381 'echec sur cette ordonnee :
'          essai de reduction de l'increment
' -----
390 X2(I)=X1(I)
400 Z2=Z1
410 INDEF(I)=0
420 IF NBRED(I)=4 THEN 570
' -----
430 'division par 2 de l'increment
' -----
440 NBRED(I)=NBRED(I)+1
450 PASX(I)=PASX(I)/2
460 GOTO 261
' -----
470 'succes sur cette ordonnee :
'          essai d'augmentation de l'increment
' -----
480 PASX(I)=-PASX(I)
490 Z1=Z2
500 KT=1
510 INDEF(I)=INDEF(I)+1
520 IF (INDEF(I)<=4) THEN 570
' -----
530 'multiplication de l'increment par 2
' -----
540 INDEF(I)=0
550 PASX(I)=PASX(I)*2
560 NBRED(I)=NBRED(I)-1
570 NEXT I
580 IF(KT=0) GOTO 680
' -----
590 '----- acceleration de la recherche -----
' -----
600 FOR I=1 TO 3
610 X1(I)=acc*X2(I)+(1-acc)*X1(I)
620 XI(I)=X2(I):NEXT I
630 X1=X1(1):X2=X1(2):X3=X1(3)
640 GOSUB 2000:GOSUB 1000
650 Z1=S+F
660 IF Z1<Z2 then gosub 901:GOTO 231
670 GOTO 190
680 lprint"-----"
681 lprint "A cette valeur minimale de D(O,M) correspondent:"
682 lprint"-le rapport des debits WC/WH=A1=";
683 lprint;using"#.#";x2(1)
684 lprint"-le coefficient globale d'echange thermique H=";
685 lprint;using"###.#";X2(2);
686 lprint"(W/m2.°K)"
687 lprint"-le coefficient d'efficacite thermique NU=";
688 lprint;using"#.#";X2(3)
689 lprint"-----"

```

```

700 lprint"Les valeurs theoriques des temperatures Tcm(i)"
710 lprint"correspondants aux abscisses L(i) pour le "
720 lprint" triplet solution trouve, sont:"
721 Tcm1=FNF(L1,x2(1),x2(2),x2(3))
725 lprint"Tcm1=";:lprint;using"####.##";Tcm1;:lprint"°C, ";
726 Tcm2=FNF(L2,x2(1),x2(2),x2(3))
727 lprint"Tcm2=";:lprin;using"####.##";Tcm2;:lprint"°C, ";
728 Tcm3=FNF(L3,x2(1),x2(2),x2(3))
729 lprint"Tcm3=";:lprint;using"####.##";Tcm3;:lprint"°C,"
730 Tcm4=FNF(L4,x2(1),x2(2),x2(3))
731 lprint"Tcm4=";:lprint;using"####.##";Tcm4;:lprint"°C, ";
732 Tcm5=FNF(L5,x2(1),x2(2),x2(3))
733 lprint"Tcm5=";:lprint;using"####.##";Tcm5;:lprint"°C, ";
734 Tcm6=FNF(L6,x2(1),x2(2),x2(3))
740 lprint
742 lprint"-----"
750 lprint"Les erreurs relatives sur ces temperatures ";
760 lprint"sont :
770 lprint"pour Tcm1 :";
775 lprint abs((Te1-Tcm1)/Tcm1)
780 lprint"pour Tcm2 :";
782 lprint abs((Te2-Tcm2)/Tcm2)
785 lprint"pour Tcm3 :";
787 lprint abs((Te3-Tcm3)/Tcm3)
789 lprint"pour Tcm4 :";
791 lprint abs((Te4-Tcm4)/Tcm4)
792 lprint"pour Tcm5 :";
794 lprint abs((Te5-Tcm5)/Tcm5)
795 lprint"pour Tcm6 :";
797 lprint abs((Te6-Tcm6)/Tcm6)
798 lprint"-----"
800 print"Voulez-vous essayez une autre estimation initiale :";
input "o/n :";r$:if r$="o" then 117
810 print"Voulez-vous essayez d'autres couples (L(i),Tco(i)):";
input "o/n :";k$:if k$="o" then 820 else 900
820 cls:goto 109
900 END
901 lprint;using"#####";f;:lprint";tab(20);
lprint;using"#.#";x1;:lprint";tab(30);
lprint;using"###.#";x2;:lprint";tab(45)
lprint;using"#.#";x3;:lprint":return
1000 SP=D(1)*K(1)*FNP(X1,X2,X3)^2
1010 SQ=D(2)*K(2)*FNQ(X1,X2,X3)^2
1020 SR=D(3)*K(3)*FNR(X1,X2,X3)^2
1030 SS=D(4)*K(4)*FNS(X1,X2,X3)^2
1040 ST=D(5)*K(5)*FNT(X1,X2,X3)^2
1050 SU=D(6)*K(6)*FNU(X1,X2,X3)^2
1060 S=(SP+SQ+SR+SS+ST+SU)
1061 A=X1*CPC*(X3*CPH)^-1
1070 L=L1:YA1=FNZ(L,X1,X2,X3):YA=TC2-(1-YA1)*350*(A-1)^-1
1071 F1=(YA-Te1)^2
1080 L=L2:YB1=FNZ(L,X1,X2,X3):YB=TC2-(1-YB1)*350*(A-1)^-1
1081 F2=(YB-Te2)^2
1090 L=L3:YC1=FNZ(L,X1,X2,X3):YC=TC2-(1-YC1)*350*(A-1)^-1
1091 F3=(YC-Te3)^2
1100 L=L4:YD1=FNZ(L,X1,X2,X3):YD=TC2-(1-YD1)*350*(A-1)^-1
1101 F4=(YD-Te4)^2
1110 L=L5:YE1=FNZ(L,X1,X2,X3):YE=TC2-(1-YE1)*350*(A-1)^-1
1111 F5=(YE-Te5)^2
1120 L=L6:YF1=FNZ(L,X1,X2,X3):YF=TC2-(1-YF1)*350*(A-1)^-1
1121 F6=(YF-Te6)^2
1130 F=F1+F2+F3+F4+F5+F6

```

```
1350 RETURN
2000 IF FNP(X1,X2,X3)>0 THEN D(1)=1 ELSE D(1)=0
2010 IF FNQ(X1,X2,X3)>0 THEN D(2)=1 ELSE D(2)=0
2020 IF FNR(X1,X2,X3)>0 THEN D(3)=1 ELSE D(3)=0
2030 IF FNS(X1,X2,X3)>0 THEN D(4)=1 ELSE D(4)=0
2040 IF FNT(X1,X2,X3)>0 THEN D(5)=1 ELSE D(5)=0
2050 IF FNU(X1,X2,X3)>0 THEN D(6)=1 ELSE D(6)=0
2060 RETURN
```

Dans le cas des couples  $(L(i), Tco(i))$ :  
 ( 84 , 900 ), ( 36 , 1100 ), ( 25 , 1130 ),  
 ( 15 , 1400 ), ( 8 , 1450 ), ( 6 , 1250 ),  
 et pour un facteur d'acceleration  $acc= 5$   
 ainsi que pour une estimation initiale ,:  
 $A1= .5$  ,  $H= 330$  ,  $NU= .5$  ,  
 les valeurs de la fonction distance  $D(O,M)$  qui convergent  
 vers un minimum, ainsi que celles de  $A1$ ,  $H$  et  $NU$  sont :

D ( O,M )	A1	H ( W/m <sup>2</sup> .°k )	NU
325263	0.5	330.0	0.5
323194	0.5	333.3	0.5
310966	0.5	333.3	0.5
308949	0.4	333.3	0.5
306766	0.4	336.6	0.5
294472	0.4	336.6	0.5
292340	0.4	336.6	0.5
290048	0.4	339.9	0.5
277725	0.4	339.9	0.6
276608	0.4	339.9	0.6
274229	0.4	343.2	0.6
261949	0.4	343.2	0.6
260786	0.4	343.2	0.6
258330	0.4	346.5	0.6
253456	0.4	353.1	0.6
234462	0.4	379.5	0.6
229843	0.4	386.1	0.6
211904	0.4	412.5	0.6
207557	0.4	419.1	0.6
190741	0.4	445.5	0.6
186684	0.4	452.1	0.6
171063	0.4	478.5	0.6
167313	0.4	485.1	0.6
152960	0.4	511.5	0.6
146182	0.4	524.7	0.6
121877	0.4	577.5	0.6
116536	0.4	590.7	0.6
98326	0.4	643.5	0.6
94598	0.4	656.7	0.6
91216	0.4	669.9	0.6
88186	0.4	683.1	0.6
85518	0.4	696.3	0.6
84908	0.4	699.6	0.6
84871	0.4	699.8	0.6

-----  
 A cette valeur minimale de  $D(O,M)$  correspondent:

- le rapport des debits  $WC/WH=A1=0.4$
  - le coefficient globale d'echange thermique  $H=699.8(W/m2.°K)$
  - le coefficient d'efficacite thermique  $NU=0.6$
- 

Les valeurs theoriques des temperatures  $Tcm(i)$   
 correspondants aux abscisses  $L(i)$  pour le

triplet solution trouve, sont:

$Tcm1= 905.12^{\circ}C$ ,  $Tcm2=1244.57^{\circ}C$ ,  $Tcm3=1311.37^{\circ}C$ ,  
 $Tcm4=1368.95^{\circ}C$ ,  $Tcm5=1407.54^{\circ}C$ ,

-----  
 Les erreurs relatives sur ces temperatures sont :  
 pour Tcm1 : 5.654222216887492E-003  
 pour Tcm2 : .1161606501994308  
 pour Tcm3 : .1383077434046793  
 pour Tcm4 : 2.268484555085099E-002  
 pour Tcm5 : 3.01657194456615E-002  
 pour Tcm6 : .1186742933471959  
 -----

Dans le cas des couples (L(i),Tco(i)):  
 ( 84 , 900 ), ( 36 , 1100 ), ( 25 , 1130 ),  
 ( 15 , 1400 ), ( 8 , 1450 ), ( 6 , 1250 ),  
 et pour un facteur d'acceleration acc= 5  
 ainsi que pour une estimation initiale ,:  
 A1= .4000000059604645 ,H= 700 ,NU= .550000011920929 ,  
 les valeurs de la fonction distance D(O,M) qui convergent  
 vers un minimum, ainsi que celles de A1, H et NU sont :

D ( O,M )	A1	H ( W/m <sup>2</sup> .°k )	NU
91497	0.4	700.0	0.6
87142	0.4	700.0	0.6
85298	0.4	700.0	0.6
84874	0.4	700.0	0.6

-----  
 A cette valeur minimale de D(O,M) correspondent:  
 -le rapport des debits WC/WH=A1=0.4  
 -le coefficient globale d'echange thermique H=700.0(W/m2.°K)  
 -le coefficient d'efficacite thermique NU=0.6  
 -----

Les valeurs theoriques des temperatures Tcm(i)  
 correspondants aux abscisses L(i) pour le  
 triplet solution trouve, sont:  
 Tcm1= 905.23°C, Tcm2=1244.59°C, Tcm3=1311.38°C,  
 Tcm4=1368.95°C, Tcm5=1407.54°C,  
 -----

Les erreurs relatives sur ces temperatures sont :  
 pour Tcm1 : 5.779593844620293E-003  
 pour Tcm2 : .1161718329400773  
 pour Tcm3 : .1383120747974787  
 pour Tcm4 : 2.268347764458218E-002  
 pour Tcm5 : 3.016563010355166E-002  
 pour Tcm6 : .1186742933471959  
 -----

Dans le cas des couples (L(i),Tco(i)):  
 ( 84 , 900 ), ( 38 , 1000 ), ( 30 , 1200 ),  
 ( 15 , 1380 ), ( 9 , 1420 ), ( 4 , 1250 ),  
 et pour un facteur d'acceleration acc= 5  
 ainsi que pour une estimation initiale ,:  
 A1= .5400000214576721 ,H= 600 ,NU= .5 ,  
 les valeurs de la fonction distance D(O,M) qui convergent  
 vers un minimum, ainsi que celles de A1, H et NU sont :

D ( O,M )	A1	H ( W/m <sup>2</sup> .°k )	NU
206524	0.5	600.0	0.5
203812	0.5	606.0	0.5
186033	0.5	606.0	0.5

181325	0.5	606.0	0.5
178586	0.5	612.0	0.5
161814	0.5	612.0	0.5
157278	0.5	612.0	0.5
154593	0.5	618.0	0.5
139281	0.5	618.0	0.6
135140	0.4	618.0	0.6
132617	0.4	624.0	0.6
119348	0.4	624.0	0.6
115902	0.4	624.0	0.6
113692	0.4	630.0	0.6
113287	0.4	630.0	0.6
109099	0.4	642.0	0.6
105194	0.4	654.0	0.6
101580	0.4	666.0	0.6
98263	0.4	678.0	0.6
95247	0.4	690.0	0.6
93855	0.4	696.0	0.6
93188	0.4	699.0	0.6
93024	0.4	699.8	0.6

-----  
A cette valeur minimale de D(O,M) correspondent:

- le rapport des debits WC/WH=A1=0.4
- le coefficient globale d'echange thermique H=699.8(W/m2.\*K)
- le coefficient d'efficacite thermique NU=0.6

-----  
Les valeurs theoriques des temperatures Tcm(i) correspondants aux abscisses L(i) pour le triplet solution trouve, sont:

Tcm1= 906.14°C, Tcm2=1232.21°C, Tcm3=1281.59°C,  
Tcm4=1368.98°C, Tcm5=1402.12°C,

-----  
Les erreurs relatives sur ces temperatures sont :

pour Tcm1 : 6.779958072933804E-003  
pour Tcm2 : .1884478242387216  
pour Tcm3 : 6.36617432327787E-002  
pour Tcm4 : 8.051960558768612E-003  
pour Tcm5 : 1.274965295295788E-002  
pour Tcm6 : .1252559950289938  
-----

ANNEXE B

Soit à résoudre  $f(x) = 0$ , la méthode de Newton donne les approximations successives à partir d'une estimation initiale  $x_0$  de la solution :

$$x_n = x_{n-1} - \frac{f(x_{n-1})}{f'(x_{n-1})}$$

L'avantage de la méthode de Newton par rapport aux autres méthodes d'itérations est la convergence rapide.

Cette méthode revient à utiliser la tangente à  $y = f(x)$  en  $x_{n-1}$  à la place de la courbe ( voir figure B-1).

Son organigramme est décrit par la figure B-2.

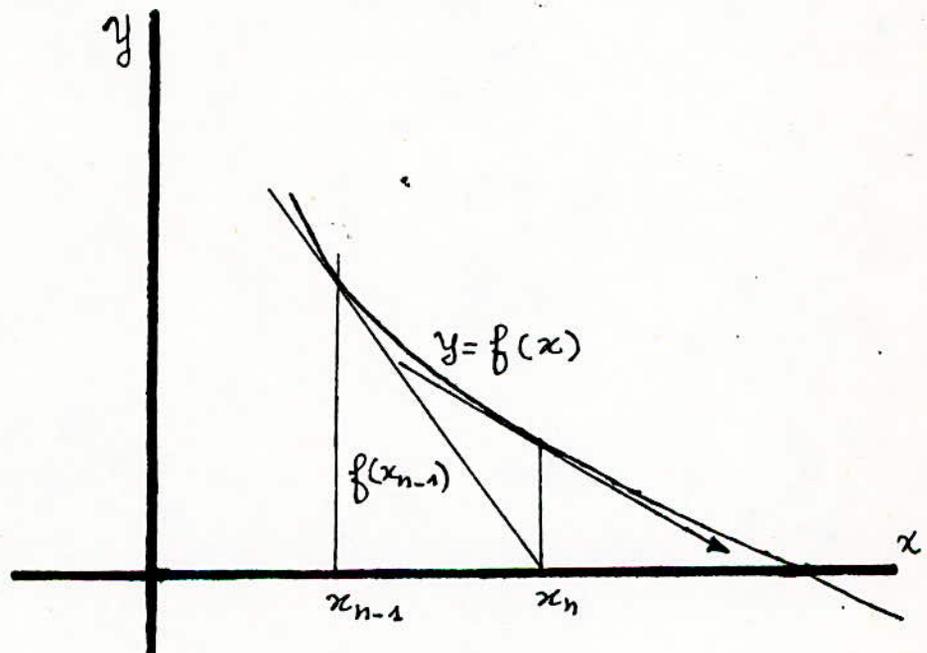


Fig B-1.

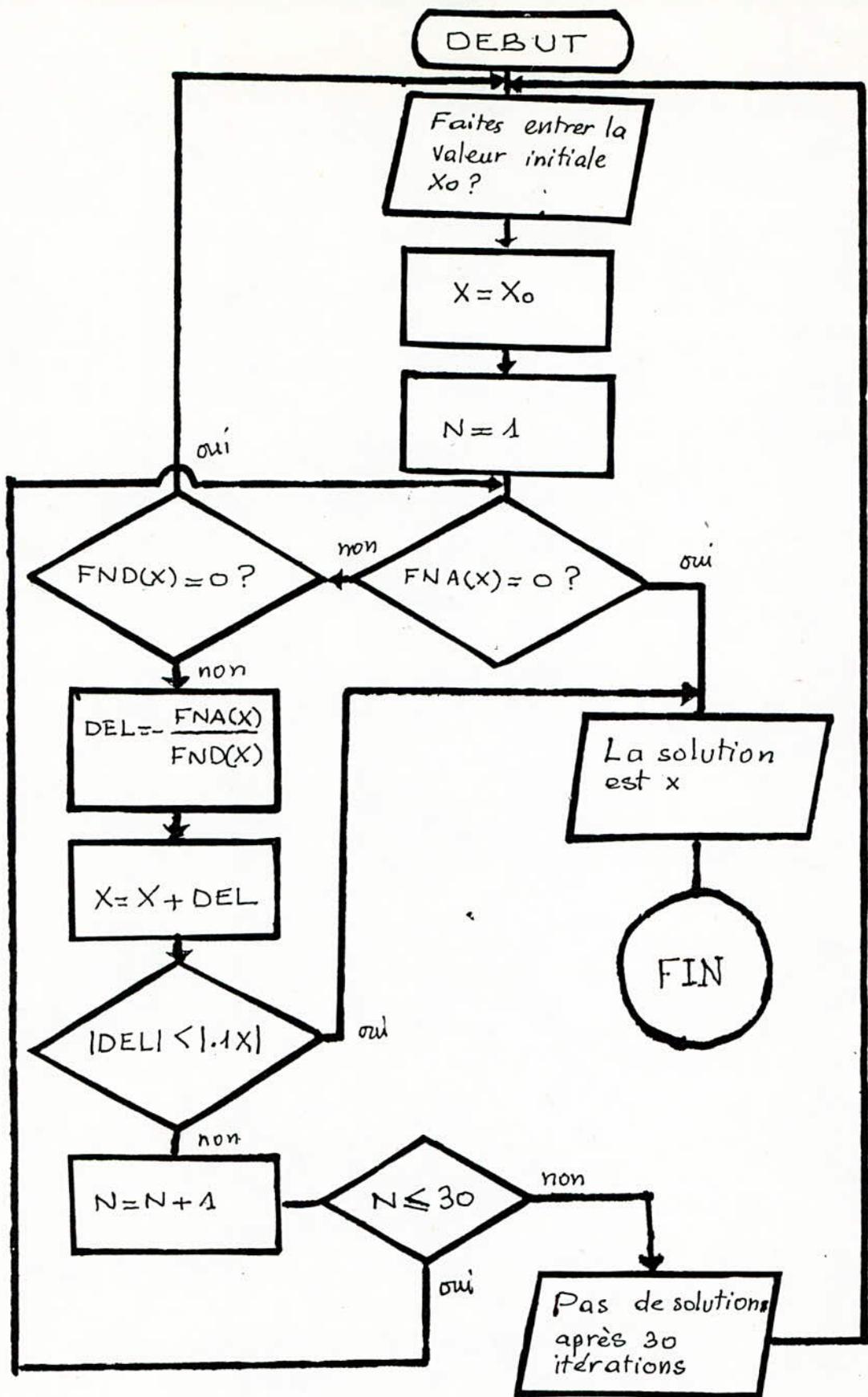


Fig B-2 Organigramme de la méthode de NEWTON.

```

PROGRAMME DE SIMULATION
CE PROGRAMME SIMULE LE FOUR ;IL PERMET DE
PREVOIR LA DISTRIBUTION
DE TEMPERATURE DE LA CHARGE ,TC ,ET DES
FUMEEES ,TH ,EN FONCTION
DU DEBIT DE FARINE WC ,DU DEBIT DES FUMEEES
WH ET DE LA VITESSE DE ROTATION n DU FOUR.
LES EQUATIONS DU MODELE SONT:
Th=Th1-a.(1.z).(Th1-Tc2)/(a-1)
      pour la temperature des fumees et
Tc=Tc2-(1-z).(Th1-Tc2)/(a-1)
      pour celle de la farine ,avec
z=exp(-h.A.nu.(a-1)/WC.CPC)
a=WC.CPC/(nu.WH.CPH)
h: le coefficient global d'echange thermique
A: A=L.X0 surface de chauffe mesuree depuis
le point de temperature maximale de la
flamme jusqu'au point considere
d'abscisse L
nu: coefficient global d'efficacite
thermique des echanges
WC: debit de farine (Kg/h)
WH: debit des fumees (Kg/h)
CPC et CPH: chaleurs massiques moyennse
respectives de la farine et
des fumees
Th1: temperature maximale de la flamme
(1800°C)
Tc2: temperature de la farine dans la
zone de cuisson(1450°C)
WC= 148.n.(sin(p)/sin(t)).v.Di^3.ro
n: la vitesse du four (tr/min),
v: le degre de remplissage du four,
p: l'inclinaison du four (1.8°) ,
Di :son diametre interieur (5.8 m),
t: l'angle de pose de la matiere dans
le four(49°) et
ro=2470 Kg/m3, la masse volumique de
la farine
La longueur de la corde du talus x0(m)
est tiree de:
x0^4-4.v.Di^3.x0+4.v^2.Di^4=0.
----- Definition des fonctions du programme -----
1 DEF FNA(X)=X^4-4*v*Di^3*X+4*v^2*Di^4
2 DEF FND(X)=4*X^3-4*v*Di^3
3 DEF FNZ(L)=EXP(-H*L*X*NU*(A-1)/(WC*CPC))
4 DEF FNH(L)=TH1-(TH1-TC2)*A*(1-FNZ(L))/(A-1)
5 DEF FNC(L)=TC2-(TH1-TC2)*(1-FNZ(L))/(A-1)
6 DEF FNV(WC,N)=WC*SIN(T)/(148*N*SIN(P)*Di^3*RO)
-----
7 D=5.8:TH1=1800:TC2=1450:RO=2470:P=.0314:T=.85
CPH=.319:CPC=.314:NU=.6:H=700

```

```

-----
'
'
cls
8 INPUT "A=( a ou b )";A$
  IF A$="a" THEN 10 ELSE
  IF A$="b" THEN 200 ELSE 8
'
'----- INFLUENCE DU DEBIT DE FARINE -----
'
10 A=CPC/(CPH*NU*2.5)
11 INPUT "la vitesse de rotation n:";N
20 FOR WC=100000! TO 300000! STEP 100000!
30 V=FNV(WC,N)
40 GOSUB 1010
60 GOSUB 3010
80 NEXT WC
90 D$=INKEY$:IF D$="" THEN 90
100 PRINT"voulez changer la vitesse de rotation ";
    print "n,oui ou non"
105 INPUT "reponse=(oui ou non)";REPONSE$
106 IF REPONSE$="oui" THEN 11 ELSE goto 107
107 print"C'etait le cas a voulez-vous la suite ";
    print" ou la fin (tapez s ou f):";:input K$
108 IF K$="s" THEN 8 ELSE 1000
'
'----- INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION -----
'
200 A=CPC/(CPH*NU*2.5):WC=180000!
210 FOR N=.9 TO 1.5 STEP .3
220 V=FNV(WC,N):GOSUB 1010
230 GOSUB 3010
250 NEXT N
260 D$=INKEY$:IF D$="" THEN 260
300 print "C'etait le cas b voulez-vous la ";
    print "suite ou la fin (tapez s ou f):";
    input K$
301 IF K$="s" THEN 8 ELSE 1000
'
-----
'
1000 END
'
-----
'
' Resolution de  $x^4+4.v.D^3.x+4.v^2.D^4=0$ ,
' par rapport a x0, par la methode de newton.
'-----
'
1010 INPUT "x0=";X0
1020 X=X0:N=1
1030 IF FNA(X)=0 THEN 1110
1040 IF FND(X)=0 THEN 1010
1050 DEL=-FNA(X)/FND(X)
1060 X=X+DEL
1070 IF ABS(DEL)<ABS(.1*X) THEN 1110
1080 N=N+1
1090 IF N<=30 THEN 1030
1100 PRINT "pas de solution après 30 itérations"
1105 GOTO 1010
1110 PRINT "x=";X; PRINT "v=";V

```

```

1110 PRINT "x=";X;:PRINT "v=";V
1120 D$=INKEY$ :IF D$="" THEN 1120
1130 RETURN
'
'-----
'  Soubroutine de creation de fichiers de donnees
'      pour un tarcer des graphes
'-----
'
3010 INPUT "Donner le nom de fichier:";X$
3020 OPEN"o",#1,X$
3030 FOR L=-8 TO -7.5 STEP .5
3040 TH=950
3050 PRINT #1,USING "####.##" ";L,TH:NEXT L
3052 FOR L=0 TO 84 STEP 1
3053 TH=FNH(L)
3054 PRINT #1,USING "####.##" ";L,TH:NEXT L
3060 CLOSE #1
3080 INPUT "Donner le nom de fichier:";X$
3090 OPEN"o",#1,X$
3100 FOR L=-8 TO -7.5 STEP .5
3110 TC=1250
3120 PRINT #1,USING "####.##" ";L,TC:NEXT L
3130 FOR L=0 TO 84 STEP 1
3140 TC=FNC(L)
3150 PRINT #1,USING "####.##" ";L,TC:NEXT L
3160 CLOSE #1
3170 RETURN
'

```

PROGRAMME DE SIMULATION

CE PROGRAMME SIMULE LE FOUR ; IL PERMET DE

PREVOIR LA DISTRIBUTION

DE TEMPERATURE DE LA CHARGE , TC , ET DES

FUMES , TH , EN FONCTION

DU DEBIT DE FARINE WC , DU DEBIT DES FUMES

WH ET DE LA VITESSE DE ROTATION n DU FOUR .

LES EQUATIONS DU MODELE SONT :

$$Th = Th1 - a \cdot (1 - z) \cdot (Th1 - Tc2) / (a - 1)$$

pour la temperature des fumees et

$$Tc = Tc2 - (1 - z) \cdot (Th1 - Tc2) / (a - 1)$$

pour celle de la farine , avec

$$z = \exp(-h \cdot A \cdot nu \cdot (a - 1) / WC \cdot CPC)$$

$$a = WC \cdot CPC / (nu \cdot WH \cdot CPH)$$

h : le coefficient global d'echange thermique

A : A=L.X0 surface de chauffe mesuree depuis

le point de temperature maximale de la

flamme jusqu'au point considere

d'abscisse L

nu : coefficient global d'efficacite

thermique des echanges

WC : debit de farine (kg/h)

WH : debit des fumees (kg/h)

CPC et CPH : chaleurs massiques moyennes

respectives de la farine et

des fumees

Th1 : temperature maximale de la flamme

(1800.C)

Tc2 : temperature de la farine dans la

ANNEXE C

' ' . . . . PROGRAMME DE LA COMMANDE OPTIMALE . . . .

' CE PROGRAMME CHERCHE LA VALEUR MAXIMALE  
' QUE DOIT AVOIR LA TEMPERATURE TC2 DE LA FARINE  
' DANS LA ZONE DE CUISSON, EN FONCTION  
' DE XO ET DE WC,  
'  $TC2 = Th1 - (a-1) \cdot (Th1 - Tc1) / (a - z0)$   
'  $z = \exp(-H \cdot l \cdot x0 \cdot NU \cdot (a-1) / WC \cdot CPC)$   
' z0 correspond a l=84 m,  
'  $a = (WC / WH) \cdot (CPC / NU \cdot CPH)$ ,  
' WC / WH, H, NU ONT ETE DETERMINES DANS  
' LA PHASE D'IDENTIFICATION:  
'  $WC / WH = .4$ ,  $H = 700 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$ ,  $NU = .6$ ,  
' CPC ET CPH SONT LES CHALEURS MASSIQUES  
' MOYENNES RESPECTIVES DE LA FARINE ET  
' DES FUMEEES,  
' l: ABCISSE D'UN POINT DONNE DANS LE  
' FOUR MESUREE A PARTIR DU POINT DE LA  
' FLAMME DE TEMPERATURE MAXIMALE,  
' Th1: TEMPERATURE MAXIMALE DE LA FLAMME (=1800°C)  
' Tc1: TEMPERATURE D'ENTREE DE LA FARINE (=900°C )  
' x0 : LONGUEUR DE LA CORDE DU TALUS ( m ).  
' LA METHODE UTILISEE EST CELLE DES FONCTIONS DE  
' PENALISATION, LES VARIABLES XO ET WC SONT TELS  
'  $x0 \in [ 1, 2 ]$  (m), n (VITESSE DE ROTATION)  
'  $\in [ .63, 1.8 ]$  (TOURS/MINUTE) ET  
'  $TC2 \in [ 1400, 1450 ]$  (°C).  
' A LA FIN , ON A LES VALEURS DE XO, DE WC, LA  
' VITESSE n DU FOUR AINSI QUE LE DEGRE  
' DE REMPLISSAGE v DONNANT UN TC2 MAXIMUM  
' DANS LES SUS-DITS DOMAINES DE CONTRAINTES.

-----  
2 cls  
3 '----- bloc de fonctions -----  
10 DIM XI(2):DIM D(6):DIM K(6):DIM X1(30)  
11 DIM X2(30):DIM NBRED(30):DIM INDEF(30):DIM PASX(2)  
30 DEF FNZ(L,x0,wc)=EXP(-H\*L\*X0\*NU\*(A-1)\*(WC\*CPC)^-1)  
def fnwc(x0,n)=148\*ro\*di^3\*n\*fzv(x0)\*sin(p)/sin(t)  
def fntz(x0,n)=th1-(a-1)\*(th1-tc1)\*(a-fnz(l,x0,n))^-1  
40 def fzv(x)=x\*(1-sqr(1-(x/di)^2))/(2\*di)  
50 DEF FNP(x0,wc)=X0-bs  
60 DEF FNQ(X0,wc)=-X0+bi  
70 DEF FNR(X0,wc)=wc-1.9\*148\*ro\*di^3\*fzv(bs)\*sin(p)/sin(t)  
80 DEF FNS(X0,wc)=-wc+.63\*148\*ro\*di^3\*fzv(bi)\*sin(p)/sin(t)  
81 def fnt(x0,wc)=x0/wc-beta  
82 def fnu(x0,wc)=-x0/wc+alfa  
-----  
90 ' initialisation I  
-----  
130 H=700:A1=.4:NU=.6:DI=5.5:RO=2470:P=.0314:T=.85  
131 CPC=.314:CPH=.319:TH1=1800:TC1=900  
A=A1\*CPC\*(CPH\*NU)^-1  
all=a-(1-a)\*(th1-tc1)/(1400-th1)  
alfa=-log(all)\*cpc/(h\*nu\*(a-1)\*76)  
b11=a-(1-a)\*(th1-tc1)/(1450-th1)  
beta=-log(b11)\*cpc/(h\*nu\*(a-1)\*76)  
132 print";tab(20);  
133 print"EXECUTION DU PRGRAMME DE LA COMMANDE"  
85 print"Choisir les bornes, inférieure bi(m) ";  
print"et supérieure bs(m),":print"du domaine des ";

```

print"contraintes sur x0, dans l'intervalle [4,5]:";
input bi,bs
wcs=1.8*148*ro*di^3*fncv(bs)*sin(p)/sin(t)
wci=.63*148*ro*di^3*fncv(bi)*sin(p)/sin(t)
134 print"Faites entrer les valeurs ";
135 print"initiales des variables suivantes:"
140 print";tab(30);:input "acc doit €[2,5],acc=";ACC
142 print";tab(30);:print "x0 doit €[";:print bi;
print",";:print bs;:print"] (m),xo=";:input x0
144 print";tab(30);
145 print"wc doit E [";:print;using"#####.##"; wci;
print",";:print;using"#####.##";wcs;:print" ] et"
print";tab(30);:print"xo/wc doit E [ ";
print;using"#.#####";alfa;
print",";:print;using"#.#####";beta ;:print" ]"
print
wc=x0/alfa:print";tab(30);
print"Alors, wc=";
print;using"#####.##";wc;:print" Kg/h. ";
146 d$=inkey$:if d$="" then 146
147 cls:print "Dans le cas d'une estimation";
148 print" initiale, ":print"x0=";
print;using"#.##";x0;
print" m ,wc=";
149 print;using"#####.##";wc;:print" Kg/h"
print"et pour un facteur";
150 print" d'acceleration acc=";:print acc;
print", "
151 K(1)=1e20:k(2)=1e20:k(3)=1e20:k(4)=1e20
K(5)=1e30:k(6)=1e30
157 'cls
'-----
'
158 '***** recherche du maximum *****
'-----
159 XI(1)=x0:XI(2)=wc:pasx(1)=xi(1)/50
160 pasx(2)=xi(2)/10000:FOR I=1 TO 2
170 NBRED(I)=0
180 INDEF(I)=0 :NEXT I
181 print"les valeurs de TC2 ( °C ) "
182 print"qui convergent vers un maximum,"
print"ainsi que celles de x0 et de wc ";
print"correspondantes, sont : "
print
183 print"TC2( °C )";tab(13);
print"xo ( m )";tab(25);:print"wc ( Kg/h )"
print
'
'.....
190 '== debut d'une nouvelle période de recherche ==
'.....
'
200 KT=0
210 FOR I=1 TO 2
220 X1(I)=XI(I):NEXT I:X1=X1(1):X2=X1(2)
230 GOSUB 1500:GOSUB 1000:Z1=S+F
'.....
'
231 ' recherche locale
'
'.....

```

```

240 FOR I=1 TO 2
250 X2(I)=X1(I):NEXT I
260 FOR I=1 TO 2
'-----
261 ' incrément sur une coordonnée I
'-----
270 X2(I)=X1(I)+PASX(I)
280 X1=X2(1):X2=X2(2)
290 GOSUB 1500:GOSUB 1000
300 Z2=S+F
310 IF Z2<Z1 THEN gosub 901:goto 490
'-----
320 'echec,essai d'incrément opposé I
'-----
330 X2(I)=X1(I)-PASX(I)
340 X1=X2(1):X2=X2(2)
350 GOSUB 1500:GOSUB 1000
360 Z2=S+F
370 IF Z2<Z1 THEN gosub 901:goto 480
'-----
380 'échec sur cette ordonnée: I
'      essai de réduction de l'incrément I
'-----
390 X2(I)=X1(I)
400 Z2=Z1
410 INDEF(I)=0
420 IF NBRED(I)=4 THEN GOTO 570
'-----
430 'division par 2 de l'incrément I
'-----
440 NBRED(I)=NBRED(I)+1
450 PASX(I)=PASX(I)/2
460 GOTO 261
'-----
470 'succès sur cette ordonnée: I
'      essai d'augmentation de l'incrément I
'-----
480 PASX(I)=-PASX(I)
490 Z1=Z2
500 KT=1
510 INDEF(I)=INDEF(I)+1
520 IF (INDEF(I)<=4) THEN 570
'-----
530 'multiplication de l'incrément par 2 I
'-----
540 INDEF(I)=0
550 PASX(I)=PASX(I)*2
560 NBRED(I)=NBRED(I)-1
570 NEXT I
580 IF(KT=0) GOTO 680
'.....
'
590 'accélération de la recherche
'
'.....
600 FOR I=1 TO 2

```

```

610 X1(I)=ACC*X2(I)+(1-ACC)*X1(I)
620 XI(I)=X2(I):NEXT I
630 X1=X1(1):X2=X1(2)
640 GOSUB 1500:GOSUB 1000
650 Z1=S+F
660 IF Z1<Z2 then gosub 901:goto .231
670 GOTO 190
680 print"-----":
print"Au maximum de TC2, TC2max=";
print;using"####.##"; -f;:print" °C, correspondent:"
681 print "La longueur de la corde : x0=";
print;using"#.###";Xi(1);
682 print " m,":print"le debit de farine :wc= ";
print;using"#####.###";X2(2);
683 print " Kg/h, "
684 print";tab(1);
685 print"le degré de remplissage :v=";
print;using"#.###";v;:print" et"
686 xx=(148*v*di^3*ro*sin(p)/sin(t)):print";tab(1);
687 print"la vitesse n=";
689 print;using"#.###";xi(2)/xx;
print" trs/min."
700 print"Voulez-vous essayer une autre estimation ";
print"initiale O/N: ";
input re$
710 if re$="o" then 85 else goto 900
900 END
'-----
'
' *****bloc des sousroutines*****
'
'-----
901 print;using"####.##"; -f;:print";tab(13);
print;using"#.###";x1;
902 print";tab(25);:print;using"#####.##";x2
return
1000 SP=D(1)*K(1)*FNP(X1,X2)^2
1010 SQ=D(2)*K(2)*FNQ(X1,X2)^2
1020 SR=D(3)*K(3)*FNR(X1,X2)^2
1030 SS=D(4)*K(4)*FNS(X1,X2)^2
1040 st=D(5)*K(5)*FNT(X1,X2)^2
su=D(6)*K(6)*FNU(X1,X2)^2
1060 S=(SP+SQ+SR+SS+st+su)
1070 L=84:YA=FNZ(L,X1,X2)
f1=th1-(th1-tc1)*(a-1)*(a-ya)^-1
1130 F=-F1
1350 RETURN
1500 V=fv(x1)
2000 IF FNP(X1,X2)>0 THEN D(1)=1 ELSE D(1)=0
2010 IF FNQ(X1,X2)>0 THEN D(2)=1 ELSE D(2)=0
2020 IF FNR(X1,X2)>0 THEN D(3)=1 ELSE D(3)=0
2030 IF FNS(X1,X2)>0 THEN D(4)=1 ELSE D(4)=0
IF FNT(X1,X2)>0 THEN D(5)=1 ELSE D(5)=0
IF FNU(X1,X2)>0 THEN D(6)=1 ELSE D(6)=0
2060 RETURN
'-----

```

## EXECUTION DU PRGRAMME DE LA COMMANDE

Dans le cas d'une estimation initiale,

$x_0=4.00$  m ,  $w_c=432201.03$  Kg/h

et pour un facteur d'acceleration  $acc=5$  ,

les valeurs de TC2 ( °C )

qui convergent vers un maximum,

ainsi que celles de  $x_0$  et de  $w_c$  correspondantes, sont :

TC2( °C )	$x_0$ ( m )	$w_c$ ( Kg/h )
1405.24	4.080	432201.0
1405.26	4.080	432157.8
1425.34	4.400	431984.9
1430.11	4.480	431984.9
1430.14	4.480	431941.7
1448.46	4.800	431768.8
1449.55	4.820	431768.8
1449.58	4.820	431725.6
1449.85	4.825	431725.6
1449.88	4.825	431682.4
1449.91	4.825	431639.2
1449.96	4.825	431552.8
1449.98	4.825	431509.5
1450.00	4.825	431487.9
1450.00	4.825	431485.2

-----  
Au maximum de TC2,  $TC2_{max}=1450.00$  °C, correspondent:

La longueur de la corde :  $x_0=4.825$  m,

le debit de farine :  $w_c= 431485.219$  Kg/h,

le degré de remplissage :  $v=0.185$  et

la vitesse  $n=0.782$  trs/min.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Description de la cimenterie de MEFTAH  
projetée par NENNIGER et CHENEVERT INC pour  
la S.N.M.C. 1973
- [2] : Industrie de la chaux, du ciment et du  
plâtre.  
M.PAPADAKIS et M.VENUAT. Edition  
DUNOD
- [3] : Cement Data Book  
W.H.DUDA.
- [4] : La transmission de chaleur dans le four  
rotatif à ciment.  
A.FOLIOT.
- [5] : Amélioration du rendement thermique des  
fours à parois chaudes, chauffées au gaz  
naturel.  
G.E.F.G.N. TOULOUSE 1975.
- [6] : Transmission de la chaleur et  
thermodynamique.  
KREITH. Edition MASSON  
1968.
- [7] : Fondement de la théorie générale du  
fonctionnement des fours.  
M.A.GLINKOV Edition MASSON  
1971.
- [8] : Thermique appliquée aux fours industriels  
tomes 1 et 2. Edition DUNOD  
1971.
- [9] : Les méthodes cybernétiques des processus de  
la technologie chimique.  
V.KAFAROV Edition MIR  
1974.
- [10]: Techniques de l'ingénieur R7140 .  
Modélisation et identification des  
processus.  
J.RICHALET
- [11]: Pratique de la régulation numérique des  
processus industriels  
K.NAJIM et G.MURATET. Edition MASSON  
1986.
- [12]: Aide mémoire de l'automatique  
VIDAL Edition DUNOD  
1985.
- [13]: Méthodes I.B.M. de régulation numérique  
1966.
- [14]: Pratique de l'optimisation.  
PUN et LUCAS Edition DUNOD  
1971.
- [15]: Thermique appliquée  
SACCADURA Edition DUNOD  
1979.
- [16]: Thermodynamique

VAN WHYLEN

Edition MAC GRAW  
HILL  
1982.

[17]: Mathematical analysis of the temperature  
distribution of gaz and charge in dry  
process rotary cement kiln  
P.D.SUNAVALA

JOURNAL OF THE  
INSTITUTE OF  
FUEL N°23  
1977.

[18]: Commande des processus industriels par  
calculateur  
K.NAJIM

Edition MASSON  
1986.

[19]: Commande optimal des processus  
BOUDAREL

Edition DUNOD  
1979.

[20]: Systems: decomposition and control  
A.TITLI, M.G.SING

PERGAMON PRESS